

Medidas de rehabilitación para el sector Oasis en playa Varadero

Luis Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Marianao, La Habana.

email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ronnie Torres Hugues

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Marianao, La Habana.

email: ronnie@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta inicialmente el proceso de estudio y evaluación de varias alternativas de solución para mitigar la erosión costera en el sector Oasis de la playa de Varadero. Estas soluciones se corresponden con tipos de obras tradicionales de ingeniería, considerando una de ellas como la solución de referencia. Una vez definida la alternativa más adecuada se procede al diseño de la misma. En todos estos procesos fueron empleadas herramientas informáticas de amplio uso a nivel mundial. Con esas herramientas se modelaron los fenómenos de dinámica del oleaje, transporte de sedimentos y la interacción oleaje, estructura y sedimentos para distintas condiciones climáticas. Se tomó como factor evaluador la capacidad de transporte de sedimentos generado en cada variante.

Palabras clave: erosión, rehabilitación de playa, soluciones de ingeniería, Varadero.

Rehabilitation measures for Oasis sector in Varadero beach

ABSTRACT

In this work the process of study and evaluation of alternatives to mitigate coastal erosion in Oasis beach sector of Varadero beach is presented. These alternatives are chosen from traditional engineering solutions, where one of them is consider as a reference. When the better alternative is selected, its design is carried through. For all these processes, informatic tools with international recognition were used. With those tools different phenomena as wave dynamics, sediment transport and wave-structure-sediment interaction for different climate conditions were modelled. The capacity of sediment transport generated in each alternative was taken as the main evaluation factor.

Keywords: erosion, beach rehabilitation, engineering solutions, Varadero.

INTRODUCCIÓN

El sector de playa marcado por el hotel Oasis (figura 1), el cual presenta una erosión considerable, ha sido analizado en aras de plantear una solución a esta lamentable situación, que provoca afectaciones ambientales y económicas. La misma debe considerar una línea de costa estable y atractiva, lo que impone un incremento de la capacidad de playa y un sistema costero resistente a las condiciones más extremas causadas por el paso de un huracán y el potencial cambio climático.



Figura 1. Vista en planta del sector de playa Oasis

Para llevar a cabo tales requisitos es necesario realizar un estudio de variantes donde se evalúe la efectividad a partir de la reducción de la tasa de transporte de sedimentos en el sector, lo que garantiza mayor longevidad a la rehabilitación.

DESARROLLO

Como base conceptual para arribar a estas soluciones se sigue la metodología para la rehabilitación y protección de playas de Torres y Córdova (2010), que plantea desde el comienzo la caracterización de la zona (ver tabla 1). Posteriormente se debe proceder a determinar los procesos morfológicos para poder establecer cualitativa y cuantitativamente las causas de erosión.

El sector Oasis de la playa Varadero, ubicado en el extremo oeste de la península de Hicacos se identifica básicamente por:

- Una longitud de la playa de 800 m.
- El material de fondo varía desde piedra hasta arena.
- El transporte neto de sedimento es dirigido de Este a Oeste.
- En la frontera Oeste comienza la costa rocosa.
- La frontera Este es la entrada a la marina de Varadero, protegida por groins.
- Entre estas fronteras hay estructuras tales como groins y rompeolas, que no cumplen su función.

Variables características de la zona

Existe un grupo de variables, como las de la tabla 1, que juegan un papel importante en la entrada de datos para la cuantificación matemática de la erosión.

