

Estudio hidrodinámico y morfodinámico de Isla Draga con diseño de estabilización de playa y talud

Hydrodynamic and morphodynamic study of Isla Draga with beach and slope stabilization design

Recibido: 2019-09-11 / Aceptado: 2020-03-03

Beny Zúñiga-Jurado¹; Paula Casal-Rey²; Oscar Fajardo-Espinosa³

DOI 10.26640/22159045.2021.459

CITAR COMO:

Zúñiga-Jurado, B.; Casal-Rey, P.; Fajardo-Espinosa, O. (2021). Estudio hidrodinámico y morfodinámico de isla Draga con diseño de estabilización de playa y talud. *Bol. Cient. CIOH*; 40(2): 65-81. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI 10.26640/22159045.2021.459

RESUMEN

Isla Draga es una isla ubicada al suroccidente de la bahía de Cartagena, la cual en las últimas décadas ha presentado grandes retrocesos en su línea de costa. En su parte occidental, donde se ubica la Estación de Tráfico Marítimo "San José", pierde anualmente casi 2000 m³ de sedimento hacia el sur, depositándose en los bancos de arena cercanos a la misma. Debido a esto fue necesario realizar estudios y diseños en la zona para mitigar esta problemática. Se utilizaron los datos recopilados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe y datos del Centro de Nivel del Mar de la Universidad de Hawái. Con estos datos se realizaron modelaciones y diseños con el fin de plantear una solución integral y viable técnicamente.

PALABRAS CLAVES: línea de costa, sedimento, erosión.

ABSTRACT

Isla Draga is an island located in the south of the Bay of Cartagena. In its western part, where the maritime traffic control station "San José" is located, almost 2000 m³ of sediment is dragged to the south (always in the same direction). This sediment is lost in the south of the island, where it escapes and is deposited in the sandbanks south of it. Due to this it was necessary to carry out studies and designs in the area in order to mitigate this problem. The data collected by the Caribbean Oceanographic and Hydrographic Research Center and the Data from the Sea Level Center of the University of Hawaii were used. With these data, models and designs were done to propose an integral and technically viable solution

KEYWORDS: Shore line, sediment, erosion.

¹ Orcid: 0000-0002-0253-5426. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: bzuniga@dimar.mil.co

² Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: pcasal@dimar.mil.co

³ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: oscarfajardoespinosa@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Este documento comprende el análisis del *Estudio hidrodinámico y morfodinámico de Isla Draga y diseño de estabilización de playa y talud* realizado por el CIOH en el año 2018 (CIOH, 2018). En dicho estudio se caracterizó la hidrodinámica y morfodinámica comprendida entre el canal de acceso a la bahía de Cartagena y la zona insular de Isla Draga; así como también se diseñó la respectiva alternativa de solución para la estabilización de un tramo de playa y talud que se ha visto fuertemente afectado por procesos erosivos significativos propios de la zona.

El estudio se centró en el costado suroccidental de Isla Draga y comprendió una fase de campo en la cual se realizó el levantamiento de la información topográfica y batimétrica general, y de detalle característica del sector; así como también la extracción de muestras de sedimentos del área de estudio. Posteriormente, con base a la información recolectada en campo y el uso de datos que recrearon el clima marítimo en aguas profundas y la información del nivel del mar, se generó una modelación numérica que representó de manera aproximada los procesos físicos y costeros que se evidenciaron en Isla Draga.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados del estudio, se justificó la línea de acción propuesta basada en una alternativa de solución integral de la cual se derivaron unas obras de ingeniería que en conjunto deberán ser capaces de mitigar las problemáticas presentes en la isla.

Las obras de ingeniería propuestas para conseguir la estabilización de la playa comprenden el diseño de un espolón en forma de 'V', cuya finalidad sea la de cortar las corrientes longitudinales que arrastran los sedimentos y provocan la erosión de la zona; así mismo, la realización de un relleno hidráulico que permita que la playa quede en equilibrio.

En cuanto a las obras de estabilización del talud propuestas en el informe del CIOH (2018) se planteó la conformación de un terraplén en tierra armada, complementado con plantaciones de vegetación nativa, cuyo propósito es el de evitar la erosión del talud y reducir las escorrentías que se puedan presentar. De igual forma, se propuso la instalación de 31 pilotes hincados para compactar el suelo y dar de esta forma mayor estabilidad al terreno.

Este artículo pretende exponer las técnicas usadas en el estudio del CIOH (2018) y plantear algunas propuestas metodológicas y procedimentales para abordar este tipo de problemáticas que se presentan en las zonas costeras.

ÁREA DE ESTUDIO

Isla Draga se encuentra localizada al suroccidente de la bahía de Cartagena de Indias D. T. y C., debajo del canal de acceso a la misma y de la isla de Tierrabomba, población de Bocachica (Fig. 1).



Figura 1. Localización del área de estudio. (Fuente: CIOH, 2018)

A partir de un análisis temporal de la línea de costa objeto de estudio, se constató que en 56 años la isla había cambiado completamente de forma y tamaño. Por tanto, se puede afirmar que la isla se encuentra

en desequilibrio dinámico (Fig. 2). Adicionalmente, se determinó que los factores responsables eran el oleaje y las corrientes inducidas por la interacción con la batimetría y la geometría de la costa.

