

RECOMENDACIONES GENERALES
PARA EL MANEJO DE
LA ZONA COSTERA

Rodolfo Silva Casarín
Patricia Moreno-Casasola
Ma. Luisa Martínez
Edgar Mendoza Baldwin
Jorge López-Portillo
Debora Lithgow
Gabriela Vázquez
Rubí E. Martínez Martínez
Roberto Monroy Ibarra
Jorge Iván Cáceres Puig
Arturo Ramírez Hernández
Mariana Boy Tamborrell



RECOMENDACIONES GENERALES
PARA EL MANEJO DE
LA ZONA COSTERA

Primera Edición 2017

D.R. © 2017 Instituto de Ecología, A.C.
Carretera antigua a Coatepec no. 351,
El Haya, Xalapa, Veracruz 91070, México
<http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/>

ISBN: 978-607-7579-74-8

Noviembre, 2017

RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL MANEJO DE LA ZONA COSTERA

ISBN: 978-607-7579-74-8

Rodolfo Silva Casarín
Patricia Moreno-Casasola
Ma. Luisa Martínez
Edgar Mendoza Baldwin
Jorge López-Portillo
Debora Lithgow
Gabriela Vázquez
Rubí E. Martínez Martínez
Roberto Monroy Ibarra
Jorge Iván Cáceres Puig
Arturo Ramírez Hernández
Mariana Boy Tamborrell

Publicación en línea:

<http://www.inecol.mx/inecol/libros>

Forma sugerida para citar este libro:

Silva, R., Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P.,
Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vázquez,
G., Martínez-Martínez, R.E., Monroy-Ibarra, R.,
Cáceres-Puig, J.I., Ramírez-Hernández, A., Boy-
Tamborell, M. 2017. *Recomendaciones generales para
el manejo de la zona costera*. UNAM; INECOL. 60pp.

El cuidado editorial de la obra *Recomendaciones
generales para el manejo de la zona costera* estuvo
a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación
del Instituto de Ingeniería, de la Universidad
Nacional Autónoma de México (IIUNAM), Ciudad
Universitaria, C.P. 04510, México, Ciudad de México.

Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM.
Israel Chávez Reséndiz

Diseño:

Natalia Cristel Gómez Cabral

Oscar Daniel López Marín

Fotografía de portada:

Edgar Mendoza Baldwin

I CONTENIDO

- Pág. 9** **CAPÍTULO 1. MANEJO DE LA EROSIÓN**
Causas naturales de la erosión
Causas de la erosión de origen antrópico
Tipos de erosión
 Erosión temporal
 Erosión episódica
 Erosión cíclica
 Erosión crónica o de largo plazo
- Pág. 17** **CAPÍTULO 2. BUENAS PRÁCTICAS Y SOLUCIONES SUAVES**
Sitios con vegetación dunar
 Playas sin suministro de arena
 Vegetación sin aportación artificial de arena
 Vegetación con relleno de arena
 Restauración de dunas costeras
Algas y pastos marinos
 Algas y praderas de pastos marinos
 Algas y pastos artificiales
 Siembra de algas y pastos marinos
Sitios con presencia de arrecifes
Defensa y formación de dunas
Rellenos de playas
 Reciclado de arena
 Regeneración de playas
Dragados
Construcción de marinas
Sitios de anidamiento de tortugas
- Pág. 33** **CAPÍTULO 3. OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA**
Estructuras de bolsas de geotextil
Gaviones
Protección artificial de dunas
Arrecifes artificiales
Espigones
Diques emergidos

Revestimientos permeables o muros longitudinales en tierra
Revestimientos impermeables y muros costeros
Revestimientos de madera
Bloques de concreto interconectados
Rompeolas flotantes
Otros sistemas
Ejemplos de obras de protección costera sobre la línea de playa

Pág. 47

CAPÍTULO 4. CIMENTACIONES EN LA ZONA COSTERA

Introducción
Aspectos generales
Cimentaciones sobreelevadas en zonas costeras
Sobreelevación con relleno del terreno
 Cimentaciones directas
 Cimentaciones abiertas
Sobreelevación de las construcciones en zonas costeras