Tabla 1. Resumen de las variables características de la zona (CITMA 2009)

Sección	Variable	Tipo	Promedio anual	Condiciones extremas
Climatología	Temperatura	subtropical	$T_{aire}=26^{\circ}\text{C}$; $T_{agua} = 27^{\circ}\text{C}$	18°C a 32°C
	Precipitaciones	Periodo seco/húmedo	1 320 mm/año	180 mm en Junio
	Vientos	Variables	5 – 9 m/s desde N-NE	120 km/h desde NW
Oceanología	Marea	Semi diurna	MSL -0,20 m a MSL +0,34 m	-
	Corrientes	Inducida por la marea	10 cm/s	37 cm/s
	Oleaje	Más común Frente frío Huracanes	$H=0,29$ m; $T=3$ s $H=2,0$ m; $T=8$ s $H=2,5$ m; $T=9,5$ s	-
	Surgencia	Corto plazo	-	1,7 m
	Incremento del nivel del mar	Relativo	2,8 mm/año para toda Cuba	
Hidrología	Salinidad	Temporal	35,4 – 35,6 ppt	
	Densidad	Agua	1 025 kg/m ³	
	Viscosidad cinemática	-	$0,87 \cdot 10^{-6}$ m ² /s	
Geografía	Estabilidad geológica	Estable	-	-
	Pendiente	$M = dy/dx$	0,05 para los primeros 60 m y 0,20 hacia aguas profundas	-
	Longitud del sector de costa	-	800 m	
Batimetría	Área media representativa de la batimetría	-	700x700 m ²	

La característica más importante del fenómeno que gobierna esta situación, es el transporte de sedimento. La cuantificación del mismo se muestra en la tabla 2.

Estos valores fueron establecidos en Córdova y Torres (2016). Posteriormente, y como parte de la metodología se realiza el análisis de las variantes, teniendo en cuenta los conceptos básicos de obras: soluciones blandas, soluciones duras, soluciones no convencionales y soluciones mixtas. El análisis de estas y la decisión final para una de estas soluciones son abordados más adelante.

Tabla 2. Magnitud de las causas de erosión

Causas de erosión	Transporte de sedimento (m ³ /año)	Método de obtención
Gradientes en el transporte de sedimentos		
Transporte transversal	20 400	Modelo XBEACH
Transporte longitudinal	-87 323	Analítico
Transporte eólico	2 400	Estimado
Transporte debido a las corrientes	Despreciable	Analítico
Clima		
Por incremento del NMM	1 840	Analítico
Interferencia humana		
Debido a las estructuras	0	Modelo Delft3D
Extracción	0	Estimado

Análisis de las alternativas de diseño

Dadas las características de la región es posible analizar un grupo de alternativas típicas, clasificadas en soluciones duras, blandas, no convencionales y mixtas. Dentro de las duras, ver figura 2, se encuentran:

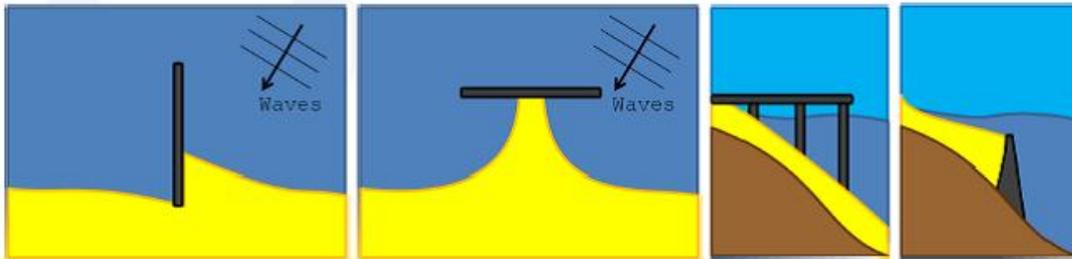
Groins, jetties y rompeolas perpendiculares a la costa. Estas estructuras perpendiculares a la costa modifican el transporte de sedimentos longitudinal. En la misma región se encuentran algunas, por ejemplo los dos groins que protegen la entrada de la marina de Paso Malo. Este tipo de estructuras puede ser construido en serie a lo largo de la costa.

Muelles. Los muelles usualmente consisten en un número de pilotes conectados unos a otros mediante un entablado en la parte superior, que puede ser usado para propósitos recreacionales. Un muelle normalmente se orienta perpendicular a la costa, como un jettie. Los pilotes están separados entre sí, provocando una disminución en el transporte de sedimentos longitudinal sin bloquearlo totalmente.