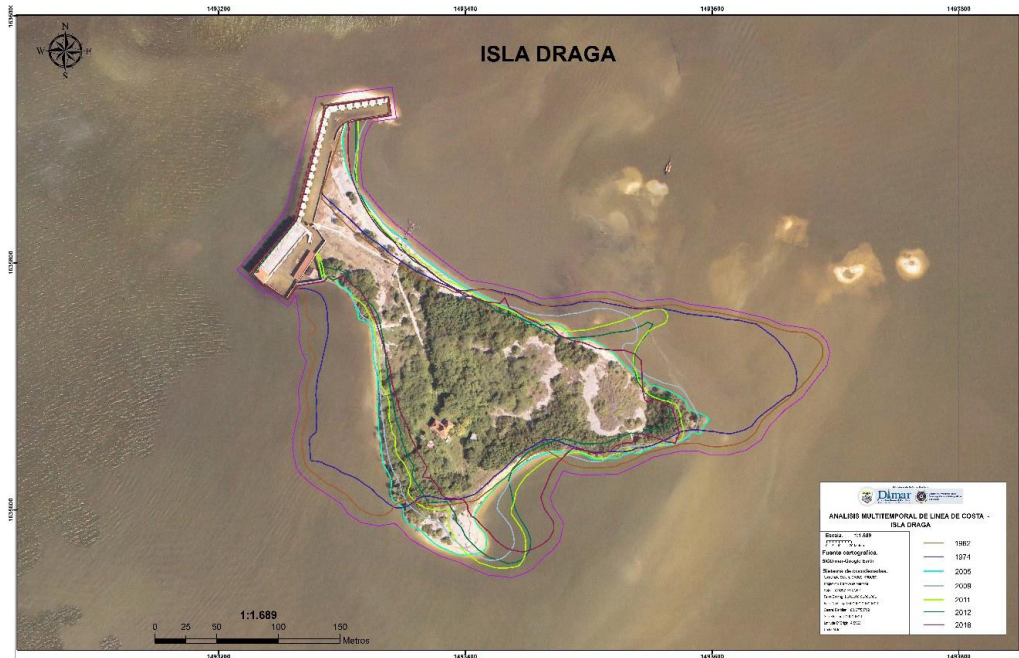


Figura 2. Análisis multitemporal línea de costa isla Draga. (Fuente: CIOH, 2018).

MARCO TEÓRICO

Propagación del oleaje

Las herramientas de propagación del oleaje han ido evolucionando a lo largo de los años. Antiguamente se propagaba a través de la Ley de Snell, que comprende unas ecuaciones de primer y segundo grado que resuelven los procesos de refracción, asomeramiento y difracción a los que está sometido el oleaje. En la actualidad se han desarrollado modelos numéricos que permiten realizar estas propagaciones en menor tiempo y procesando varios estados de mar a la vez.

Para el caso del proyecto de Isla Draga, la herramienta que se utilizó para propagar el oleaje desde aguas profundas hasta la costa es el Mopla-Oluca (SP), módulo perteneciente al programa Sistema de Modelado Costero (SMC), que trata de un modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase de la onda. Para la propagación de los componentes de energía, la aproximación parabólica incluye refracción-difracción con interacción oleaje-corriente (Kirby,

1986) aplicando las ecuaciones 1, 2 y 3 que se describen posteriormente.

El modelo predice las pérdidas de energía debido a la rotura del oleaje mediante la utilización de tres diferentes modelos estadísticos de disipación, dos de los cuales calculan la tasa media de disipación de energía asociada a un bore en movimiento (Battjes y Jansen, 1978; Thornton y Guza, 1983), y un tercero que asocia la tasa de disipación al gradiente entre el flujo de energía estable y local (Winyu y Tomoya, 1998).

En cuanto a las corrientes, estas fueron modeladas a partir de la extensión del SMC llamada Mopla-Copla (SP). Se trata de un modelo basado en la resolución de las ecuaciones promediadas del movimiento y la ecuación de la continuidad con base en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Análisis de transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos asociado a los problemas de erosión presentados en la isla se

analizó desde dos puntos de vista: a largo plazo y a medio plazo. En el análisis a largo plazo se estudian los modelos teóricos de perfil de equilibrio y planta de equilibrio característicos de una playa.

Para realizar el análisis del perfil de equilibrio se utilizaron las formulaciones de Birkemeier (1985) y Hallermeier (1981), que permiten calcular la profundidad de cierre, necesarias para

realizar la parametrización del perfil por medio de la formulación de Dean (1977). Posteriormente se planteó que el mejor ajuste del perfil de playa respondía al estudiado por Bernabéu (1999), el cual propone un perfil bipolarabólico compuesto.

La ecuación 1 representa el perfil de equilibrio de tipo parabólico propuesta por Birkemeier y la ecuación 2, la propuesta por Hallermeier.

$$h^* = 1.75 H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad \text{(Ecu. 1)}$$

Donde,

h^* : profundidad de cierre (m)

H_{s12} : altura de ola significativa la cual solo es superada 12 horas al año (m)

g : gravedad (m/s²)

T_s : período asociado a la altura de ola significativa H_{s12} (s)

$$h^* = 2.28 H_{s12} - 68.5 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad \text{(Ecu. 2)}$$

A continuación, se muestra la formulación para perfil de playa parabólico de Dean:

$$h = A x^{\frac{2}{3}} \quad \text{(Ecu. 3)}$$

$$A = kw^{0.44} \quad \text{(Ecu. 4)}$$

Donde,

A: parámetro de forma

x: distancia respecto a la línea de costa (m)

k: coeficiente

w: velocidad de caída de grano (m/s)

Finalmente, la formulación del perfil bipolarabólico compuesto (ecuaciones 5 y 6):

$$x_o = \left(\frac{h_r + M}{A_r} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h_r}{C} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{B}{A_r^{\frac{3}{2}}} (h_r + M)^3 - \frac{D}{C^{\frac{3}{2}}} h_r^3 \quad \text{(Ecu. 5)}$$

$$x_o = \left(\frac{h_r + M}{A_r} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{B}{A_r^{\frac{3}{2}}} (h_r + M)^3 \quad \text{(Ecu. 6)}$$

Donde,

A_r, C, B, D : parámetros de disipación y reflexión

M : carrera de marea modal (m)

h_r : altura de ola significativa media mensual a la profundidad de asomeramiento en bajamar (m)

x_o : distancia horizontal desde el origen de la costa hasta el origen del perfil de asomeramiento (m)

