

Control de erosión en tramo costero de Varadero aplicando soluciones combinadas

■ INTRODUCCIÓN

Las costas en nuestros días se están viendo sometidas a un proceso irreversible de transformación y de degradación de su entorno. El cual se acentúa debido a que en las zonas costeras es donde se concentra gran parte de la población y se desarrollan numerosas actividades económicas.

Los problemas de erosión más graves que existen en el mundo están asociados con la interferencia en el funcionamiento del sistema costero, ocasionado por el hombre con sus actuaciones, como el dragado de arena para la industria, la construcción de canales para puertos, la construcción de instalaciones turísticas sobre la duna y el represamiento y desvío de los ríos. Se identifican además en la actualidad como causas de la erosión de las playas la sobre elevación del nivel medio del mar y las modificaciones en el comportamiento de las tormentas, fenómenos asociados con los cambios climáticos globales.

Antecedentes

Cuba, en sus 3000 km de costa, cuenta con más de 300 playas que gozan de magníficas condiciones para el descanso y la recreación; las cuales están presentando problemas de erosión de forma generalizada. El caso más significativo lo constituye la reconocida playa de Varadero, debido a que es nuestro principal atractivo turístico y experimenta la pérdida de enormes volúmenes de arena.

Con el transcurso de los años se han venido realizando una serie de trabajos de recuperación que ha incluido, entre otras, la aplicación de la alimentación artificial de arena. En total se han realizado 11 campañas de vertido de arena con un volumen general de 2 842 980 m³ de arena.

El último de dichos trabajos se realizó en 1998 con un vertimiento de 1000 000 m³ de arena cuyo objetivo fue restituir las condiciones recreacionales y estéticas de la

Resumen / Abstract

Este trabajo responde a un proyecto en desarrollo denominado: "Proyecto MEGACOSTA", el cual se lleva a cabo por el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Politécnico Superior José Antonio Echeverría (CUJAE). En el desarrollo de esta investigación se tiene como fundamental premisa la obtención de una solución para contrarrestar los catastróficos efectos que ocasiona la erosión, tomando como objeto de estudio una zona costera de la playa de Varadero comprendida entre los hoteles Meliá, Las Américas y Sol Palmeras. Los resultados se obtienen aplicando la herramienta informática Sistema de Modelado Costero, (SMC), confeccionada por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria, España. Consiste en la aplicación de la solución combinada de rompeolas sumergidos y vertimientos de arena.

Palabras clave: vertimiento de arena, rompeolas sumergido, erosión de playas.

This work responds to a current development project called "MEGACOSTA Project", which is carried out by the Group of Coastal and Marine Engineering of the Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Politécnico Superior José Antonio Echeverría, (CUJAE). A fundamental premise of this research is to obtain a solution counteracting catastrophic effects caused by erosion. The case study is a coastal area in Varadero beach located along Meliá, Las Americas and Sol Palmeras hotels. The results are obtained by applying a computer model, Coastal Model System (SMC), made by the Group of Engineering (G.I.O.C.) of the University of Cantabria, Spain. It consists of the application of a combined solution of submerged breakwater and sand supply.

Keywords: sand supply, submerged breakwater, beach erosion.

Luis F. Córdova López, Dr. Ing.
Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE., email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Karel Valdés Ochoa. Ing. Hidr.
Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE, email: karel.ochoa@gcc.rem.cu

playa y reforzar el pie de las dunas para minimizar el efecto erosivo de las olas de tormenta. A pesar de que algún tiempo después de la alimentación artificial, la arena que se había acumulado en la línea de costa se redistribuyó bajo la acción del oleaje y afloró nuevamente la terraza baja limitándose su uso como zona de baño, este proyecto ha sido hasta el momento el más grande ejecutado en la Cuenca del Caribe. Juanes (1996), Izquierdo (2004).

Planteamiento del problema

El sector costero limitado por las Peñas de Bernardino y Punta Chapelín posee una longitud de 2 Km. Hacia el centro del mismo se localiza un macizo rocoso de 220 m de longitud y 3.8 m de altitud, sobre el cual se asienta el hotel Meliá Varadero. A ambos lados del mismo se extienden unas zonas de terraza baja con 1.6 – 2.5 m de altitud y 200 m de longitud aproximadamente cada una. Esta zona de estudio está sufriendo una acelerada erosión en sus playas, producto de eventos ambientales y de la acción antrópica. Esta situación afecta el uso lúdico de la playa y la estabilidad socio-económica de los hoteles aledaños a la zona, creando descontentos por parte del personal que gusta de disfrutar, tanto del baño como del área de sol.

