

LOS ROMPEOLAS SEPARADOS DE LA COSTA: MÉTODOS DE DISEÑO PARA UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN COSTERA

M. en I. Dora Luz Ávila Arzani, Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl, M. en I. Juan Esteban Flores Álvarez, Ing. David Humberto Segura Quiroz
e-mail: davila@imt.mx, rramirez@imt.mx, jflores@imt.mx, dsegura@imt.mx

INTRODUCCIÓN: LA EROSIÓN COSTERA

La erosión de la zona costera es un problema de relevancia mundial, que si bien, puede presentarse como consecuencia de la interacción de fenómenos naturales asociados a las condiciones océano-meteorológicas, dicho fenómeno sin lugar a duda, se ha potenciado debido a la acción antrópica que pone en riesgo tanto a la infraestructura y viviendas, así como a comunidades y ecosistemas.

En términos generales las playas se erosionan cuando se pierde el equilibrio en el movimiento de los sedimentos que las conforman, es decir, cuando la playa pierde más sedimentos del que recibe, los orígenes de la problemática de la erosión de las playas se pueden agrupar en dos causas principales

1. Causas naturales, las cuales son debidas a: incremento del nivel de mar, variaciones en el aporte de los sedimentos debido a sequías, oleaje, corrientes, fenómenos extremos (huracanes, tsunamis), viento.
2. Causas antrópicas, las cuales son debidas a la construcción de infraestructura en la zona activa de la playa (dunas), Destrucción de la vegetación terrestre y marina, construcción de estructuras costeras, construcción de represas (reducción de aporte de sedimentos), construcción der infraestructura portuaria, retiro de sedimentos de las playas.

CONTRAMEDIDAS PARA LA EROSIÓN COSTERA

Las soluciones estructurales para evitar la erosión de las playas y proteger las propiedades a lo largo de la costa pueden ser muy costosas, normalmente temporales y en la mayoría de los casos contraproducentes. Entre estas soluciones destacan dos métodos de protección de las playas frente a la erosión, sin embargo, resulta difícil establecer el límite entre ellas y, en ocasiones, ambos métodos pueden ser complementarios.

1. Soluciones duras, consisten en fijar mediante la línea de costa mediante la colocación de elementos rígidos.
2. Soluciones blandas, las cuales tienen un enfoque más medioambiental y están diseñadas a restablecer la playa a sus condiciones originales.

Dada la variedad de las estructuras de protección de la línea de costa que existen, es indispensable que, antes de seleccionar algún tipo de método para mitigar los problemas de erosión, se realice un diagnóstico adecuado del proceso erosivo en la zona (figura 1), abarcando todas las posibles causas naturales y antrópicas, a fin de que, las soluciones propuestas correspondan a dicho funcionamiento, considerando:

- Realizar un análisis integral de todos los factores que determinan la dinámica costera: condiciones oceanográficas, meteorológicas, sedimentológicas y morfológicas, características de los ecosistemas, infraestructura existente.
- Considerar una escala espacial y temporal adecuada para comprender el funcionamiento del sistema, así como para identificar tendencias y eventos extremos.