En cuanto al análisis de la planta de equilibrio de la playa se utilizó la parábola de Hsu y Evans (1989):

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad \text{(Ecu. 7)}$$

Donde,

R : radio vector tomado desde el punto de difracción (m)

R_0 : radio vector tomado desde el punto de difracción hasta el extremo no abrigado de la playa (m)

β : ángulo (fijo) que forma el frente de oleaje con R_0

C_0, C_1, C_2 : coeficientes en función del ángulo β

θ : ángulo (variable) que forma el frente de oleaje y R

El transporte de sedimentos asociado al largo plazo fue determinado a partir de las formulaciones del CERC (Coastal Engineering Research Center), mostrando resultados anualmente (Ecu. 8):

$$Q = \frac{k \rho_w g^{1/2}}{16(\rho_s - \rho_w)(1-p)\sqrt{\lambda_b}} H_b^{5/2} \sin(2\theta_b) \quad \text{(Ecu. 8)}$$

Donde,

Q : caudal de transporte sólido (m^3/s)

K : coeficiente empírico de proporcionalidad

ρ_w : densidad del agua (1025 kg/m^3)

g : aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

ρ_s : densidad del sedimento (2650 kg/m^3)

p : porosidad (0.4)

λ_b : índice de rotura

H_b : altura de ola en rotura (m)

θ_b : ángulo de incidencia del oleaje en rotura

El análisis a medio plazo consistió en estudiar de forma mensual los datos aportados por la formulación del CERC, descrita anteriormente (Ecu. 8).

Diseño de espolones

El diseño de estructuras costeras tipo espolón ha sido estudiado ampliamente y se han desarrollado diferentes formulaciones empíricas para el diseño de estas estructuras (Van der Meer, 1988). Las ecuaciones usadas corresponden a métodos en donde no se calculan las probabilidades de falla de la estructura, por lo tanto son formulaciones

relativamente sencillas en comparación a otras en donde sí se realiza este cálculo. Las ecuaciones usadas en este documento fueron la determinada por Hudson y la determinada por Van der Meer.

La ecuación de Hudson es en apariencia más sencilla, relaciona menos parámetros y menor cantidad de exponentes. Dicha ecuación se muestra a continuación:

$$W_{50} = \frac{\rho_s H^3}{k_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \tag{Ecu. 9}$$

Donde,

W_{50} : peso medio de cada unidad de roca (kg)

ρ_s : densidad de la roca usada (kg/m³)

ρ_w : densidad del agua marina (kg/m³)

H: altura de ola de diseño (m)

α : pendiente del talud

k_d : coeficiente de estabilidad

El valor del coeficiente de estabilidad es variable y se muestran sus posibles valores en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del coeficiente de estabilidad.

Forma de la roca	Arreglo	Daño			
		0-5 %		5-10 %	10-15 %
		Olas rompientes	Olas no rompientes	Olas no rompientes	Olas no rompientes
Lisa, redondeada	Aleatorio	2.1	2.4	3	3.6
Rugosa, angular	Aleatorio	3.5	4	4.9	6.6
Rugosa, angula	Especial	4.8	5.5		

Fuente: *Coastal Engineering Manual*, traducido por el autor.

La formulación de Van der Meer se muestra a continuación:

$$\xi_m = s_m^{-0.5} \tan \alpha \quad \text{(Ecu. 10)}$$

$$\xi_{mc} = (6.2P^{0.31}(\tan \alpha)^{0.5})^{\frac{1}{P+0.5}} \quad \text{(Ecu. 11)}$$

Si $\xi_m < \xi_{mc}$:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 6.2S^{0.2}P^{0.18}N_z^{-0.1}\xi_m^{-0.5} \quad \text{(Ecu. 12)}$$

Si $\xi_m > \xi_{mc}$:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = S^{0.2}P^{-0.13}N_z^{-0.1}(\cot \alpha)^{0.5}\xi_m^P \quad \text{(Ecu. 13)}$$

Donde,

H: altura de ola de diseño (m)

D_{n50} : lado equivalente del cubo de roca (m)

$\Delta = (\rho_s/\rho_w) - 1$

ρ_s : densidad de la roca usada (kg/m³)

ρ_w : densidad del agua marina (kg/m³)

S: área relativa erosionada (m²)

P: permeabilidad teórica (0.1-0.6) (m²)

N_z : número de olas

Lom: longitud de onda de la ola (m)

s_m : H/Lom: peralte de la ola

ξ_{mc} : número de Iribarren crítico

ξ_m : número de Iribarren

Tabla 2. Valores del parametro S.

Valores de S (Van der Meer 1988)				
Unidad	Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
Roca	1: 1.5	2	3-5	8
Roca	1: 2	2	4-6	8
Roca	1:3	2	6-9	12
Roca	1:4- 1:6	3	8-12	17

Fuente: *Coastal Engineering Manual*, traducido por el autor.

En ambos casos se busca calcular las dimensiones de la roca, ya sea obteniendo sus pesos o su diámetro nominal, ya que si se asemeja la roca a un cubo estos dos valores se pueden relacionar a través de la densidad de la roca, dado que el peso de la roca es el producto

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}}$$

Diseño de estructuras de retención

El diseño de estructuras de contención se basa en dos principios: (i) estabilidad externa de la estructura, es decir que la estructura no se deslice, se vuelque o hunda; (ii) estabilidad

del volumen por la densidad de esta. Dentro de estos diseños se busca también que el parámetro de daño N_s tenga valores menores de 2.0 para evitar desprendimiento de roca del espolón, este parámetro se calcula como se muestra a continuación:

(Ecu. 14)

interna, este se refiere a que internamente los elementos usados no presenten fallas. En todos los casos se busca que las solicitudes o acciones desestabilizantes sean menores a la resistencia o acciones estabilizantes, esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum F_{estabilizantes}}{\sum F_{desestabilizantes}} \geq F_{seguridad} \quad \text{(Ecu. 15)}$$

METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de transporte de sedimentos y estudiar las corrientes se obtuvo

el clima marítimo en la costa; lo que a su vez requirió tener una base de datos homogénea en aguas profundas que permitiera realizar las propagaciones correspondientes (Fig. 3).