Con la intención de alcanzar una solución socio-económica factible para la futura recuperación de la playa en esta zona, se aplicará un modelo numérico, denominado Sistema de Modelado Costero (SMC), diseñado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria, España. Este programa cuenta con una serie de herramientas y metodologías que facilitarán un estudio hidrodinámico más riguroso, así como la obtención de la solución para el caso de estudio.

Descripción del programa SMC

El Sistema de Modelado Costero (SMC) es un programa confeccionado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C. 2001) de la Universidad de Cantabria. Integra una serie de modelos numéricos, que mediante una interfaz gráfica permiten, de forma amigable, dar una aplicación práctica a las diversas soluciones que se podrían ejecutar en determinados casos de estudio de cualquier zona costera. En este caso se aplicará a una en específico del litoral cubano. El objetivo básico de este programa es proporcionar una herramienta numérica que facilite la elaboración de proyectos con mayor calidad y precisión dentro del sector de ingeniería de costas.

El SMC está estructurado por una serie de modelos numéricos los cuales se recogen en los cinco módulos fundamentales que conforman el programa: «Pre-proceso», «Corto plazo», «Medio y largo plazo», «Modelado del terreno» y «Tutor».

El módulo de «Pre-proceso» permite caracterizar y procesar información de entrada para los diferentes modelos numéricos. El módulo de «Análisis a corto plazo de playas» (Acordes) recoge las herramientas numéricas

que permiten analizar la morfodinámica de un sistema costero, en una escala espacio/temporal de corto plazo. De igual manera, dentro del módulo de «Análisis a largo plazo de playas» (Arpa) aparecen las herramientas morfodinámica que permiten modelar el sistema en una escala temporal y espacial de medio y largo plazo. El módulo de «Modelado del terreno», permite modificar los contornos del fondo (batimetría) y laterales (acantilados, diques naturales y artificiales, etc.), lo cual es fundamental para estudiar diferentes escenarios dentro de un proyecto. Finalmente, se encuentra el «Tutor de ingeniería de costas» (Tic), el cual se ejecuta dentro del SMC como apoyo teórico, conceptual y de información básica para los diferentes modelos numéricos del sistema.

CASO DE ESTUDIO

La playa de Varadero (figura 1) se encuentra ubicada en la parte norte de la península de Hicacos, esta última separa las aguas del estrecho de la Florida de los bajos fondos de la bahía de Cárdenas. Está situada en la costa noreste de Cuba a unos 130 km del este de la ciudad de La Habana, con 22 km de longitud y un ancho máximo de 500 m, para un área total de aproximadamente 1140 ha y una proyección de 70° de acimut. (Juanes 1997).



Figura 1. Ubicación geográfica de la playa de Varadero. (Izquierdo 2004).

Durante casi 40 años han existido problemas de erosión en la playa. Fenómeno que se ha venido incrementado por la acción antrópica, (extracción de arena para la construcción). Los cambios climáticos también han influido, produciendo la sobreelevación del mar, inundando así las áreas de playa seca. Se han perdido grandes volúmenes de arena y cada vez es más grave la retracción de la línea costa. Es indispensable tomar medidas con el objetivo de contrarrestar los efectos de la erosión, de lo contrario se convertirá este fenómeno en una amenaza grave para la estabilidad de los hoteles construidos aledaños a la playa.

El caso de estudio que corresponde a este trabajo lo constituye el tramo donde se encuentran los hoteles Sol

Meliá, por encontrarse sometidos a una progresiva erosión (figura 2). Este es el sector costero limitado por las Peñas de Bernardino y Punta Chapelín. Posee una longitud de 2 km y en el centro del mismo se localiza un macizo rocoso de 220 m de longitud y 3,8 m de altitud, sobre el cual se encuentra enclavado el hotel Meliá Varadero.

A ambos lados del peñón se extienden unas zonas de terrazas bajas de 1.6 – 2.5 m de altitud y 200 m de longitud aproximadamente cada una.

De esta forma se delimita la zona en dos sectores, el que se encuentra al oeste, entre el acantilado y las Peñas de Bernardino conocido actualmente como la playa Las Américas y el que se encuentra al este, entre el acantilado y Punta Chapelín conocido como la playa Sol Palmeras.



Figura 2. Vista aérea de la zona de estudio.

La playa Las Américas tiene una extensión de 600 m, a la cual tienen acceso los hoteles Meliá, Las Américas y el Meliá Varadero, mientras que la playa Sol Palmeras se extiende unos 800 m aproximadamente, interrumpida en su parte este por un pequeño saliente rocoso y siendo accesible tanto para el hotel Meliá Varadero como para el Sol Palmeras y sus bungalós. (Project group CF74. 2007).

A causa de la erosión han aflorado las terrazas bajas que conforman estas playas. Este proceso ocasiona inconformidad a los visitantes de los hoteles de la zona. Con el objetivo de plantear una solución a esta problemática se utilizarán herramientas informáticas (SMC, Hídricos), para la rehabilitación de las playas a ambos lados del Hotel Meliá Varadero.