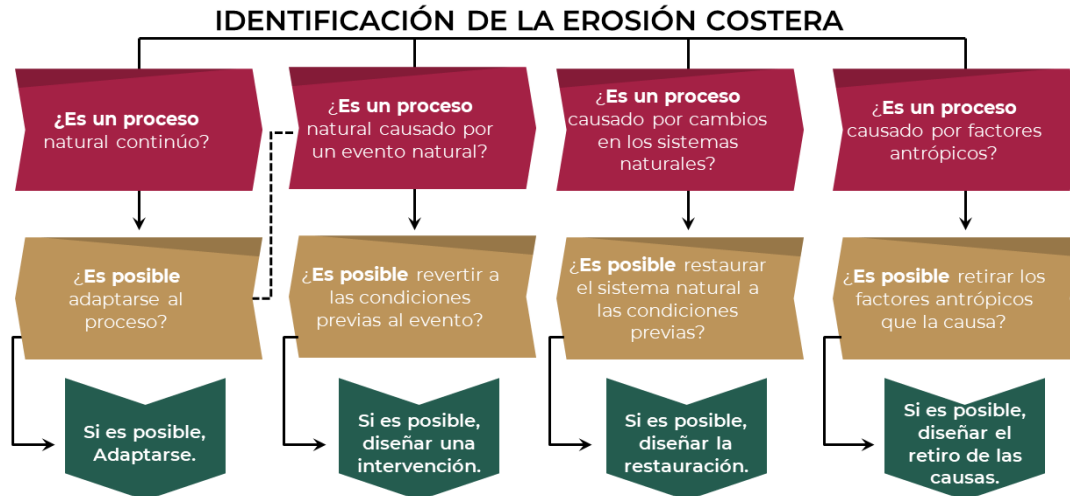


Figura 1. Flujo de preguntas clave para decidir una intervención para el manejo de la erosión. Fuente: Lineamientos para el manejo de la dinámica de erosión de playas, 2017

En virtud de que los análisis del diseño funcional de las contramedidas para la mitigación de la erosión costera muestran lo aleatorio de los criterios existentes para su diseño en planta, limitando su validez e interpretación lógica, sensible y concreta, es esencial definir de forma adecuada el objetivo de dichas contramedidas, contemplando la importancia estratégica de la zona, y el marco legal vigente.

OBJETIVOS DE LAS CONTRAMEDIDAS



Figura 2. Objetivos de las contramedidas. Fuente: Lineamientos para el manejo de la dinámica de erosión de playas, 2017

Dentro de la variedad de estructuras de protección costera se encuentran los rompeolas separados de la costa, los cuales son más o menos paralelos a la línea de costa, cuya finalidad es proteger la playa ante los embates del oleaje y generar una zona de calma por detrás de dichas estructuras.

La disminución de la acción del oleaje sobre la costa produce también una reducción de la corriente litoral, pero sin llegar a interrumpirla, esta disminución de la energía entre las estructuras y la costa provoca reducción de la capacidad del transporte litoral, sedimentación y acumulación de arena que avanza sobre la línea de costa formando salientes y/o tómbolos.



Figura 3. Batería de rompeolas separados de la costa y sus efectos en la línea de playa. Fuente: Imagen tomada de Google Earth, 2020

MÉTODOS DE DISEÑO PARA ROMPEOLAS SEPARADOS DE LA COSTA

Para el adecuado planteamiento de los rompeolas separados de la costa, se cuenta con una serie de fórmulas empíricas que hacen posible el diseño en planta de dichas estructuras. Estas fórmulas predicen el tipo de comportamiento morfológico que tendría la playa en función de la relación entre la longitud del rompeolas, su distancia a la costa, distancia entre rompeolas (en caso de varios rompeolas), longitud de ola en el lugar de la estructura, entre otras.

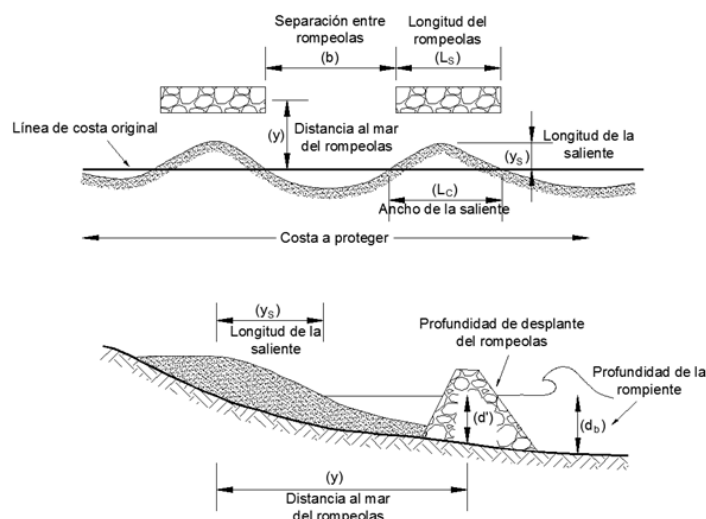


Figura 4. Variables que intervienen en el dimensionamiento en planta de los rompeolas separados de la costa

- Método JMC

Uno de los métodos para el diseño en planta de los rompeolas separados de la costa es el desarrollado por el Japanese Ministry of Construction (JMC) y resumido por Rosati y Truitt (1990).