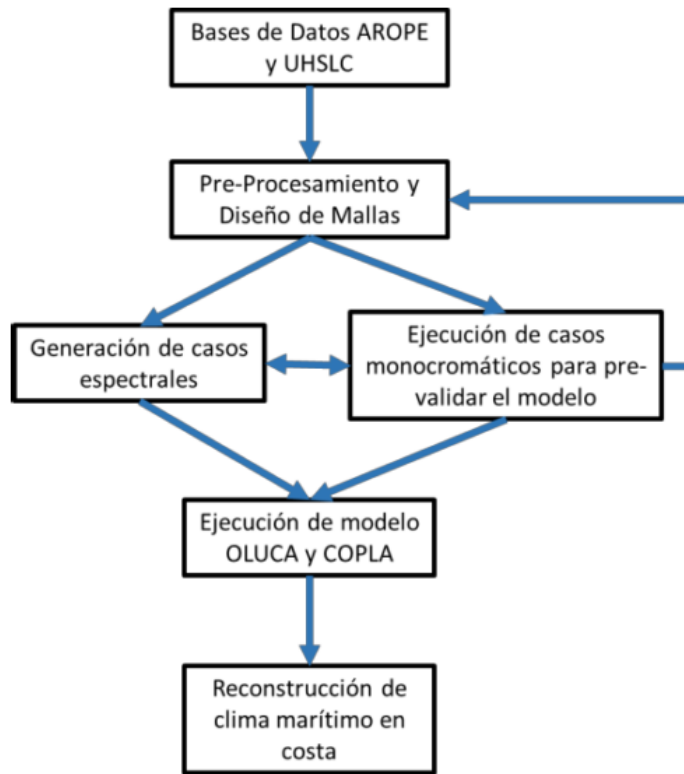


Figura 3. Esquema sobre la metodología utilizada en la propagación del oleaje hacia la costa. (Fuente: CIOH, 2018)

En la Fig. 4 se observa la metodología utilizada para obtener el oleaje en aguas profundas, realizado por el Área de Oceanografía Operacional (Arope) del CIOH, el cual se determinó a partir de campos de viento de la base de datos NARR (North American Regional Re-analysis) y teniendo en cuenta el nivel del mar aportado por la UHSLC (University of Hawaii

Sea Level Center). Estos fueron propagados con el modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore) resolviendo el fenómeno de whitecapping. El oleaje obtenido fue calibrado con datos instrumentales de una boya cercana, para mayor precisión. El resultado fue un punto de reanálisis de oleaje en aguas profundas.



Figura 4. Esquema sobre la metodología utilizada para obtener el oleaje en aguas profundas.

El software que se utilizó para obtener el oleaje en profundidades objetivo mediante la propagación fue el SMC, el cual es un conjunto de metodologías y modelos numéricos que permiten estudiar los procesos costeros y sus efectos en la costa debidos a eventos naturales o actuaciones humanas en el litoral. En particular, para este estudio permite realizar un análisis de transporte de sedimentos a corto, medio y largo plazo de la isla, así como propagar el oleaje y definir las corrientes causadas por este.

En la actualidad es muy costoso computacionalmente propagar 30 años de estados de mar, por lo que a la base de datos en aguas profundas se le hizo un estudio de clima marítimo en el cual, determinando el régimen medio y el régimen extremal, se seleccionaron los estados de mar más representativos acorde con las características del oleaje. Estos fueron la altura de ola Hs50 correspondiente al régimen medio; Hs12 y la Hs correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, ambas relacionadas con el régimen extremal. Para cada uno de ellos se tuvo en cuenta el nivel del mar, de forma que se estudió cada estado de mar con y sin carrera de marea ($CM=0$ / $CM=0.5$ m).

Una vez seleccionados los estados de mar, se propagó con Mopla-Oluca (SP) un modelo

espectral no dispersivo que resuelve la fase de la onda. Se escogió este modelo debido a que reproduce los procesos físicos asociados a la interacción con la batimetría y con el propio oleaje.

La batimetría introducida en el modelo es un conjunto de datos entre los cuales se encuentran las cartas náuticas oficiales, el levantamiento de la batimetría de detalle y los levantamientos de los perfiles de playa, todos ellos realizados por la Dimar. Para solapar toda la información se decidió referenciar todas las cotas al MLWS (Mean Low Water Springs), resultado de promediar las dos sicigias máximas de cada mes en cada año de registro mareográfico.

El modelo propaga la información en dominios o mallas, que hay que definir previo a su ejecución. Con base en los estados de mar elegidos y a las limitaciones de ángulo de incidencia del oleaje en la malla se definieron tres grupos de dominios: (i) el dominio N-NNE, para esas direcciones de oleaje está definido con tres mallas anidadas, una general y dos de detalle, las cuales presentan más resolución y definen mejor los contornos; (ii) el dominio NW que consta de tres mallas, una general y dos de detalle; (iii) el dominio W está formado por dos mallas, una general y una de detalle (Fig. 5).