Estudio hidrodinámico de la zona en condiciones normales.

La transformación de las olas en aguas profundas se ha realizado mediante el modelo numérico Oluca-SP, las corrientes de rotura se han evaluado en el modelo Copla-SP y el estudio de la tendencia erosiva se ha realizado por el modelo Eros-SP. Todos estos modelos numéricos forman parte del modelo Mopla (programa de

morfodinámica en playas), incluido dentro del módulo de corto plazo del SMC. El análisis consiste en evaluar las condiciones naturales actuales de la playa. Los datos introducidos al programa pertenecen a las cuatro direcciones del oleaje que ocasionan los mayores daños a la costa en condiciones normales. Se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Alturas de olas significativas para las cuatro direcciones principales

Dirección.	Altura de ola significativa en (m).	Periodo medio en (s).	Periodo pico (s)	Frecuencia media.	Frecuencia pico.
Oeste	1.33	5.77	6.94	0.173	0.144
Noreste	1.5	6.34	7.63	0.158	0.131
Noroeste	1.73	6.42	7.75	0.156	0.129
Norte	1.71	6.59	7.94	0.152	0.126

Propagación del Oleaje

Esta dirección del oleaje es más frecuente en temporadas invernales. Los vectores de las olas obtenidos en el programa están orientados desde el oeste hacia el este. Las alturas de las olas que se aproximan a la costa se encuentran entre 0.6 m y 0.8 m aproximadamente a ambos lados del macizo rocoso. En el lado oeste (playa Las Américas), llegan a alcanzar hasta 1 m de altura. En la figura 3 se muestra el gráfico de isolíneas de alturas de olas.

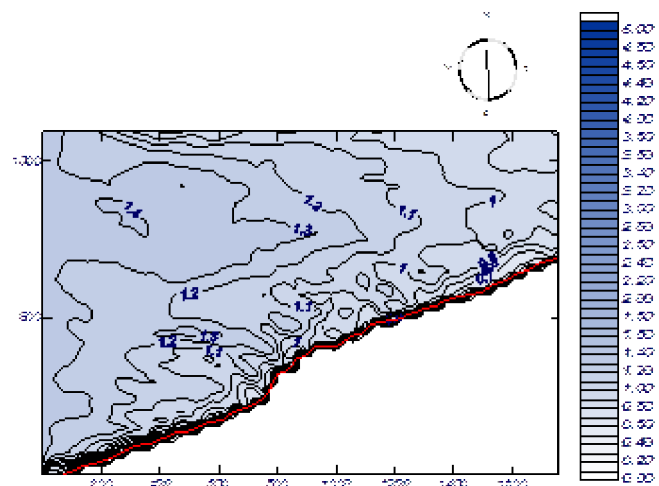


Figura 3. Altura de ola significativa (oeste)

Corrientes de Rotura.

Los vectores de corrientes obtenidos para esta dirección del oleaje son mayores en la playa Las Américas, presentan un tamaño aproximado de 0.07 m/s a 0.09 m/s. Detrás del macizo rocoso, ya en la playa Sol Palmeras los vectores que alcanzan la línea de costa se encuentran orientados desde el noroeste debido a la refracción producida por el macizo, el tamaño de los vectores se encuentra entre 0.04 m/s y 0.06 m/s. Seguidamente (figura 4) se muestra el gráfico de los vectores de corrientes.

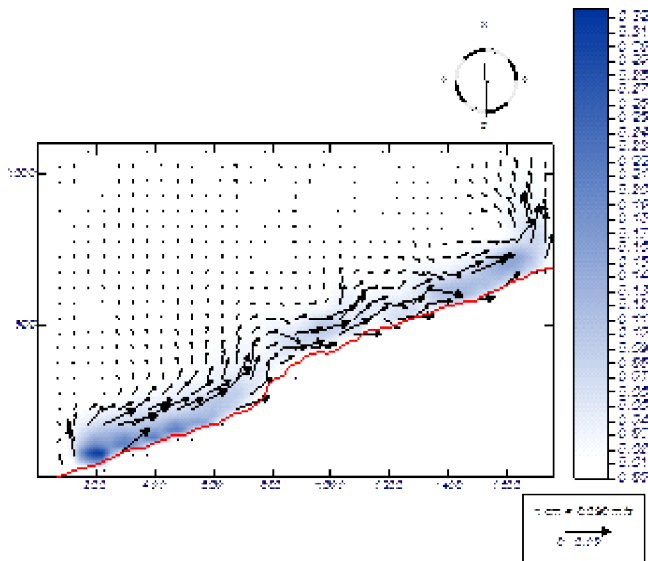


Figura 4. Gráfico de vectores de corrientes de rotura. (oeste)

Tendencia Erosiva.