En dicho método se calcula la profundidad de la rompiente (d_b), a partir de la relación de esbeltez del oleaje de diseño H_o/L_o y la pendiente de la playa β .

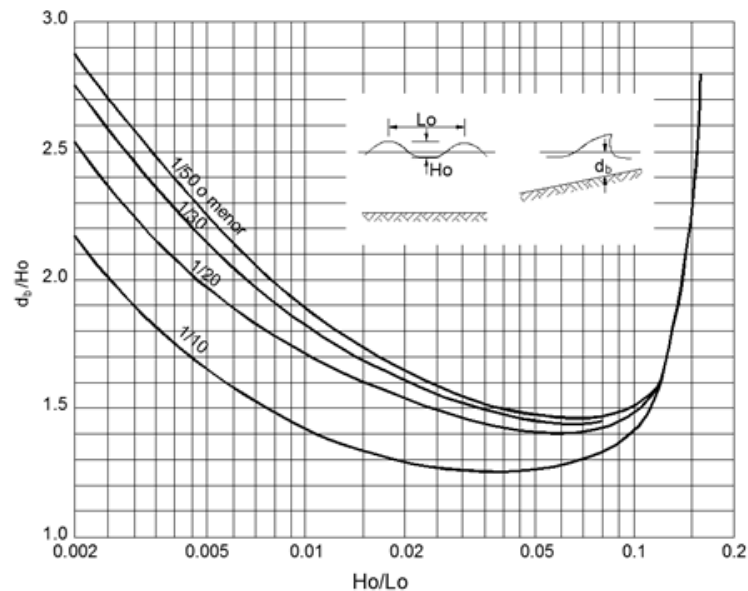


Figura 5 Gráfica para determinar la profundidad del oleaje rompiente (Goda, 1970).

Suponiendo una longitud inicial de la saliente (y_s), se calcula una primera aproximación de la profundidad de desplante del rompeolas separado de la costa (d')

$$d' = \frac{d_b + y_s \tan \beta}{2}$$

Donde, la primera aproximación de la distancia hacia el mar del rompeolas separado de la costa (y) se calcula con $y = d' \tan \beta$, y la primera aproximación de la longitud de la saliente se calcula con $y_s' = SAR y$.

El área de la saliente (SAR), se define como la relación del área formada por la saliente (en forma de triángulo), y el área protegida:

$$SAR = \frac{0.5(L_c y_s)}{y l}$$

Donde L_c es el ancho de la saliente a lo largo de la playa, medida con respecto a la línea de costa original. Si el valor de y_s' obtenido es aproximadamente igual al valor inicial de la saliente

y_s , este valor se adopta para el cálculo de la longitud y separación de los rompeolas, pero si la diferencia entre ambos valores es significativa, se debe calcular un nuevo valor de la saliente, definiendo para ello, una nueva profundidad de desplante, este proceso se repite hasta que los valores sean aproximados.

Para la longitud de los rompeolas (L_s) se toma el máximo valor de las siguientes relaciones:

$$1.8L < L_s < 3.0L \quad \text{Donde } L_s \text{ está en función de la longitud de la ola de diseño al desplante del rompeolas } (L = T\sqrt{gd})$$

$$0.8y < L_s < 2.5y \quad \text{Donde } L_s \text{ está en función de la longitud de la saliente}$$

Para la separación de las estructuras (b) se toma el máximo valor de las siguientes relaciones:

$$0.5L < b < 1.0L \quad \text{Donde } b \text{ está en función de la longitud de la ola de diseño al desplante del rompeolas } (L = T\sqrt{gd})$$

$$0.7y < b < 1.8y \quad \text{Donde } b \text{ está en función de la longitud de la saliente}$$

De acuerdo con lo anterior, es fácil observar que el diseño funcional de los rompeolas separados de la costa como estructuras de protección responde a una considerable dispersión en las variables que intervienen, por lo que, dada la importancia de un planteamiento adecuado de las estructuras contra la erosión costera, es necesario considerar diferentes criterios de diseño.