Pág. 53

CAPÍTULO 5. ESTUDIOS BÁSICOS NECESARIOS PARA LA INTERVENCIÓN EN LA ZONA COSTERA

Necesidad de estudios con una visión integral
Características que deben cumplir los estudios para la construcción de nueva infraestructura en la playa y obras de protección de la costa
 Diagnóstico
 Evaluación de alternativas o posibles escenarios
 Diseño
 Seguimiento y evaluación del proyecto

Pág. 57

BIBLIOGRAFÍA

I Capítulo 1.

MANEJO DE LA EROSIÓN

Las playas de arena son sistemas sedimentarios muy dinámicos que naturalmente experimentan ciclos de erosión y acumulación en intervalos de tiempo y grados de intensidad muy variables, vinculados a la disponibilidad de sedimentos y a la magnitud y frecuencia de las tormentas que afectan la costa. Generalmente, la acumulación de arena en la parte alta del perfil de las playas se produce durante las estaciones con menos energía del oleaje, lo cual es un proceso mucho más lento que la erosión del perfil de las playas que se produce en los episodios de oleaje más intenso (ej. tormentas). El movimiento de la arena dentro de o hacia afuera de una playa depende de la disponibilidad de dicho material, del ángulo y energía del oleaje así como de la presencia de obstáculos. La combinación de todo ello puede resultar en acumulación o erosión,

permanente o temporal de segmentos de playa, particularmente en las inmediaciones de promontorios, estructuras y desembocaduras de ríos.

En términos prácticos, las playas se erosionan cuando pierden más sedimento del que reciben. Sin embargo, en sentido funcional y de percepción, una playa se considera en erosión cuando el resultado de todos los procesos marinos, meteorológicos y geofísicos, denotan un avance permanente de la línea de costa hacia tierra. Respecto a ambas definiciones, Bird (1996) y Silva y Mendoza (2015c) enlistan las principales causas por las que una playa puede erosionarse.

I CAUSAS NATURALES DE LA EROSIÓN

- Incremento relativo del nivel del mar. En virtud de que en muchas partes del mundo está cambiando el nivel relativo del mar, debido a la subsidencia de las costas y al aumento del nivel del mar, se produce una recesión paulatina de la línea de costa.

- Variaciones en el aporte de sedimentos a la zona litoral. Los cambios en los patrones de clima, provocan



Erosión en una playa de Marismas Nacionales. Fotografía: Pamela Flores

sequías, lo cual tiene como consecuencia menor aporte de sedimentos de los ríos al mar.

- Oleaje de tormenta. Las olas con gran energía producen transporte del perfil de playa hacia el mar, erosionando la berma. En función de la orientación relativa de la costa con la incidencia del oleaje local, se puede producir un transporte de sedimentos en sentido longitudinal a la playa que disminuya el volumen disponible para la playa.

- Durante tormentas, se puede presentar una depositación de sedimentos fuera de la zona activa de la playa, en zonas marinas (acantilados marinos, plataforma continental, entre otros) y/o en zonas terrestres (sotavento de las dunas). En condiciones reinantes, el oleaje y/o el viento no son capaces de regresar dicha arena a las playas.

- Erosión eólica. Este fenómeno consiste en el transporte por viento de la arena desde la zona de playa activa hasta la parte posterior de la misma (donde generalmente se acumula formando dunas). Aun cuando la pérdida de este material aparenta erosionar la playa, en realidad se convierte en un almacén de arena de donde la playa se alimentará durante una tormenta.

- Transporte longitudinal. En condiciones reinantes, la erosión ocurre cuando la cantidad de transporte longitudinal excede a los aportes naturales de sedimento.

- Selección del material. La acción del oleaje sobre una playa produce una selección y redistribución de los tamaños de las partículas de arena.

Generalmente, se pierden los granos más finos lo que constituye un volumen de material que no regresará a la playa.