El estudio de la tendencia erosiva se realizó por dos métodos, el de Soulby y el de Bailard, con el objetivo de hacer una comparación entre ellos para obtener el que es más representativo de la zona de estudio. Ambos métodos son comparados con los valores de transporte de sedimentos obtenidos: según Izquierdo (2004) (43 240 m³/año) y según Juanes (1996) (40 000 a 50 000 m³/año). En la tabla 2 se muestran los resultados tabulados.

Tabla 2. Transporte potencial de sedimentos en (m³/h/m.l) afectados por el factor de ocurrencia

Dirección.	Método.	Soulby	Bailard
Oeste (W)	- (3.29 %)	(-0.0026) – (-0.0053)	(-0.0013) – (-0.0025)
Norte (N)	+ (9.82 %)	0.041 – 0.049	0.0049 – 0.0088
Noroeste (NW)	- (4.93 %)	(-0.017) – (-0.027)	(-0.0030) – (-0.0049)
Noreste (NE)	+ (18.19 %)	0.044 – 0.065	0.0073 – 0.013
Transporte Neto		0.0654 – 0.0817	0.0079 – 0.0144

Tabla 3. Tabla Comparativa de los de resultados del transporte de sedimentos

	Transporte Neto (m³/año)	Transporte Medio (m³/año)	Juanes, (1996) (m³/año)	Izquierdo, (2004) (m³/año)
Soulby	286452 - 357846	322149	40000 – 50000	43240
Bailard	34602 - 63072	48837		

Los valores negativos de la tabla 2 corresponden a la orientación de izquierda a derecha (W y NW) y los positivos de derecha a izquierda (N y NE).

Como es notable en la tabla 3 los resultados obtenidos por el método de Bailard son los que más cercanos se encuentran a los de Juanes y a los de Izquierdo. Por tanto

será el método que se utilizará para evaluar el fenómeno de la erosión en la zona de estudio. El transporte medio al año obtenido es de 48 837 m³, valor que se encuentra dentro del intervalo planteado por Juanes (1996).

Los resultados obtenidos por el método de Bailard para la dirección oeste del oleaje demuestran que el movimiento de sedimentos concuerda con la dirección de las corrientes de rotura, siendo más acentuado en la playa las Américas donde la erosión es desde 0,08 m³/h/m.l hasta 0,10 m³/h/m.l, como es posible ver en la siguiente figura 5 sobre el transporte potencial de sedimentos.

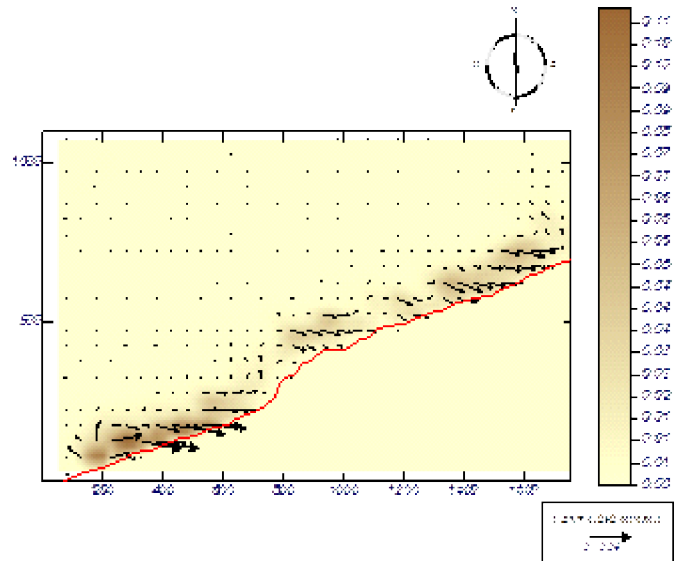


Figura 5. Vectores más magnitud. Transporte potencial en (m³/h/m.l).

Estudio hidrodinámico de la zona en condiciones extremas.

La fuente que se utilizó para evaluar las condiciones extremas fue la base de datos del Instituto de Meteorología de Cuba (tabla 4). Se modeló un frente frío con un período de retorno de un año con dirección noroeste. Los huracanes simulados presentan direcciones del norte y noreste con un período de retorno de 3 años.

Tabla 4. Tabla de datos para eventos extremos

Fenómeno Atmosférico	Dirección	Duración del evento (hr)	Periodo de R. (años)	Hs. (m)	Ts (s)	Tp (s)	Frecuencia Pico
Frente Frio	NW	20	1	4.24	8.24	8.07	0.124
Huracán	N	30	3	5.5	9.5	9.31	0.107
Huracán	NE	30	3	5.5	9.5	9.31	0.107

A continuación se muestra la tabla 5 donde se calculan los valores de la erosión producidos por los fenómenos atmosféricos, estos valores están expresados en m³ por la duración de cada evento extremo. Posteriormente se realiza una comparación de la fracción que representa lo que se puede erosionar por un evento de este tipo respecto a lo que puede erosionarse en un año.