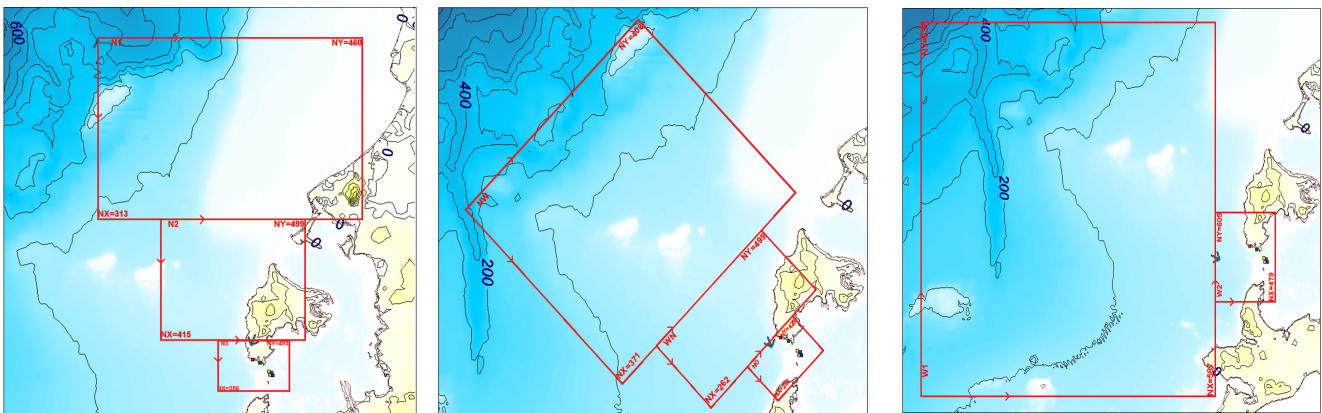


Figura 5. Grupos de dominios definidos para el proyecto Isla Draga. **a)** Malla de cálculo norte (N-NNE), **b)** Malla de cálculo noroeste y **c)** Malla de cálculo oeste (W). (Fuente: CIOH, 2018)

Una vez obtenido el clima marítimo en las profundidades objetivo, se procedió a analizar los sistemas de corrientes inducidas por el oleaje. Estas se obtuvieron paralelamente a la propagación del oleaje, introduciendo los estados de mar seleccionados en el Mopla-Copla (SP), un

modelo que resuelve las corrientes inducidas por la rotura del oleaje espectral en playas.

El siguiente paso tras las propagaciones fue el análisis de transporte de sedimentos a largo y mediano plazo. El corto plazo fue descartado

debido a la falta de oleajes extremos a corto plazo para realizar el análisis de la evolución del perfil.

El análisis a largo plazo fue llevado a cabo desde el punto de vista de perfil de equilibrio y planta de equilibrio. El perfil de equilibrio de una playa viene determinado por las variables altura de cierre y distancia de playa seca, las cuales dependen directamente del diámetro nominal del 50 % de las muestras de áridos que conforman la playa. En este caso se determinó, a partir de la formulación de Bernabeu (1999), que los perfiles de playa en la zona de estudio son compuestos. En cuanto a la planta de equilibrio,

esta se determinó a partir de la parábola de Hsu, metodología basada en la geometría, la cual depende del ángulo de incidencia del oleaje, el punto de difracción más cercano a la playa y de la distancia de playa seca.

Para estimar las tasas de transporte de sedimentos a largo plazo se utilizó la fórmula del CERC, la cual determina el caudal de sedimentos a partir de la altura de ola en rotura y del ángulo de incidencia del oleaje en rotura en una zona determinada dado un punto en la costa. En su análisis se compara el transporte de sedimentos a lo largo de los años por direcciones y, finalmente, se calcula el transporte neto (Fig. 6).



Figura 6. Modelo morfodinámico de funcionamiento, playa occidental de Isla Draga. (Fuente: CIOH, 2018).

Posteriormente, se realizó el análisis a medio plazo. Este consistió en aplicar la formulación del CERC de forma mensual, extrayendo así datos de transporte de sedimentos desde un punto de vista estacional. A partir del clima marítimo en la

costa, obtenido con los estudios de propagación y transporte de sedimentos, se determinó la altura de ola de diseño y las direcciones predominantes de oleaje y corrientes; parámetros necesarios a la hora de diseñar soluciones en la costa (Fig. 7).

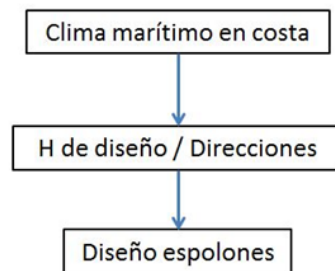


Figura 7. Esquema sobre la metodología utilizada para obtener los parámetros de diseño de los espolones.

RESULTADOS

Con base a los resultados obtenidos en las etapas anteriores del estudio se diseñó una alternativa de solución integral que incluyó dos estructuras tipo espolón conectadas en

forma de 'V', el planteamiento de rellenos hidráulicos de dos playas, la siembra de mangle en las playas nuevas, y la estabilización y el reforzamiento de talud con la adaptación de un terraplén, la siembra de arbustos e instalación de pilotes (Fig. 8).



Figura 8. Soluciones planteadas. (Fuente: CIOH, 2018).

La decisión de hacer dos espolones en forma de 'V' se hizo pensando en cortar las corrientes longitudinales que arrastran sedimentos de norte a sur. La metodología usada es clasificada como de Tipo I, según la ROM. Estos son métodos de verificación en donde las ecuaciones usadas no proporcionan una probabilidad de falla o incumplimiento de los requisitos del proyecto (ROM, 2001). La ecuación usada para el cálculo del peso de cada unidad de roca fue la de Hudson (1974), la cual se puede encontrar en el CEM (Coastal Engineering Manual, Hughes, 2003).

Una vez diseñados los espolones, se calcularon los perfiles y las plantas de equilibrio derivados del cambio de la forma de la costa. Con ellos se determinó el relleno hidráulico necesario para construir esas playas de equilibrio y así asegurar la protección de la costa.

Para garantizar la efectividad de la obra frente al problema de erosión, se volvió a correr el modelo numérico con los casos más desfavorables de oleaje e introduciendo la geometría en planta de las obras realizadas.

En cuanto a la estabilización del talud, se procedió a recoger datos de campo y con la

información obtenida mediante la visita y los análisis se decidió que las mejores alternativas para estabilizar el talud eran una estructura en suelo reforzado y el hincado de una hilera de pilotes.