Rompeolas en aguas profundas. Estas son estructuras alargadas que se encuentran paralelas a una distancia de la costa, frecuentemente construidas con piedras. Pueden ser emergidos o sumergidos, donde la cresta puede estar por abajo o por encima del nivel estático del mar. Afecta tanto al transporte longitudinal como al transversal.

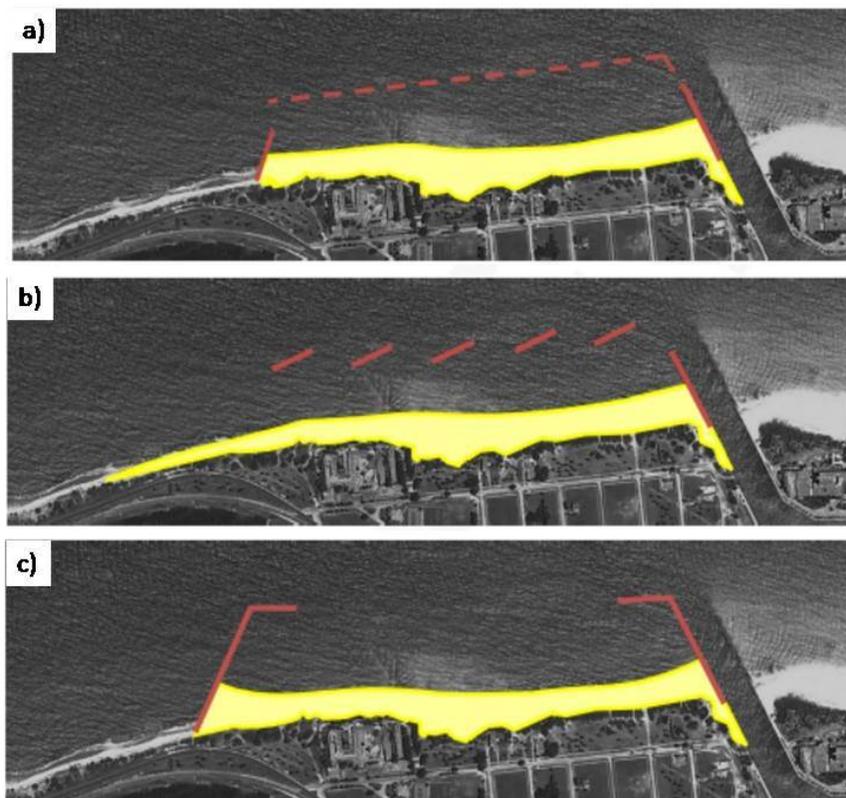
Umbrales. Un umbral es similar a un rompeolas sumergido paralelo a la costa, pero tiene la función de retener un nivel mínimo de sedimento establecido en la orilla. Adicionalmente, la creación de una playa colgada con una pendiente decrecida del nivel del lecho puede establecerse decreciendo el impacto de la ola que arriba. Afecta especialmente al transporte de sedimentos transversal.

Respecto a las soluciones blandas se debe incrementar la cantidad de arena en la parte seca de la playa y como solución no convencional se hacen eliminar las estructuras existentes dañadas. Dado el caso lo más adecuado es recurrir a las soluciones mixtas, en las cuales se combinan las propuestas anteriores.

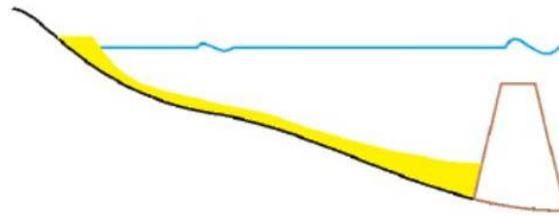


**Figura 2. Esquema de las soluciones duras:
de izquierda a derecha: groin, rompeolas, muelle y umbral**

Para comparar y evaluar el efecto de estas medidas, se establece un escenario de referencia, el cual estará referido como la Alternativa 0 (escenario con costa sin estructuras duras y con vertimiento). Las otras alternativas son playa colgada, rompeolas sumergidos con vertimiento de arena y muelles de madera en forma de L, ver figura 3. En la figura 4 se muestra un esquema del perfil de la playa colgada.