- Dally y Pope

Un criterio para determinar la longitud de los rompeolas, es el propuesto por Dally y Pope (1984), en el cual se recomiendan los límites para la proporción entre longitud de la estructura y distancia a la costa basada en el tipo de respuesta de playa deseada (no uniforme, donde las salientes o tómbolos ocurren o uniformes, en la cual ocurre un desarrollo parejo de la playa) y el largo de la playa a proteger.

Para protección no uniforme en un proyecto de corta distancia, un único rompeolas impermeable desvinculado de la costa es recomendado, donde la longitud de la estructura es igual a la longitud total de sección a proteger. Si la profundidad de construcción obtenida a partir de la distancia a la costa es muy grande, Dally y Pope (1986) recomiendan mover la estructura un poco hacia la costa a una profundidad donde la construcción de la estructura sea factible e incrementar la transmisibilidad de la estructura. Proyectos con líneas de costa más largas deberían ser protegidos con un sistema segmentado relativamente impermeable para un desarrollo de línea de costa no uniforme.

Las siguientes relaciones entre el largo de la estructura y la distancia a la línea de costa (y distancia entre las estructuras para rompeolas segmentados) son recomendados para la formación de tómbolos.

$$\frac{L_s}{X} = 1.5 - 2.0 \quad \text{Rompeolas único}$$

$$\frac{L_s}{X} = 1.5, \quad L \leq L_g \leq L_s \quad \text{Rompeolas segmentado}$$

Donde L es igual a la longitud de onda en la estructura y Lg es la distancia entre las estructuras.

La relación entre el largo de la estructura y la distancia a la costa se reduce para la formación de saliente.

$$\frac{L_s}{X} = 0.5 - 0.67 \quad \text{Rompeolas único y segmentado}$$

Para una protección uniforme, se recomienda que la estructura se ubique fuera de la zona de rompiente. Una estructura permeable y parcialmente sumergida (se recomienda un 60 por ciento de permeabilidad) o una estructura impermeable, frecuentemente segmentada va a permitir que ingrese el adecuado grado de energía del oleaje a la zona de sombra de la estructura para un desarrollo uniforme de la playa. La relación adecuada entre la longitud de la estructura y la distancia a la costa es la siguiente:

$$\frac{L_s}{X} \leq 0.125$$

- Suh y Dalrymple

Para determinar la longitud de la separación entre rompeolas, se consideran los criterios propuestos por Suh y Dalrymple (1987), los cuales basados en estudios en laboratorio, propusieron las siguientes relaciones:

$$\frac{L_s}{X} \geq 1.0 \quad \text{Formación de tómbolo para rompeolas único}$$

$$\frac{L_s}{X} \geq 2 \frac{L_g}{L_s} \quad \text{Formación de tómbolo para rompeolas múltiples}$$

- NIR (1982)

Basado en el desempeño de 12 proyectos de rompeolas en la costa israelí, Nir (1982) concluyó que el depósito es muy bajo o no ocurre si la proporción entre el largo de los rompeolas y la distancia a la línea de costa tiene un valor de 0.5 o menos.

$$\frac{L_s}{X} \leq 0.5 \quad \text{Condición de no depósito}$$

Donde:

Ls Longitud de los rompeolas
X Distancia desde la línea de costa hasta los rompeolas.