Debido a que el talud se evidencia en estado crítico de erosión, según inspecciones de campo, se decidió recomendar la construcción de una estructura en suelo reforzado (terrapién) para obtener una superficie adicional y conformar el talud frente a la Estación de Control de Tráfico Marítimo "San José" en Isla Draga, a fin de evitar la erosión de este (CIOH, 2018).

El refuerzo del suelo se planteó mediante geotextiles, una alternativa que al entrelazarse con el suelo aumenta significativamente la capacidad del suelo (Das, 2012).

La razón por la cual se decidió implementar pilotes como parte del sistema de estabilización del talud es que es un método que a través del tiempo ha mostrado ser eficaz para estabilizar fallas de deslizamientos superficiales. Al hincar los pilotes se tienen dos beneficios: (i) se compacta el terreno, debido a que los poros llenos de aire o agua tienden a ser llenados por

la masa de tierra desplazada lateralmente por el hincado del pilote; (ii) la estabilidad, los pilotes brindan estabilidad al talud si tienen la suficiente longitud para interceptar la posible superficie de falla. Esto último implica que los pilotes deben ser capaces de soportar el cortante que le genera la masa de tierra (Martínez, 2016).

Propuesta de metodologías

Analizado el Estudio hidrodinámico y morfodinámico de Isla Draga y diseño de estabilización de playa y talud, se propusieron

metodologías similares a las utilizadas por el CIOH en el 2018, que pueden ser igualmente aplicadas en el marco de este tipo de estudios de ingeniería costera. Para lo anterior se evaluaron los siguientes criterios técnicos:

Propagación del oleaje. La metodología empleada en el proceso de propagación realizada para Isla Draga se puede resumir en el esquema de la Fig. 9, en la cual se observa que se partió de datos de oleaje producto de reanálisis en aguas profundas.

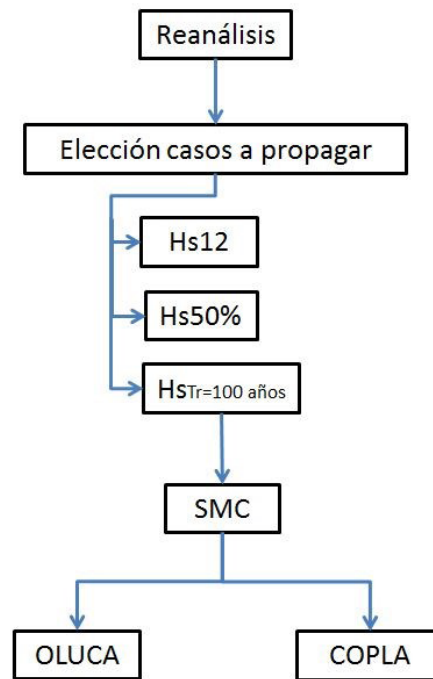


Figura 9. Metodología general seguida en el proceso de propagación.

La elección de casos a propagar se hizo a partir del régimen medio y el régimen extremal correspondientes al clima marítimo de aguas profundas; de los cuales se obtuvieron la Hs12, Hs50% y Hs asociadas a un período de retorno de 100 años, todas ellas para cuatro direcciones predominantes de oleaje. Estos casos de oleaje fueron introducidos en el modelo SMC, tanto en la extensión de propagación de oleaje (Oluca) como en la extensión encargada de propagar corrientes (Copla).

A continuación se propone una metodología alternativa que puede ser igualmente utilizada

para el desarrollo de la propagación respectiva (Fig. 10). En ella se parte de la misma base de datos de reanálisis en aguas profundas, pero en este caso para la elección de casos a propagar se aplica la herramienta Max-diss, un algoritmo de selección el cual escoge los estados de mar más representativos de las series de oleaje. Estos casos se introducirían como input en el modelo SWAN, una herramienta numérica de propagación de oleaje. Los resultados de esta propagación se obtendrían en unos puntos-objetivo cerca de la zona de estudio en cuestión.

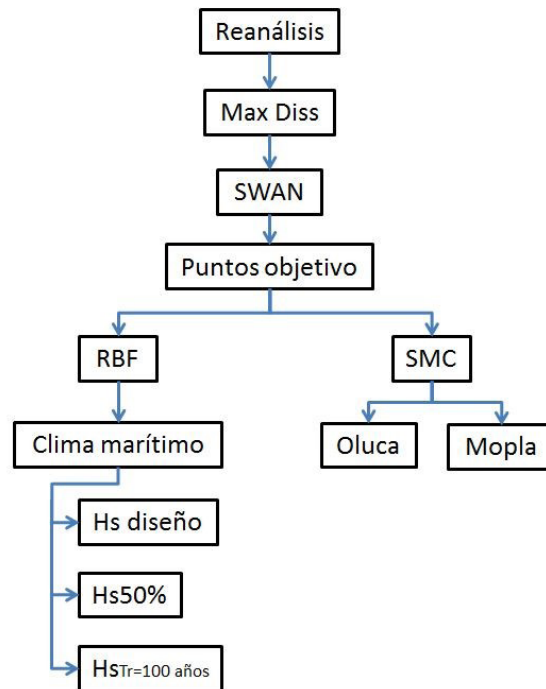


Figura 10. Metodología general propuesta para el proceso de propagación.

A partir de los casos de oleaje propagados se seguirían dos líneas de actuación. En primera instancia se reconstruiría la serie de oleaje a partir de los casos propagados, de la mano del algoritmo RBF, la cual serviría de base para realizar un clima marítimo del cual obtener los parámetros de diseño de las estructuras, así como de las playas. En segundo lugar, los casos de oleaje propagados hasta puntos-objetivo servirían para alimentar el modelo SMC en sus extensiones de oleaje (Oluca) y corrientes (Mopla). Con él se obtendría la altura de ola que llega a las inmediaciones de la isla, así como las corrientes que afectan al transporte de sedimentos, ayudando a determinar y diseñar las obras de mitigación de erosión.

