

Aplicación del sistema de modelado costero a un tramo crítico de la playa de Varadero: propuesta de solución

■ INTRODUCCIÓN

Cuba, al ser una isla con una excelente cualidad natural, está formada por más de 3000 km de costas y más de 300 playas, posee una indudable capacidad para el desarrollo turístico y Varadero con más de 20 kilómetros de playa de finas arenas blancas y un cristalino mar azul es una clara evidencia de ello, además de tener una privilegiada posición en el área del Caribe.

Varadero siempre ha presentado diversos problemas de erosión en determinadas partes de su costa norte. Por años se han tratado de buscar y aplicar diversas soluciones pero este inconveniente en la actualidad sigue vigente. Como se sabe uno de los sistemas más frágiles de la superficie terrestre lo constituye el litoral, fundamentalmente en sus sectores acumulativos (las playas). Las regeneraciones artificiales, como los vertimientos de arena, representan una de las vías para su enriquecimiento sedimentario y estabilidad temporal, propicias para su protección medioambiental y desarrollo sustentable.

Planteamiento del problema

Haciendo un poco de historia desde finales de la década del 70 ya se reportaba una tendencia erosiva irreversible en esta playa, con un promedio de pérdida de arena de hasta 50 000 m³/año (Juanes, 1996)¹¹.

Se pueden encontrar como principales causas, la extracción de la plataforma submarina, entre 1968 y 1978 de unos 990 000 m³ de arena para actividades constructivas; el establecimiento inadecuado de instalaciones sobre las dunas, que a su vez favorece la acción erosiva del oleaje; la proyección hacia el mar profundo de los flujos sedimentarios del litoral y el ascenso del nivel medio del mar, que afecta a gran parte de las playas del mundo.

Resumen / Abstract

Es sabido que tanto las regeneraciones artificiales, como vertimientos de arena, representan una de las vías para el enriquecimiento sedimentario y estabilidad temporal de playas, propicias para su protección medioambiental y desarrollo sustentable. Como en Varadero siempre se han presentado problemas con la erosión en determinadas zonas de su costa Norte, se ha decidido en este trabajo realizar un estudio detallado en una de estas zonas y plantear una posible solución. Se han trazado objetivos con el propósito de obtener una respuesta a la problemática planteada. El objetivo fundamental es la aplicación del Sistema de Modelado Costero (SMC) para el estudio de una alternativa y a su vez dar solución al problema de erosión.

Palabras clave: costas, modelos matemáticos, erosión, rehabilitación de playas

It is well known that artificial regeneration such as sand dumping represents one of the ways for sedimentary enrichment and temporal stability of beaches, conducive to environmental protection and sustainable development. Because in Varadero there have been always problems with erosion in certain parts of its northern coast, it was decided in this work to make a detailed study of these areas in order to pose a possible solution. A number of objectives have been stated to get an answer to the issues raised. The main objective is the implementation of the "Coastal Modeling System" (SMC) for the study of an alternative and in turn solving the erosion problem.

Keywords: coastline, mathematical model, erosion, beach rehabilitation

En años anteriores se han llevado a cabo proyectos para la regeneración de esta playa. Por la importancia que tuvo, cabe mencionar el vertimiento realizado en el verano de 1998 de 1 087 835 m³ de arena en alrededor de 12 Km de playa y el posterior mantenimiento desarrollado en el 2007.

Después de haberse realizado estos vertimientos se pudo observar cómo fue mejorando el ambiente de la playa. No obstante, poco tiempo después en la zona comprendida entre Punta Chapelín y las Peñas de Bernardino comenzaron a surgir de nuevo los problemas de erosión.

Debido a estas causas y problemas planteados y apoyándonos en el Software Sistema de Modelado Costero (SMC) creado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria y en sus herramientas, este trabajo se centrará en plantear una posible solución para resolver este problema relacionado con la erosión, específicamente en la zona antes mencionada, donde están ubicados los Hoteles Meliá Las Américas, Meliá Varadero y Sol Palmeras.

Objetivo general

Aplicación del Sistema de Modelado Costero (SMC) para el estudio de una alternativa que dé solución al problema de erosión en un tramo de la playa de Varadero, Matanzas Cuba.