- Gourlay (1981)

Gourlay (1981) presenta relaciones similares basadas en modelamiento físico y observaciones en campo. Basándose en los estudios de laboratorio de Sauvage de St. Mark y Vincent (1995),

Adachi, Sawaragi y Ogo (1959), y Shinohara y Tssubaki (1967), Gourlay llegó a las siguientes conclusiones para la respuesta del laboratorio para rompeolas aislados:

- Tómbolos pueden formarse solamente si la estructura se encuentra localizada en la zona de rompiente.
- Patrones de difracción sin interferirse entre si pueden resultar en dos sistemas de corrientes independientes (y posiblemente la formación de un tómbolo doble), esto puede ocurrir cuando:

$$\frac{L_s}{X} > 2.0$$

Patrones de difracción se interfieren y reducen las corrientes longitudinales cuando L_s/X es menor. Se observó que la respuesta de la playa era una saliente si el mecanismo de transporte longitudinal dominante se daba por arrastre de fondo (parámetro de velocidad de caída, $H_0/VT < 1.5$, donde H_0 es la altura de ola en aguas profundas, V es la velocidad de caída de sedimento, y T es el periodo de la ola), o una característica mas compleja si el transporte dominante se da por suspensión ($H_0/VT > 1.5$).

$$\frac{L_s}{X} > 0.4 - 0.5$$

Corrientes que no interfieren entre si suficientemente fuertes como para transportar material, resultando en la formación de tómbolo para un rango de valores entre:

$$\frac{L_s}{X} > 0.67 - 1.0$$

Gourlay realizó las siguientes observaciones acerca de la respuesta de la playa debido a prototipos de rompeolas basados en el desempeño de estructuras en California, Japón, e Israel:

La formación de tómbolo pueden ocurrir solamente si la estructura se encuentra dentro de la zona de rompiente y cuando

$$\frac{L_s}{X} > 0.67$$

Para casos en los cuales la estructura se encuentra fuera de la zona de rompiente, la respuesta de la playa va a estar determinada por la ubicación de dicha zona.

- Ahrens y Cox (1990)

Ahrens y Cox usaron el esquema del índice de clasificación de la respuesta de playa presentado por Pope y Dean (1986) para el desarrollo de una relación para la respuesta morfológica esperada como función de la proporción entre la longitud de la estructura y la distancia a la costa.

$$I_s = e^{(1.72 - 0.41 \frac{L_s}{X})}$$

Donde:

I_s Índice de la respuesta de la playa, donde:

$I_s = 1$	Tómbolo permanente
$I_s = 2$	Tómbolo periódico
$I_s = 3$	Salientes muy desarrolladas
$I_s = 4$	Salientes suaves
$I_s = 5$	Sin sinuosidad.

- Seiji, Uda, Tanaka (1987)

Basados en el estudio de más de 1500 rompeolas en Japón, Seiji, Uda y Tanaka (1987) proponen las siguientes relaciones para predecir la erosión frente a las distancias entre las estructuras, esta erosión es definida como el retroceso de la línea de costa inicial (antes del proyecto).

$$\frac{L_g}{X} \leq 0.8 \quad \text{Sin erosión frente al espacio entre rompeolas}$$

$$0.8 \leq \frac{L_g}{X} \leq 1.3 \quad \text{Posible erosión frente al espacio entre rompeolas}$$

$$\frac{L_g}{X} \geq 1.3 \quad \text{Erosión segura, frente al espacio entre rompeolas}$$

- Noble (1978)

Evaluó los efectos de estructuras costa a fuera a lo largo de la costa de California y de las cuales se discuten en la literatura, concluyendo que “los rompeolas desvinculados de la costa producen mínimo impacto solamente cuando la distancia de la estructura a la línea de costa es seis veces mayor que el largo del rompeolas”, es decir:

$$\frac{L_s}{X} \leq \frac{1}{6} \quad \text{Mínimo impacto}$$

CONCLUSIONES

Estos criterios pueden ser usados de forma preliminar en el diseño para distinguir la respuesta de la línea de costa para las estructuras de protección propuestas, sin embargo, la validación de estas ecuaciones aun no se considera del todo confiable, por lo que, para conocer mejor la respuesta de la línea de costa, se recomienda emplear algún modelo numérico de largo periodo con el cual se pueda predecir de manera más significativa los resultados morfológicos, complementándose los resultados obtenidos con la modelación física.