**Figura 3. Representación de las alternativas. a) Playa colgada
b) Vertimiento de arena con rompeolas sumergidos
c) Vertimiento de arena con muelles de madera en forma de L**



**Figura 4. Perfil de playa colgada:
vertimiento de arena con rompeolas sumergido**

Comparación de las alternativas de diseño

Para evaluar la funcionalidad de las diferentes alternativas se ha tomado como medida cuánta protección ofrezca contra la erosión. Así que se hace necesario determinar el transporte de sedimentos para cada uno en los perfiles medidos de la zona, ver figura 5.

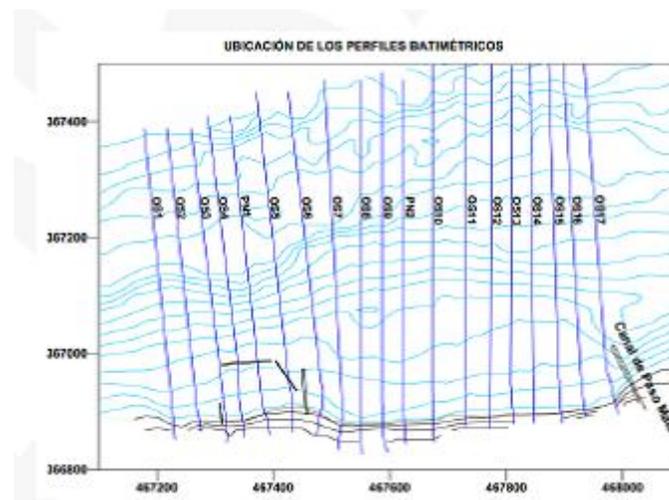


Figura 5. Perfiles del sector Oasis (cortesía de especialistas de GAMMA S.A)

Con el programa DELFT 3D (Deltares 2011) se realizó la modelación matemática de estas y se pudo determinar el transporte acumulado bajo la influencia de un frente frío, ver figura 6.

De la observación de la figura 6 se aprecia que cerca de la entrada de la marina la tasa de transporte es de mayor magnitud que en el resto de los perfiles, lo que confirma el hecho que en esa zona es escaso el ancho de la playa.

Si se toma como referencia el valor aportado por la Alternativa 0 se verá cuánto influyen las otras (tabla 3). En la fila 2 de la tabla 3 aparecen los valores del transporte de sedimentos obtenidos mediante la modelación matemática. En la fila 3 se muestra el porcentaje que cada uno permitió pasar y en la fila 4 el porcentaje de sedimento capaz de atrapar. Se observa que la más efectiva es la variante 3 de playa colgada, que es capaz de retener el 73% de la arena vertida.



Figura 6. Transporte acumulado por perfiles y alternativas

Tabla 3. Tasa de transporte de sedimentos para cada alternativa

Alternativa	Alternativa 0	Playa colgada	Rompeolas	Muelles de Madera
TS (m ³ /año)	29 900	7 900	13 725	10 635
% escape	100	27	36	46
% retención	0	73	64	54

No obstante, estas soluciones se sometieron a la técnica de Análisis de Múltiples Criterios. Este tipo de análisis permite comparar todas las alternativas otorgándole puntos a cada una según una serie de criterios establecidos, por tanto, al final cada alternativa tendrá una puntuación. Los criterios escogidos son:

Protección contra la erosión. Como resultado de las simulaciones, las alternativas pueden ser evaluadas considerando la erosión producida después de su implementación. Este es el criterio de mayor importancia.