Objetivos específicos

1. Profundizar en las características del SMC para su posterior utilización.
2. Obtención y análisis de la información de clima marítimo, batimetría, sedimentología, causas de erosión y medidas que se han tomado en el tramo de estudio de la playa de Varadero.
3. Aplicación a un caso real en la Playa de Varadero del SMC

■ CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SMC

El Sistema de Modelado Costero (SMC) es una herramienta informática que incluye un conjunto de metodologías y modelos numéricos, que nos permiten estudiar los procesos costeros y valorar las variaciones que sufre una playa debido a eventos naturales o actuaciones humanas en la costa. Frente a un problema en la costa, la metodología nos permite definir qué estudios se deben llevar a cabo, qué escalas espaciales y temporales se deben analizar, qué herramientas numéricas se deben aplicar y los datos de entrada necesarios para el análisis. Con el SMC se llevan a cabo estudios de casos reales de proyectos de ingeniería de costas, permitiendo el análisis de actuaciones en las diferentes etapas de un estudio: diagnóstico, prediseño, diseño e impacto ambiental.

El SMC es una interfaz gráfica que integra una serie de modelos numéricos con el objetivo fundamental de proporcionar una herramienta numérica en el campo de la ingeniería de costa. Es un instrumento con una amplia variedad de tareas, en las que se pueden encontrar:

- * Crear o abrir un proyecto de trabajo asociado a una zona de estudio en la costa. La información concebida bajo el estudio es almacenada de manera estructurada en directorios que siguen un rango. Estos proyectos se pueden crear a partir de batimetrías o imágenes de la zona de estudio.

- * Además en el SMC se ejecutan distintos modelos numéricos, que permiten llevar a cabo un análisis a corto, medio y largo plazo de la zona de estudio.

El SMC está compuesto por cinco módulos fundamentales (figura 1):

- * Pre-Proceso
- * Corto plazo
- * Medio y largo plazo
- * Modelado del terreno
- * Tutor



Figura 1. Esquema analítico del SMC

■ ESTUDIO DE CASO

Varadero es una ciudad de Cuba, situada en la península de Hicacos, provincia Matanzas a 130 Km al este de La Habana. Al Noreste de esta se encuentra Punta Hicacos que es el lugar más al Norte de Cuba.

Con sus más de 20 Km de playas de arena y un área de 32 Km², Varadero es un importante polo turístico. La playa se extiende a lo largo de la estrecha península (entre 700 y 1 200 m de ancho). Sus 22 Km de playa se caracterizan por tener una franja de fina arena blanca y un suave descenso de su plataforma hacia el mar.

En Varadero hay serios problemas con la erosión de algunas de sus playas, debido a la acción antrópica entre otras causas según estudios efectuados. Se ha extraído arena para la construcción, el clima ha jugado también su papel influyendo en el oleaje. Es por eso que se debe tener mucho cuidado y estudiar bien cada zona ya que se ha ido modificando la línea de costa más rápidamente con el transcurrir de los años. Esto puede traer graves consecuencias e influir directamente en los hoteles construidos en la parte cercana a la playa.

La zona de estudio es la que se encuentra ubicada entre las Peñas de Bernardino y Punta Chapelín en Varadero (figura 2), ya que en años anteriores se han realizado diversos vertimientos de arena pero el problema de erosión sigue persistiendo.

La longitud del sector costero donde se encuentra ubicada la zona de estudio es aproximadamente de 2 Km y en su centro queda situado un macizo rocoso de 250 m de longitud y 3.8 m de altura. A ambos lados de este macizo hay zonas de terraza baja con longitudes de 200 m y de 1.6 m a 2.5 m de altitud aproximadamente. En la zona Este del peñón se encuentra la playa Sol Palmera de 900 m, donde está ubicado el Hotel con el mismo nombre y en el Oeste se localiza la playa Las Américas de 600 m, nombre que recibe debido al Hotel allí situado. A estas dos playas tiene acceso el Hotel Meliá Varadero ya que este queda construido sobre el macizo (figura 2).

Para buscarle una posible solución a esta problemática, existen soluciones ingenieras las cuales consisten de manera general en soluciones blandas (vertimientos de arena), soluciones duras (rompeolas paralelos a la costa, espigones) y soluciones combinadas. Todas permiten recuperar o mantener un área de playa. La aplicación del software SMC será la herramienta mediante la cual se diseñará la alternativa de solución.