Los modelos numéricos de evolución a largo plazo permiten estudiar la evolución de la planta de las playas causados principalmente por efectos de oleaje, el cual puede abarcar unos pocos cientos de metros a varios kilómetros y con respecto al tiempo, abarcando periodos de tiempo de meses o años.

En los modelos de línea de costa, la evolución de la playa se representa por el cambio de dicha línea. Este cambio de la línea de costa se produce por las variaciones del transporte longitudinal de sedimento en el tiempo a lo largo de la costa.

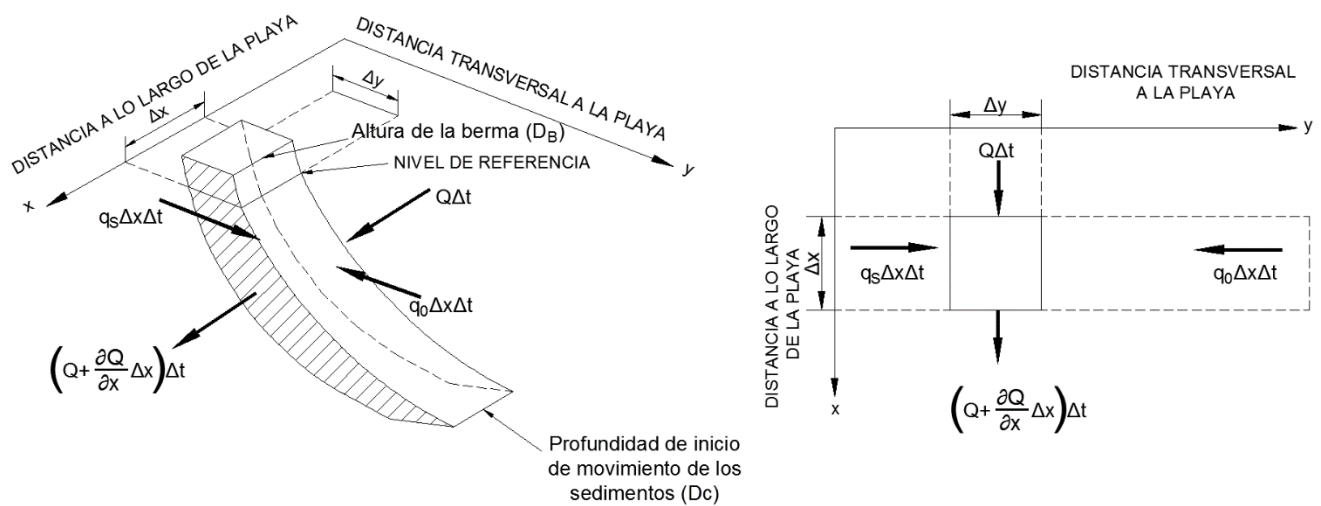


Figura 6 Elementos que definen el modelo del cambio en la línea de playa

Finalmente, es importante considerar que, a largo plazo, resulta engañoso querer mantener definitivamente la línea de playa sin que haya un impacto considerable y sobre todo sin cuantiosas inversiones económicas.

BIBLIOGRAFÍA

Coastal Engineering Research Center, (1984). *Shore Protection Manual Vol 1 y 2.*

Red Atlántica para la Gestión de los Riesgos Costeros, (S. F.) *soluciones alternativas para la protección de las costas*

Sciarrone R., melendez R., Loschacoff S. (S. F.) *Rompeolas aislados como estructuras de protección costera, recuperación de playas*

Secaira, F., Delgadillo, M. A. (2017). *Lineamientos para el manejo de la dinámica de erosión de playas.*

Silva R., Mendoza E., Martínez L. (2018) *Recomendaciones generales para el manejo de la zona costera*

U.S. Army Corps of Engineers, (1991). Reporte técnico CERC-89-19. GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Reporte 2 Workbook and System User's Manual