Mantenimiento. Este criterio está estrechamente ligado al anterior, ya que una adecuada protección requiere menos mantenimiento.

Calidad espacial. El principal objetivo del trabajo es mejorar la calidad de la playa. Para mantener la calidad de la vista al océano, se prefieren soluciones que sean lo menos visibles posibles. Este criterio también considera aspectos tales como el ancho y la pendiente de la playa.

Calidad de la recreación. Para el negocio local, el objetivo es mejorar el espacio destinado a la recreación y que resulte interesante para los turistas.

Construcción. Este cubre la complejidad de los diferentes diseños y los posibles métodos de construcción, teniendo en cuenta la experiencia local y los equipos disponibles.

Medio ambiente. Para cada solución los efectos producidos al medio ambiente deben ser establecidos en términos de calidad del agua y estado del mar. Por eso, el impacto en la fase de construcción debe ser evaluado considerando la cantidad de material requerida y el transporte.

Riesgo. Este criterio abarca las incertidumbres en las predicciones. Los procesos costeros pueden ser complejos, de forma tal que para algunas alternativas los cálculos relacionados con el transporte de sedimentos pueden generar resultados inciertos.

Además, los costos para cada alternativa son evaluados de acuerdo con el costo inicial y al costo por mantenimiento.

Los criterios presentados no tienen la misma importancia, unos son más importantes que otros. Para evaluar las diferentes alternativas de la forma correcta, la puntuación de cada uno según el criterio debe multiplicarse por un factor de peso, F , después de la cual la suma de los registros para diferentes criterios debe ser considerado. Esto ofrece la puntuación final de cada alternativa. El factor de peso de cada criterio se presenta en la tabla 4. Los factores tienen un valor entre 1 (menos importante) y 4 (más importante).

Tabla 4. Criterios y factores de peso para el Análisis de Múltiples Criterios

No.	Criterio	Factor	Observación
1	Protección contra la erosión	4	La erosión es el problema principal, lo cual hace que la protección sea el criterio más importante desde un punto de vista técnico.
2	Mantenimiento	2	Debido a la cercana relación con el criterio anterior, este es importante también, pero significativamente menor.
3	Calidad espacial	4	Para los patrocinadores el propósito es tener una playa atractiva, por lo que para ellos este es el criterio de mayor importancia.
4	Recreación	3	Para los turistas tiene la máxima importancia, pero en general es menos importante que 1 y 3.
5	Construcción	3	Es muy importante para el contratista e inversor, ya que los costos pueden incrementarse por los métodos constructivos.
6	Medio Ambiente	1	La situación actual es de una calidad ambiental baja.
7	Riesgo	1	No tendrá influencia significativa en el proceso de diseño.

El resultado de este análisis se muestra en la tabla 5, mientras que en la tabla 6 se muestra una comparación sobre los costos de las variantes. En estas A0 hace referencia a Alternativa 0, A1 a la Alternativa 1, A2 a la Alternativa 2 y A3 a la Alternativa 3 según se referencia en la figura 6.

Tabla 5. Puntuación para cada alternativa

Crit.	Protección	Mantenimiento	Espacio	Recreación	Construcción	Ambiente	Riesgo	Total
P	4	2	4	3	3	1	1	18
A0	2	14	6	3	5	10	5	99
A1	8	10	8	8	2	9	4	127
A2	7	11	4	5	3	10	4	104
A3	5	10	6	9	1	8	3	105

Como se puede apreciar la solución de playa colgada es la alternativa que muestra los mejores resultados para el sector de playa Oasis, donde la alternativa de playa solo con vertimiento mostró los peores resultados. Los costos asociados con la vida útil de la alternativa de playa colgada es baja comparada con las otras. Debido a la buena protección contra la erosión que ofrece, los costos de esta alternativa son relativamente bajos y por su parte, los costos del proyecto no son extraordinariamente altos.