Tabla 5. Comparación de condiciones normales y eventos extremos

Condiciones Normales		Condiciones Extremas		
Transporte Neto (m ³ /año)	Transporte Medio (m ³ /año)	F. Frío NW. (m ³) en 20 hr	Huracán N. (m ³) en 30 hr	Huracán NE. (m ³) en 30 hr
34602 - 63072	48837	2240	4725	3885
% con respecto al transporte medio		4.59	9.67	7.95

Comentarios:

Del análisis realizado anteriormente se puede decir que los oleajes predominantes que actúan en la zona durante condiciones normales son los que tienen dirección norte y noreste, los cuales propagan olas entre 0,8 m y 1,0 m aproximadamente y generan una capacidad de transporte de sedimentos entre 0,04 m³/h/m.l. y 0,08 m³/h/m.l. Por otra parte de los eventos extremos que más daño pueden ocasionar a la costa se encuentra el huracán proveniente del norte el que erosiona la playa en 0,25 m³/h/m.l. Lo que erosiona este huracán es el 9.67 % del transporte medio en el año.

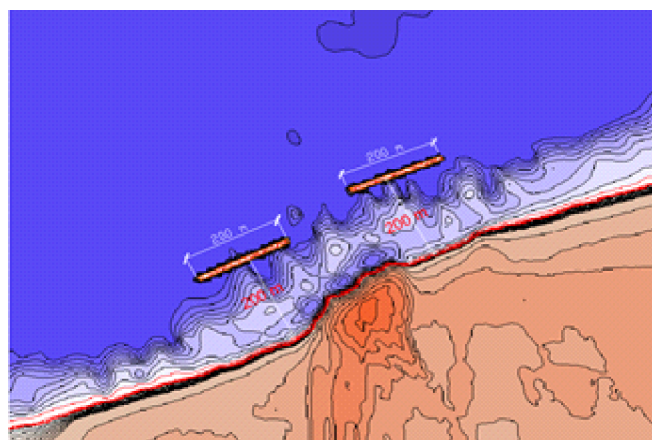
Análisis de la solución dura

Debido al alto grado de pérdida de arena por causa de la erosión, se ha decidido analizar cómo reaccionaría el sistema con la colocación de rompeolas sumergidos paralelos a la costa, de manera tal que no perjudique el atractivo turístico de la playa y que posibilite una reducción favorable de la hidrodinámica de la zona trayendo consigo disminuir la capacidad de transporte de sedimento y el retroceso gradual de la línea de costa.

Para determinar la posición del rompeolas hay que tener en cuenta que este sea efectivo en la reducción del transporte de sedimentos, que sobre la estructura rompan la mayor cantidad de olas y que sea económicamente factible.

Según estudios realizados por Córdova y Torres (2008) con el objetivo de analizar esta solución, se pudo constatar que la mayoría de las olas, así como las que más aportan sedimentos rompen aproximadamente dentro de los primeros 150 metros más cercanos a la costa, por lo que es en esta zona donde mayor transporte de sedimentos ocurre.

Por estas razones se ha decidido colocar los rompeolas sumergidos a la distancia de 200 metros de la línea de costa. De colocarlos en profundidades superiores se incrementaría el costo de los mismos. Para ambos lados del macizo la distancia y profundidad de los rompeolas será de 200 m y 5 m, respecto al nivel medio del mar, para la playa de Las Américas, y para la playa de Sol Palmeras será de 200 m y 4.32 m, respecto al nivel medio del mar (figura 6 y tabla 6).

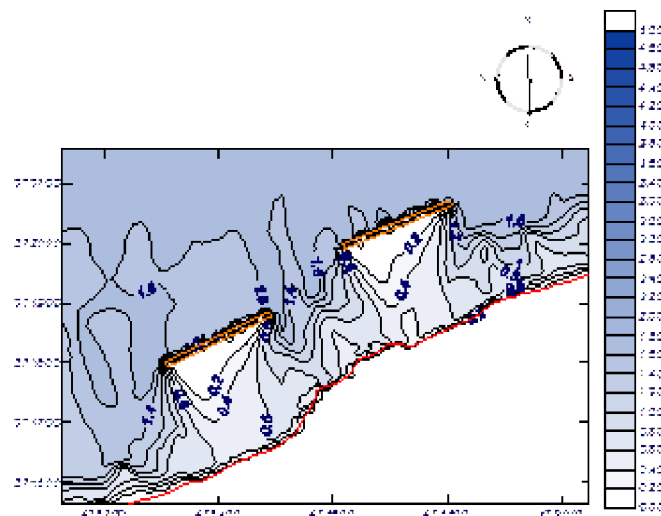
**Figura 6.** Ubicación en planta de los rompeolas.**Tabla 6.** Datos de los rompeolas