Figura 2. Zona de estudio (Google Earth, 2009)

Propuestas de la alternativa

Se propone como alternativa la solución blanda. Esta solución ya se ha aplicado anteriormente en esta zona y en otras partes de Varadero desde 1987. No se tiene en cuenta la aplicación de soluciones duras ya que son mucho más destructivas para el medio ambiente, evitando el transporte de sedimentos y variando de esta forma el ecosistema de la zona.

Esta solución blanda o suministro de arena resulta ser la solución más efectiva tanto para la defensa de las instalaciones turísticas como para contrarrestar el déficit de los ingresos naturales. En el caso de posibles efectos negativos, éstos son de corta duración, y con éste las áreas aledañas son también beneficiadas. No se altera el carácter natural de la costa, desde el punto de vista recreacional el suministro es más atractivo ya que al aumentar rápidamente el ancho de la playa se incrementan sus potencialidades turísticas. (Peraza y Matamoros, 2004)¹⁴

ESTUDIO HIDRODINÁMICO

Se realizó un estudio hidrodinámico, analizando la tendencia erosiva y la propagación de oleaje de la zona en estado natural (sin relleno) y utilizando las alturas de ola para condiciones normales del clima, teniendo en cuenta las cuatro direcciones del viento que inciden en esta zona fundamentalmente.

Resultados de la propagación de oleaje

Tabla 1. Propagación de oleaje

Altura de olas (m)	Las Américas	Sol Palmeras
Oeste	1,2 – 1,0	1,1 – 0,5
Noroeste	1,6 – 1,0	1,4 – 0,6
Norte	1,7 – 1,0	1,7 – 1,0
Noreste	1,3 – 0,6	1,3 – 0,6

Resultados de los vectores de corrientes

Los vectores de corrientes se comportaron de forma semejante en cada una de las direcciones del oleaje.

- * Oeste 0,13 m/s con dirección NE
- * Noroeste 0,13 m/s con dirección NE
- * Norte 0,11 m/s con dirección O
- * Noreste 0,13 m/s con dirección SO

Tendencia erosiva

Tabla 2. Transporte potencial de sedimento

	Bailard	Soulsby
Oeste (-) (m ³ /h/m.l)	0,003-0,004	0,009-0,011
Noroeste (-) (m ³ /h/m.l)	0,006-0,008	0,024-0,030
Norte (+) (m ³ /h/m.l)	0,009-0,014	0,060-0,074
Noreste (+) (m ³ /h/m.l)	0,007-0,016	0,050-0,080
Trpte smto neto (m ³ /h/m.l)	0,007-0,018	0,077-0,113
Trpte smto año (m ³ /año)	30660-78840	337260-494940
Trpte smto medio año (m ³ /año)	54 750	416 100

Comparación de los resultados

Como se puede apreciar, es obvia la diferencia entre los resultados de un método con respecto al otro, lo que lleva a un análisis y una detallada comparación de los resultados obtenidos por otros autores con los mostrados anteriormente. Según Juanes (1996)¹¹ la regresión de la línea de costa en Varadero es de 1,2 m/año con un transporte de sedimentos en todo el litoral de 40 000 a 50 000 m³/año y según Izquierdo (2004)¹⁰ la regresión de la línea de costa es de 4,18 m/año y el transporte litoral es hacia el Suroeste con un valor de 43 240 m³/año.

ESTUDIO HIDRODINÁMICO

Para el análisis ante eventos extremos se tomaran datos de Huracanes con período de retorno de 3 a 4 años y frentes fríos con período de retorno de 1 año.

Debido a que los huracanes y frentes fríos no afectan a la península directamente en todas las direcciones estudiadas anteriormente, se realizará el estudio hidrodinámico utilizando las direcciones de Norte-Noroeste para Frentes fríos y Norte-Noreste para Huracanes.

Resultados de la propagación del oleaje y de corrientes del huracán

Norte-Noreste

- * Altura de ola significativa $H_s = 5,33\text{m}$
- * Período significativo $T_s = 9,33\text{ s}$
- * Duración del evento 30 horas.

Las alturas de olas cercanas a la línea de costa están en el rango de 3,0 a 0,5 m en la playa de Sol Palmeras. Mientras en Las Américas las alturas de olas están en el rango de los 2,7 a 0,4 m. Los vectores de corrientes van del Este al Oeste de forma lineal, con valores en zonas de la orilla mayores que 0,22 m/s.

Resultados de la propagación del oleaje y de corrientes del frente frío

Norte-Noroeste

- * Altura de ola significativa $H_s = 4,67\text{m}$
- * Período significativo $T_s = 8,67\text{ s}$
- * Duración del evento 24 horas.