Tabla 6. Comparación de los costos

Alternativas	Puntuación del AMC	Costo del proyecto	Costos de mantenimiento	Costo total para 50 años
A0	99	1 810 366,43	75 000 000	76 810 366,43
A1	127	5 857 358,73	5 250 000	11 107 358,73
A2	104	11 335 733,51	5 050 000	16 385 733,51
A3	105	6 488 871,68	10 500 000	16 988 871,68

AMC significa Análisis de Múltiples Criterios

No obstante, todavía el diseño de esta variante puede reportar mejores resultados, si se es capaz de retener más la arena y disminuir el vertimiento de arena. Para ello se puede incorporar un umbral.

De esta manera, los dos objetivos principales del trabajo son alcanzados: una solución para el problema de la erosión estructural y el mejoramiento de la calidad de la playa. El ancho de la playa puede ser controlado por el umbral manteniendo el vertimiento, mientras que el rompeolas sumergido se encarga de las condiciones más desfavorables inducidas por huracanes y frentes fríos, ver figura 7.

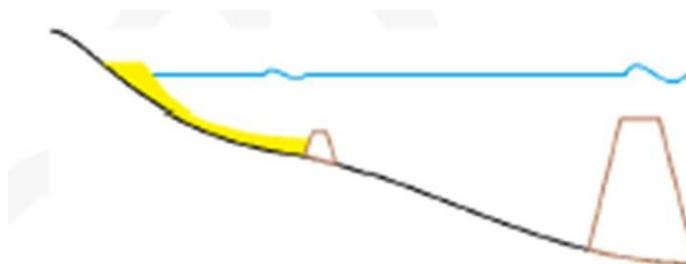


Figura 7. Perfil de playa colgada. Vertimiento de arena con rompeolas sumergido y umbral.

Esta solución ofrece una respuesta completa a los objetivos sin obstruir la vista de la playa y sin tener que efectuar un vertimiento de gran escala posteriormente. Por tanto, esta está compuesta por un vertimiento de arena, un rompeolas sumergido, un umbral ubicado cerca de la costa y una serie de groins perpendiculares a la costa en los extremos del sector de playa, ver figura 8.

Además de retener el sedimento, la colocación del umbral permite reducir el vertimiento de arena requerido inicialmente. Esta obra tendrá como altura 0,60 m, aprovechando las características de las estructuras sumergidas que se encuentran a la derecha del hotel Oasis, y

estará ubicado en la cota -3,00 m, por tanto su ubicación respecto a la línea de costa original oscila entre 75 y 100 m como se puede apreciar en la figura 8.

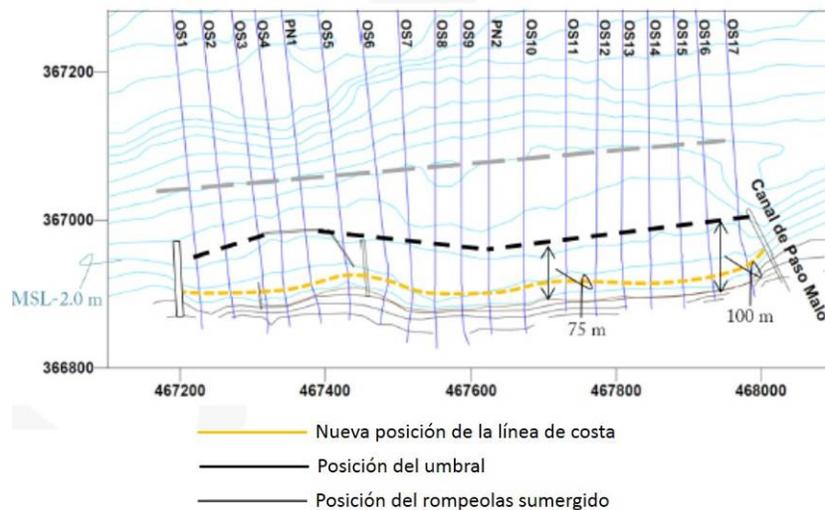


Figura 8. Posición de los elementos de la Alternativa 1

Respecto al vertimiento de arena a realizar, para lograr el nuevo perfil de equilibrio, considerando el umbral, se necesita un volumen de arena de $85 \text{ m}^3/\text{m}$. Multiplicando esto por los 800 m de longitud se obtiene una cantidad total de $68\,000 \text{ m}^3$. Sin embargo, este volumen debe ser incrementado en un 15% debido a las pérdidas en la ejecución de los sedimentos más finos, por lo que se requiere de un volumen de vertimiento de $78\,200 \text{ m}^3$ de arena.