Rompeolas	Área (m ²)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Número de elementos	Profundidad respecto (NMM) (m)	Ancho Corona (m)
Las Américas	66.4	200	13 280	9 758	5.00	3
Sol Palmeras	48.5	200	9 700	7 128	4.32	3

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA SOLUCIÓN DURA EN CONDICIONES NORMALES

Propagación del Oleaje

Es notable en el gráfico de la figura 7 que seguidamente se muestra cómo la presencia de los rompeolas no permite la propagación de las olas hacia la costa. Este efecto repercute beneficiosamente en la playa, ya que disminuye la altura de las olas en un 50 % aproximadamente.

**Figura 7.** Gráfico de altura de ola (norte)

La tabla 7 refleja la comparación que se estableció entre los valores de tendencia erosiva obtenidos mediante el Mopla bajo la simulación con y sin rompeolas, y los valores

de transporte de material que ocurre por año planteados por Juanes (1996) e Izquierdo (2004). Se debe considerar que la longitud del perfil erosionado sin rompeolas es de 500 m y con rompeolas es de 200 m, delimitada por la ubicación de dichas estructuras.

Tabla 7. *Tabla comparativa de los resultados del transporte de*

	Transporte Neto (m ³ /año)	Transporte Medio (m ³ /año)	Juanes,(1996) (m ³ /año)	Izquierdo,(2004) (m ³ /año)
Sin RO	34 602 – 63 072	48 837	40 000 – 50 000	43 240
Con RO	2 628 – 23 301	12 965		

Comentarios:

Según los resultados de la tabla antes expuesta la presencia de los rompeolas posibilita una reducción de 73 % con respecto al transporte medio que existía antes de la ubicación de dichas estructuras. Esta cifra de reducción representa un logro significativo beneficioso para la playa, ya que con la disminución del transporte medio también se logra disminuir los valores de retroceso de la línea de costa, luego esto disminuye considerablemente el costo de los mantenimientos de un futuro vertimiento de arena por la reducción de los volúmenes de arena que trae como consecuencia.

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LOS

■ ROMPEOLAS EN CONDICIONES EXTREMAS

Los resultados obtenidos en la simulación de la playa con rompeolas bajo la acción de eventos extremos, como es el caso de un frente frío proveniente del noroeste con olas de 4.24 m de altura y un período pico de 8.07 segundos, de un huracán proveniente del norte y otro del noreste con alturas de olas de 5.5 m y periodos pico de 9.31 segundos, demuestran que la presencia de los rompeolas brindan gran protección a la playa, ya que evitan que a la costa lleguen estas altas olas que se provocan. El transporte de sedimentos, el cual tiende a incrementarse durante la acción de estos eventos, disminuye considerablemente posibilitando mayor longevidad para la playa.

Seguidamente (tabla 8) se expresan las fracciones que representan la cantidad de material que es desplazado durante los eventos extremos a lo que es desplazado en todo un año, (transporte medio del año). Estas fracciones corresponden a la condición: con rompeolas.

■ Análisis de los resultados

Como se ha podido demostrar en las tablas anteriores, las playas de Las Américas y de Sol Palmeras con la presencia de rompeolas sumergidos experimentan una notable mejoría en cuanto a pérdida de material. El tanto por ciento de reducción puede llegar a alcanzar hasta el 40 % en condiciones normales y en condiciones más des-

favorables se logra alcanzar hasta un 60 % de disminución.

El transporte medio de sedimentos se logró disminuir de 48 837 m³ al año a 12 965 m³ al año, representando un porcentaje de disminución de 73 %. Ante el azote de eventos extremos se experimentó una mejoría de 89 % y 82 % en caso de los huracanes provenientes del norte y noreste respectivamente, los cuales se han tomado como referencia debido a ser los fenómenos que más daño provocan a la costa durante su duración; sin dejar de prestarle atención a los frentes fríos, los cuales no provocan las grandes transformaciones que ocasionan los huracanes durante su actuación, pero al tener altos periodos de retorno también generan serios daños con más frecuencia.

Tabla 8. *Fracciones que representan los eventos extremos respecto al transporte medio del año (con rompeolas)*

Con Rompeolas				
Condiciones Normales		Condiciones Extremas		
Transporte Neto (m ³ /año)	Transporte Medio (m ³ /año)	F. Frío NW. (m ³) en 20 hr	Huracán N. (m ³) en 30 hr	Huracán NE. (m ³) en 30 hr
2 628 – 23 301	12 965	460	510	690
% con respecto al transporte medio		3.55	3.93	5.32

Los rompeolas protegen la costa, evitando que se propaguen olas mayores de 1 m después de estas estructuras; este beneficio es considerablemente mayor si se trata de protección contra eventos meteorológicos severos, lo que garantiza la extensión de la vida útil de las playas y con ello aminorar los volúmenes de mantenimiento y sus altos costos.

■ ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN COMBINADA

Dimensionamiento del vertimiento de arena

Debido a que las dos playas en estudio presentan diferentes valores de retroceso de la línea de costa, el dimensionamiento se realizará diferente, reflejando las condiciones específicas de cada playa.

Aspectos técnicos a considerar:

1. La línea de costa debe mantenerse en 30 metros como mínimo después de 5 años realizado el vertimiento inicial.

2. En las soluciones blandas debe preverse un plan de mantenimiento con un período de retorno de 5 años. Y una vida útil de 50 años.

3. Las arenas del suministro deben tener características similares a las arenas nativas.

Playa de Las Américas.

- El retroceso de la línea de costa se estimó en 0.4 m por año, según la proporción de los valores del transporte medio de sedimentos obtenidos con los rompeolas.
- La longitud necesaria para que la playa mantenga 30 m de playa seca a los 5 años siguiendo el parámetro de retroceso de la línea de costa es de 32 m. Por criterios constructivos y de pendiente se ha decidido que el avance de la playa será de 35 m.
- La altura de la berma será de 1.5 m y el ancho del frente de playa de 35 m lo que establece una pendiente de la playa de 4 %.
- Se utilizará la cuenca de Varahicacos como fuente para el material de préstamo, la misma cuenta con un diámetro medio de arena D_{50} de 0.44 mm. Esta decisión fue tomada según los resultados obtenidos por Vidal (2010) en la comparación entre el diámetro de Cuenca Mono con 0.34 mm y Cuenca Varahicacos.
- La profundidad de cierre será de 4.44 m.
- La longitud de la playa será de 550 m, medida desde el macizo rocoso hacia el oeste. Esta distancia se extiende unos metros más allá del punto crítico el cual se localiza a 470 m del macizo, según Córdova y Torres (2008).

Playa de Sol Palmeras.

- El retroceso de la línea de costa se estimó en 0.85 m por año, según la proporción de los valores del transporte medio de sedimentos obtenidos con los rompeolas.
- La longitud necesaria para que la playa mantenga 30 m de playa seca a los 5 años siguiendo el parámetro de retroceso de la línea de costa es de 34.25 m. Por criterios constructivos y de pendiente se ha decidido que el avance de la playa será de 45 m.
- La altura de la berma será de 2 m y el ancho del frente de playa de 45 m lo que establece una pendiente de la playa de 4 %.
- Se utilizará La Cuenca de Varahicacos como fuente para el material de préstamo, la misma cuenta con un diámetro medio de arena D_{50} de 0.44 mm. Esta decisión fue tomada según los resultados obtenidos por Vidal (2010) en la comparación entre el diámetro de Cuenca Mono con 0.34 mm y Cuenca Varahicacos.
- La profundidad de cierre será de 3.74 m.
- La longitud de la playa será de 500 m, medida desde el macizo rocoso hacia el este. Esta distancia se extiende unos metros más allá del punto crítico el cual se localiza a 350 m del macizo, según Córdova y Torres (2008).

En la tabla 9 se muestra la determinación de volúmenes para ambas playas.

Seguidamente en la tabla 10 se encuentran los volúmenes totales de mantenimiento para ambas playas. Se ha tenido en cuenta una vida útil de la obra de 50 años y los 10 mantenimientos que se han planificado para esta vida útil, los cuales se ejecutarán cada 5 años como anteriormente se ha especificado.

Tabla 9. Tabla de determinación del volumen del vertimiento

	Playa Las Américas	Playa Sol Palmeras
Volumen con 30 m de avance	70 551.9 m ³	51 495.6 m ³
Volumen con 35 m de avance	80 151.8 m ³	-
Volumen con 45 m de avance	-	73 755.8 m ³
Volumen erosionado	9 599.9 m ³	22 260.2 m ³
40 % del Volumen erosionado	3 839.96 m ³	8 904.08 m ³
Volumen de mantenimiento	13 440 m ³	31 160 m ³
Volumen total del vertimiento inicial.	112 210 m ³	103 260 m ³

Tabla 10. Tabla de determinación del volumen total de extracción

	Playa Las Américas	Playa Sol Palmeras
Vertimiento Inicial	112 210 m ³	103 260 m ³
Volumen de un mantenimiento	13 440 m ³	31 160 m ³
Volumen de 10 mantenimientos	134 400 m ³	311 600 m ³
Volumen total de extracción	246 610 m ³	414 860 m ³