Las alturas de olas que llegan cercanas a la costa de las Américas son de 2,8 a 1,5 m y en Sol Palmeras de 2,2 a 0,5 m de alturas. Las corrientes más fuertes se evidencian en la playa de Sol Palmeras, con vectores de 0,20 m/s y formando remolinos de este lado del macizo.

Tendencia erosiva

Tabla3. Transporte potencial de sedimento

Dirección	Bailard	Volumen Total (m ³)
Norte-Noreste (m ³ /h/m.l)	0,32-0,42	7 770
Norte-Noroeste (m ³ /h/m.l)	0,26-0,48	6 216

Este volumen se obtiene multiplicando el promedio del transporte de sedimento por 700 m perpendiculares a la costa, siendo este el ancho aproximado del transporte de sedimento, y por la duración de cada evento.

Dimensionamiento de la variante

Para el dimensionamiento de la variante se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- * Ambientales
- * Funcionales
- * Técnicos, entre otros

Además de los resultados obtenidos en el estudio hidrodinámico tanto para condiciones normales del clima como para condiciones extremas.

Se fija como ancho de la berma 50 m, con una pendiente del 4% en ambas playas y una altura de 2 m. El relleno se realizará a todo lo largo de cada playa.

Zona de préstamo

Las zonas de préstamos que se han utilizado previamente en la recuperación de playas en Varadero son Cuenca Varahicacos y Cuenca Mono, debido a que la arena de estas cuencas es blanca y de clasificación media, semejante a la de Varadero.

Para la alternativa de solución propuesta se tendrán en cuenta dos variantes. Cada una utilizando una zona de préstamo diferente.

Tabla 4. Zonas de préstamo

Cuenca	Diámetro del sedimento (mm)
Mono	0,34
Varahicacos	0,44

Tendencia erosiva

El objetivo de este análisis es para determinar el diámetro que se utilizará en el vertimiento.

Resultados del transporte de sedimentos ante condiciones normales

El proceso erosivo tiende a ser más rápido cada vez que ocurre un vertimiento, ya que se cambia la morfología

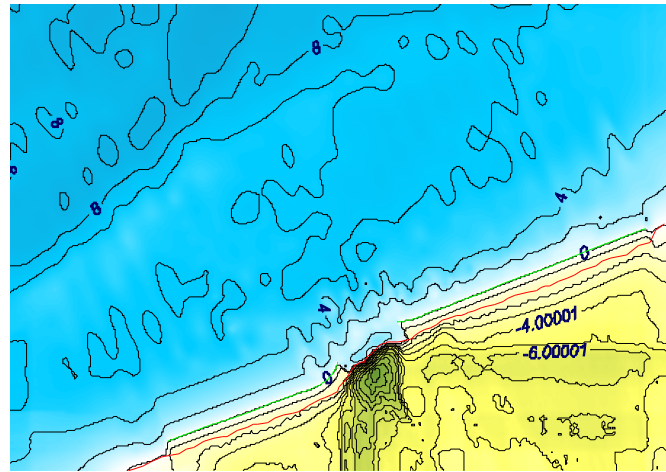


Figura 3. Batimetría de la zona de estudio ya regenerada

del sistema y la naturaleza llevará el entorno a las condiciones normales, siempre que se utilice la arena de préstamo semejante a la nativa.

Tabla5. Transporte potencial de sedimento

	D ₅₀ = 0,34 mm	D ₅₀ = 0,44 mm
Oeste (-) (m ³ /h/m.l)	0,002-0,003	0,0007-0,002
Noroeste (-) (m ³ /h/m.l)	0,003-0,005	0,002-0,006
Norte (+) (m ³ /h/m.l)	0,006-0,009	0,003-0,009
Noreste (+) (m ³ /h/m.l)	0,009-0,022	0,005-0,018
Trpte smto neto (m ³ /h/m.l)	0,010-0,023	0,005-0,019
Trpte smto año (m ³ /año)	43800-100740	21900-83220
Trpte smto medio Año (m ³ /año)	72 270	52 560

El diámetro de 0,34 mm a pesar de ser similar al original evidencia una mayor erosión, comparada con 54 750 m³/año que fue la obtenida anteriormente. Sin embargo para un diámetro de 0,44 mm que es mayor que los antes mencionados disminuye la erosión. Debido a esto y a que el resultado de transporte de sedimento medio en el año para este diámetro es semejante al obtenido inicialmente se decide hacer el relleno de la playa con este.