Ambas metodologías presentan algunas diferencias. La selección de casos a propagar y la obtención del clima marítimo son las más importantes. Sin embargo, al tratarse en este caso de una zona semiabrigada, prácticamente en el interior de una bahía, se presentan unas condiciones de oleaje poco cambiantes, por lo que los resultados de alturas de ola de diseño tanto para las estructuras como para las playas tendrían diferencias mínimas, pero que en esencia soportan de forma adecuada las

soluciones tomadas para el problema de erosión presentado en el área de estudio.

Análisis de transporte de sedimentos

En cuanto a la metodología utilizada en el estudio CIOH (2018) para determinar el transporte de sedimentos y calcular las plantas y perfiles de equilibrio, los autores no proponen otra metodología diferente a la expuesta.

Diseño de espolones

El cálculo del espolón efectuado en el estudio del CIOH (2018) se comparó con dos metodologías propuestas por los autores (método A y método B). En el método (A) se usó la misma formulación del estudio del CIOH (ecuación de Hudson), pero se varió el factor k_d de 3.2 a 3.5, ya que según el CEM este valor también puede ser usado. De igual forma, se usó una densidad de agua del mar mayor (1030 kg/m^3 contra los 1023 kg/m^3 usados en el estudio del CIOH). El método (B) se limitó a utilizar el uso del factor k_d de 3.5. Los resultados respectivos se relacionan en la Tabla 3 y los porcentajes de diferencia se muestran en la Fig. 11. La esquemáticamente de los espolones se muestran en las figuras 12 y 13.

Tabla 3. Comparativo de resultados de los métodos usados para el cálculo del espolón.

	Item	Informe	Método A	Método B
Núcleo	W (kg)	4.060	4.825	9.000
	D50 (m)	0.120	0.130	0.160
Manto	W (kg)	81.250	96.492	90.000
Secundario	D50 (m)	0.330	0.353	0.350
Coraza	W (kg)	1015.570	964.917	904.500
	D50 (m)	0.770	0.760	0.740

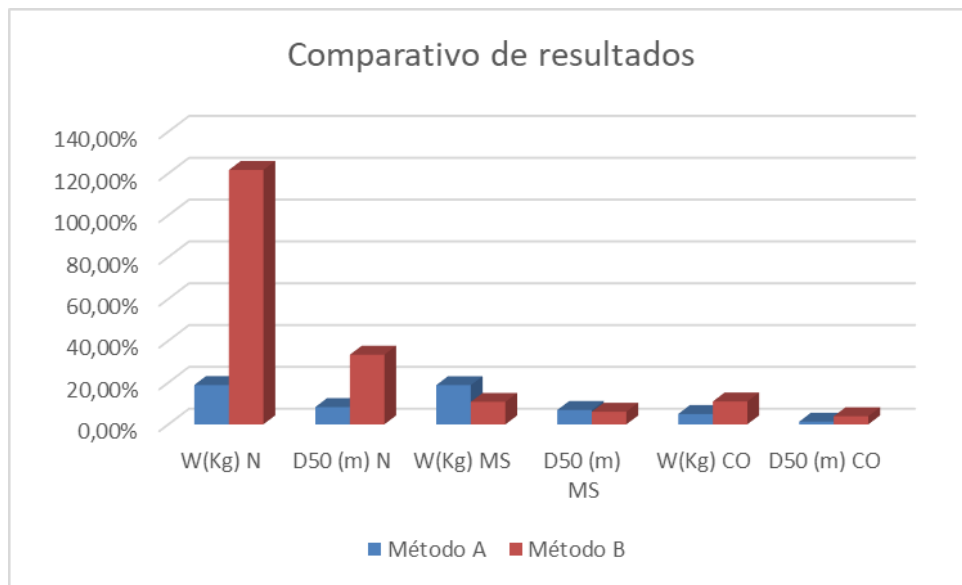


Figura 11. Porcentajes de diferencia en los resultados de los métodos usados en el cálculo del espolón.