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA SOLUCIÓN COMBINADA

Condiciones Normales

Como es notable en la tabla 11 que a continuación se expone, los valores que se obtienen con la solución combinada son mucho menores que sin rompeolas aunque son mayores que los valores de la solución dura. Esto se debe a que al transformarse las condiciones del ecosistema marino con un vertimiento artificial de arena la naturaleza tiende a equilibrar el sistema y tratar de llevar las condiciones actuales a las originales antes del vertimiento; por lo que en los primeros momentos de la regeneración artificial el transporte de sedimentos se incrementa en valor y magnitud y pasado algún tiempo después tiende a recuperar sus valores habituales. El porcentaje de reducción entre la condición sin rompeolas y la condición con rompeolas y vertido de arena es de 67 %.

Condiciones Extremas

Se muestra la tabla 12, donde se calcula el tanto por ciento que representan los daños ocasionados en cuanto a erosión por los eventos extremos respecto al transporte medio del año, calculados para la variante de los rompeolas y el vertimiento artificial de arena.

Tabla 12. Tabla comparativa de los resultados del transporte de sedimentos

Solución combinada				
Condiciones Normales		Condiciones Extremas		
Transporte Neto (m ³ /año)	Transporte Medio (m ³ /año)	F. Frío NW. (m ³) en 20 hr	Huracán N. (m ³) en 30 hr	Huracán NE. (m ³) en 30 hr
10 337 – 21 725	16 031	560	600	600
% con respecto al transporte medio		3.5	3.7	3.7

Comentarios:

De los resultados antes expuestos se puede decir que los huracanes son los que más daños podrían ocasionar a la estabilidad de la playa los cuales representan el 3,7 % del transporte medio en el año, las magnitudes de la erosión provocada por ellos alcanzaría los 0,20 (m³/h/m.l.), recordando siempre que su efecto sería mucho mayor de no existir los rompeolas. La fracción de reducción de la solución combinada con respecto a la condición sin rompeolas es de 40 % aproximadamente.

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un intenso trabajo de estudio y profundización en el uso del Sistema de Modelado Costero (SMC) con satisfactorios resultados.
- Las direcciones del oleaje que más inciden sobre la zona en condiciones normales son la direcciones del norte y noreste con alturas de ola entre 0.8 m y 1 m aproximadamente y generan una capacidad de transporte de sedimentos entre 0.04 m³/h/m.l. y 0.08 m³/h/m.l.
- El transporte medio de sedimentos se estimó en 48 837 m³ al año.
- De los eventos extremos que más daño puede ocasionar a la costa se encuentra el huracán proveniente del norte el que erosiona la playa en 0.25 m³/h/m.l.
- Con la solución combinada se logró disminuir los valores de altura de ola en un 50 % aproximadamente.

- El valor final del transporte medio al año se logró disminuir de 48837 m³/año a 16031 m³/año, representando esto una reducción del 63 %.
- El efecto más notable de los rompeolas es frente a la acción de eventos meteorológicos severos.

RECOMENDACIONES

- Elaborar un detallado presupuesto del proyecto.
- Realizar un seguimiento trimestral del vertimiento para hacer los ajustes necesarios al plan de mantenimiento.
- Ejecutar series de mediciones de los perfiles antes y después del paso de un evento meteorológico extremo para conocer la respuesta del mismo y de esta forma ajustar los volúmenes de suministros durante los mantenimientos en el período de vida útil de la obra.
- Ensayar la modelación de los rompeolas en un modelo físico para garantizar mayor precisión.

REFERENCIAS

- Córdova, L. y Torres, R.** (2008). «Estudio y cuantificación de la erosión en el tramo Meliá, Varadero. Propuestas de solución». C. Habana. Informe técnico, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.
- G.I.O.C (2001).** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. «Manual de usuario del SMC (Sistema de Modelado Costero versión 3.0)». Universidad de Cantabria. España.
- Izquierdo, M.** (2004). «Estudio de la dinámica litoral en la playa de Varadero». Cuba. Santander, Tesis para optar por el grado de Máster en Ciencias, Universidad de Cantabria. España.
- Juanes, J. L.** (1996). «La erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control». Tesis de doctorado, Instituto de Oceanología de Cuba, La Habana, Cuba.
- Project group CF74.** (2007). «Coastal erosion at Varadero beach». C. Habana, Proyecto Maestro de Ingeniería, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.
- Vidal, D.** (2010). «Aplicación del Sistema de Modelado Costero a un tramo crítico de la playa de Varadero de Matanzas, Cuba. Propuesta de solución». Trabajo de Diploma, CIH, CUJAE, La Habana.

Recibido: Agosto del 2011
Aprobado: Septiembre del 2011