Resultados del transporte de sedimentos ante eventos extremos

De igual forma comparando estos resultados con los obtenidos anteriormente se puede apreciar que tanto para un huracán como para un frente frío el volumen total disminuyó considerablemente.

Además puede comprobarse cómo con el diámetro seleccionado se incrementa la capacidad de defensa de costa de la zona, ya que ante eventos extremos la tasa de erosión es menor.

Tabla 6. Transporte potencial de sedimento

Dirección	Tpte. Potencial (m ³ /h/m.l)	Volumen Total (m ³)
Norte-Noreste	0,12-0,30	945
Norte-Noroeste	0,14-0,34	864

Volumen de vertimiento

Después de haberse diseñado las playas con sus respectivas dimensiones el SMC se encarga de generar el polígono y realizar los cálculos del volumen de arena para la conformación del mismo.

Tabla 7. Volumen de vertimiento

	Las Américas	Sol Palmeras
Volumen Vertimiento (m ³)	69 853,8	65 562,8
40% Volumen total (m ³)	27 941,5	26 225,1
Volumen total (m ³)	189 583,2	

Resumen del vertimiento

La batimetría de la zona de estudio ya regenerada puede apreciarse en la figura 3.

Tabla 8. Resumen del vertimiento

	Vol. de Vto. Inicial con 40% (m ³)	Vol. de Rstro. con 40 % (m ³)
Las Américas	97 795,3	32 706,0
Sol Palmeras	91 787,9	55 785,7
Total	189 583,2	88 491,7

CONCLUSIONES

- Se realizó una descripción del software SMC para el diseño del vertimiento de arena en la zona comprendida entre las Peñas de Bernardino y Punta Chapelín.

- Se efectuó una detallada descripción del caso de estudio, describiéndose las características climatológicas, de sedimentología y oceanología de la zona.

- Se realizó un estudio hidrodinámico de la zona, analizando la propagación del oleaje y la tendencia erosiva. Demostrándose la fuerte erosión que sufre la zona y como esta puede ser compensada con el vertimiento de arena.

- Se determinó trabajar con un diámetro del sedimento de 0,44 mm ya que la tasa de erosión se acercaba más a la obtenida en un inicio con el diámetro nativo, mientras que para un diámetro de 0,34 mm esta tasa de erosión era mucho mayor.

- El volumen total del vertimiento de arena será de 189 583,2 m³ con 50 m de berma con una pendiente de 4% y 2 m de altura.

RECOMENDACIONES

- Realizar el presupuesto de la obra.
- Ejecutar monitoreo del proyecto para realizar futuros ajustes al mismo.
- Estudiar soluciones combinadas que permitan alargar la vida útil del vertimiento.

REFERENCIAS

1. **Córdova, L., Torres, R. (2008).** Estudio y cuantificación de la erosión en el tramo Meliá, Varadero. Propuestas de solución. C. Habana.
2. **García, C.** Instituto de Oceanología
3. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual de referencia de Copla-MCSP. Universidad de Cantabria.
4. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual de referencia de Eros. Universidad de Cantabria.
5. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual de referencia de Oluca-MC. Universidad de Cantabria.
6. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual del usuario SMC. Universidad de Cantabria.
7. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual del usuario Mopla (1-2-3-4). Universidad de Cantabria.
8. **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001).** Manual del usuario Petra. Universidad de Cantabria.
9. **Hernández, J., Reyes, R. (2002).** Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
10. **Izquierdo, M. (2004).** Estudio de la dinámica litoral en la playa de Varadero, Cuba. Santander.
11. **Juanes, J. L. (1996).** La erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control. Tesis de Doctorado. Cuba.
12. **Lista Provisional de Precios de Renglones Variantes. Precons. (2001).** Hoja No.1. Resolución 23-2001 MFP.
13. **Martínez, A. (2009).** Estudio comparativo entre fuentes de información nacional e internacional de oleaje en aguas profundas. C. Habana.
14. **Peraza, O., Matamoros, Y. (2004).** Propuesta de metodología para la rehabilitación de playas. Aplicación al caso de estudio: zona crítica de la playa de Varadero, Matanzas, Cuba. C. Habana.
15. **Project group CF74. (2007).** Coastal erosion at Varadero beach. C. Habana.