El efecto de la solución escogida tiene una influencia elevada en la reducción del transporte de sedimentos como se puede observar en la figura 9.

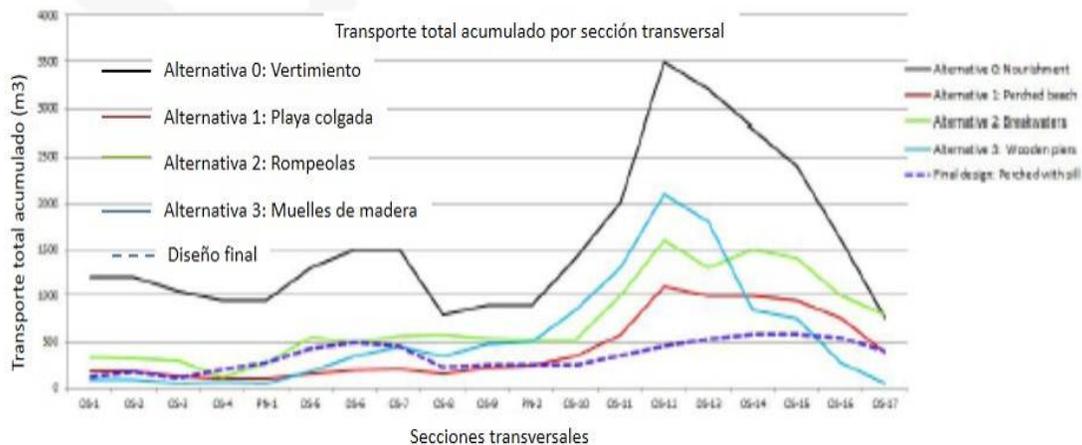


Figura 9. Transporte acumulado por perfiles y alternativas y el diseño final

Donde se observa que ha disminuido significativamente el transporte de sedimentos en las secciones transversales antes mencionadas. Ahora hay una retención del 78% respecto a la Alternativa 0 de solo vertimiento de arena, sin embargo ha habido un incremento en otras un poco más alejadas de la entrada de la marina.

Por su parte, la construcción del umbral introduce un incremento del costo inicial, debido a los materiales, la mano de obra, el equipamiento y la transportación; aunque disminuye a la mitad el asociado al vertimiento de arena. Siendo este, finalmente de \$6 970 175, 70, un 20% mayor respecto a la variante inicial.

Respecto al costo por mantenimiento, alguna pérdida de arena se espera que ocurra, que puede ser determinado mediante un programa de monitoreo. No obstante, en este caso se supone una pequeña cantidad de vertimiento de arena cada 10 años. La modelación matemática aporta más elementos en este sentido.

Con el modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos XBEACH (Roelvink et al. 2010) se modelaron en 1D dos escenarios con eventos extremos: uno relacionado con un frente frío y otro con el huracán Michelle, ver figura 10. De esta manera se puede apreciar con un caso concreto la efectividad de dicha alternativa.