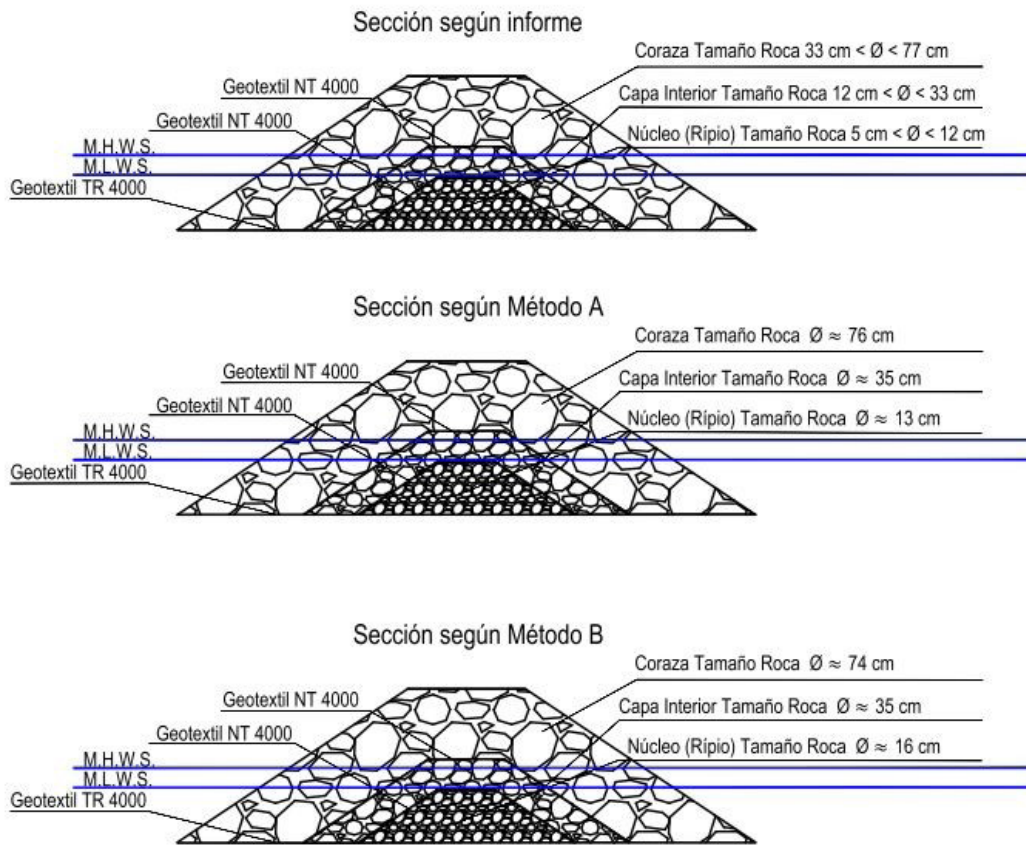


Figura 12. Sección general de los espolones propuestos según cada metodología.

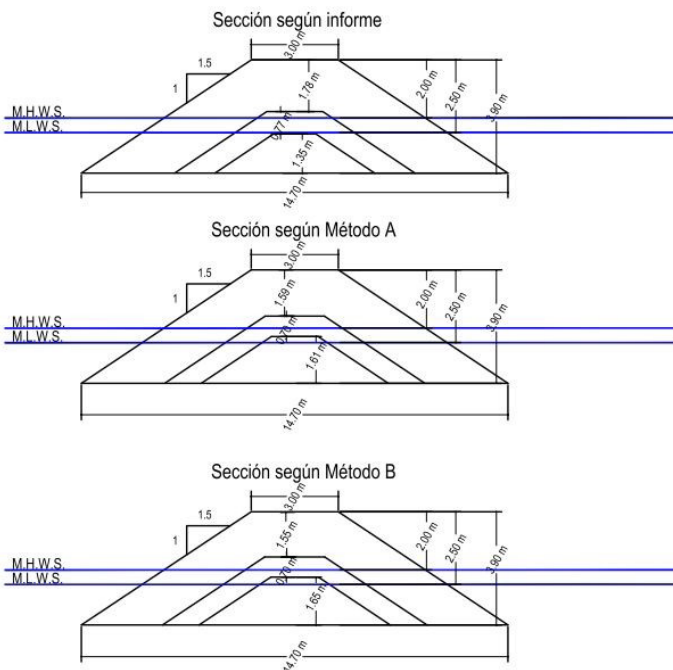


Figura 13. Geometría de la sección general de los espolones propuestos según cada metodología.

Finalmente, se aprecian pocas diferencias en los resultados obtenidos por medio de los métodos propuestos y los resultados obtenidos mediante la metodología utilizada en el estudio del CIOH (2018).

CONCLUSIONES

La metodología seguida para realizar las propagaciones, el análisis a largo y mediano plazo de las playas afectadas y la determinación de los parámetros de diseño es adecuada y acorde con la problemática presentada.

Se concluye que las metodologías utilizadas en las diferentes etapas del *Estudio hidrodinámico y morfodinámico de Isla Draga y diseño de estabilización de playa y talud* son adecuadas y normalmente utilizadas para abordar problemáticas costeras; no obstante, pueden utilizarse otras metodologías como las expuestas en este artículo, específicamente, en la etapa de propagación del oleaje y de diseño de los espolones.

En la etapa de diseño de los espolones y bajo la aplicación del método B se observó una diferencia en el peso de las rocas del núcleo, ya que se decidió usar otro factor para la obtención del mismo, razón por la cual se obtuvo un resultado que es casi del doble de los otros obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battjes, J. A.; Janssen, J. P. F. M. (1978). *Pérdida de energía y configuración debido a la ruptura de olas aleatorias*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587. <https://doi.org/10.1061/9780872621909.034>

Bernabeu, A. M. (1999). *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas*. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria. Santander.

Birkemeier, W. A. (1985). Datos de campo del límite marítimo de cambio de perfil. J. Waterway, Port, Coastal. Ocean Eng. 111: 598-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:3\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:3(598))

CIOH. (2018). *Estudio hidrodinámico y morfodinámico de Isla Draga y diseño de*

estabilización de playa y talud. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Cartagena.

Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Santa fe: Aprendizaje de Cengage.

Hallermeier, R. J. (1981). Una zonificación de perfil para playas de arena estacionales de clima de olas. *Ingeniería Costera*; 4: 253-277. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(80\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90022-8)

Hsu, J. R. C.; Evans, C. (1989). Formas y aplicaciones de bahías parabólicas. *Actas del Instituto de Ingenieros Civiles Parte 2*, 87: 557-570. <https://doi.org/10.1680/iicep.1989.3778>

Hughes, H. F. (2003). Capítulo 5, Fundamentos del diseño. En H. F. Hughes, *Manual de Ingeniería Costera*. Usace.

Kirby, J. T. (1986). Sobre la reflexión gradual de ondas de Stokes débilmente no lineales en regiones con topografía variable. *J. Fluid Mech.*; 162: 171-186. <https://doi.org/10.1017/S0022112086002008>

Martínez, Y. M. (2016). *Estabilización de deslizamientos de tierra mediante pilotes*. Tesis final de master. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

ROM, D. G. (2001). *Recomendaciones de obras marítimas 0.0*. Ministerio de Fomento. Puertos del Estado.

Thornton, E. B.; Guza, R. T. (1983). Transformación de la distribución de la altura de onda. *Revista de Reseach Geofísico*; 88(C10): 5925-5938. <https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>

Van der Meer, J. W. (1988). Diseño determinista y probabilístico de capas de armadura de rompeolas. Proc. ASCE. *Revista de WPC y OE*; 114(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1988\)114:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1988)114:1(66))

Winyu, R.; Tomoya, S. (1998). *Modelo de disipación de energía para ondas rompientes irregulares*. Actas de la Conferencia de Ingeniería Costera. ASCE, 112-125.