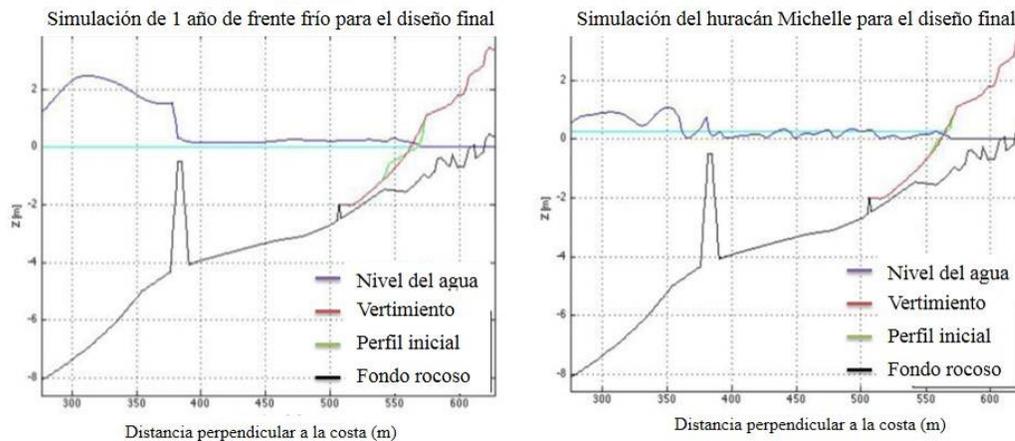


Figura 10. Modelación de la efectividad de la solución final

En ambos casos se aprecia como solo hubo transporte transversal en la línea de costa. La playa fue parcialmente erosionada y el sedimento depositado en una barra hacia el mar.

El valor acumulativo de este transporte en una sección transversal sobre el umbral arrojó cero (0) m³/m. De ahí que, si se consideran los efectos en 2D y 3D, se puede suponer un valor pequeño relacionado con el escape de sedimento.

CONCLUSIONES

- Para resolver el principal problema formulado, las soluciones posibles que encajan en el sector de playa Oasis, fueron: Solo vertimiento; Playa colgada; Vertimiento con rompeolas y Vertimiento con muelle de madera en forma de L.
- Para evaluar la funcionalidad de las diferentes alternativas se ha tomado como medida cuánta protección ofrece contra la erosión. El efecto de los diferentes diseños ha sido modelado en DELFT 3D, dando como resultado un promedio acumulado del transporte de sedimentos distribuido a lo largo de la línea de costa.
- Todas las alternativas muestran un decrecimiento significativo en el transporte de sedimentos. Sin embargo, la playa colgada, que consiste en un vertimiento de arena, un rompeolas sumergido, un umbral ubicado cerca de la costa y una serie de groins perpendiculares a la costa en los extremos del sector de playa, mostró el mejor resultado con una reducción de más de 180%.

AGRADECIMIENTOS

Se hace un especial agradecimiento al Dr.C Ernesto Tristá y a la MSc. Kenia Hernández, especialistas de la empresa Inversiones Gamma S.A del CITMA, por su valiosa contribución relacionada con los datos de la playa. También se agradece a Gosse de Boer, Laurens Poelhekke, Martijn Schlepers y Eslie Vrolijk, estudiantes de la Universidad Técnica de Delft, por el esmerado trabajo realizado que sirvió como base para este.

REFERENCIAS

- CITMA** (2009). “Information about the Oasis beach sector”, Departamento de procesos costeros, Instituto de Oceanología, Reporte Técnico-OS09, La Habana, Cuba.
- Córdova L. y Torres R.** (2016). “Tasa potencial de transporte de sedimentos del sector Oasis en playa Varadero”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 37, no. 1, pp. 82-94, ISSN 1815-591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.
- Deltares** (2011). “Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15”, Deltares, User Manual Delft3D-FLOW, Delft, The Netherlands.
- Roelvink D., Reiniers A., van Dongeren A., Van Thiel de Vries J., Lescinski J., and McCall R.** (2010). “XBeach Model Description and Manual”, Delft University of Technology, User Manual, Delft, The Netherlands.
- Torres R. y Córdova L.** (2010). “Análisis crítico sobre las metodologías para la rehabilitación de playas”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. XXXI, no. 3, pp. 60–64, ISSN 1815-591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.