I CAUSAS DE LA EROSIÓN DE ORIGEN ANTRÓPICO

- Construcción de infraestructura en zonas de amortiguamiento, como dunas y playas. La infraestructura en esta zona inhibe la formación y el crecimiento de dunas, mismas que durante las tormentas pueden fungir como reservas de arena y zonas de disipación de la energía del oleaje. La acción del oleaje sobre la infraestructura genera reflexión en lugar de disipación, aumentando la capacidad del transporte de sedimentos hacia aguas más profundas.

- Destrucción de la vegetación terrestre y marina (ej. manglares, pastos marinos), arrecifes coralinos y de otros amortiguadores naturales. Estos sistemas costeros tienen funciones como producir y/o retener sedimentos en sus raíces. En general, disminuyen la acción del transporte de sedimentos eólico y marino ya que reducen la energía por efectos de fricción sobre sus superficies. La remoción de estos elementos es, entonces, causa directa de la erosión.

- Hundimiento del terreno producido por la explotación de recursos. Tal es el caso de extraer del subsuelo gas, petróleo, carbón o agua. Ésto origina hundimiento generalizado.

- Captación del acarreo natural de sedimentos. Esta es una de las principales causas de erosión en las playas,

ya que las obras que se construyen para proteger una playa tienen una gran influencia sobre las zonas circunvecinas al alterar el equilibrio del transporte litoral de sedimentos.

- Reducción de aportes de sedimentos a la zona litoral. En algunas ocasiones, las obras que se construyen aguas arriba de los ríos, como es el caso de las presas, retienen material que antes llegaba hasta la desembocadura y era distribuido por la zona costera.

- Concentración de energía sobre la playa. Cuando se construyen obras marítimas perpendiculares y paralelas a la playa se producen los fenómenos de reflexión y difracción del oleaje que concentran energía en algunos segmentos de la playa. A su vez, se

origina mayor transporte de sedimentos al pie de las estructuras y en las zonas de concentración.

- Incremento del calado. En el caso de obras de dragado en bocas o bahías, se tiene una mayor profundidad y el oleaje llega a la costa con mayor altura. Por lo tanto, mayor capacidad de acarrear sedimento.

- Cambios en las estructuras naturales de protección de la costa. Realizar dragados o allanamiento de arrecifes naturales o barras, permite que oleaje de mayor altura alcance la costa.

- Remoción de arena de las playas. En sitios donde no existen bancos de material para construcción, se suele tomar arena de la playa y esto desestabiliza el balance natural de sedimentos.



Erosión de origen antrópico. Fotografía: Pamela Flores

I TIPOS DE EROSIÓN

Es importante hacer una distinción entre la erosión transitoria de la berma de una playa durante una tormenta, la erosión estacional (ciclos invierno-verano) y la erosión de largo plazo o permanente (crónica) debido a la falta de abastecimiento de arena o modificaciones del medio físico que afectan la dinámica marina y terrestre. El monitoreo puede ayudar a determinar si la erosión es cíclica o muestra una tendencia a largo plazo.

EROSIÓN TEMPORAL

Se trata de procesos de erosión que se presentan en diferentes intervalos de tiempo: episódico (tormentas), estacional y de múltiples décadas. La característica básica de este tipo de erosión es, en todos los casos, que la resiliencia natural de la costa permite su regeneración natural.

EROSIÓN EPISÓDICA

Es la remoción repetitiva de material de la playa por el oleaje en una tormenta, un tsunami o un deslizamiento de terreno que puede aceptarse como un evento natural. Esta excesiva entrada de energía, generalmente en un corto período de tiempo (un día o dos en el caso de tormentas y de minutos en el caso de deslizamientos de tierra o tsunamis), modifica la distribución espacial de las arenas ya que los sedimentos más finos son llevados a zonas menos expuestas a la energía del oleaje/corrientes (sitios más profundos o al resguardo de estructuras naturales o artificiales).

El proceso de erosión asociado a tormentas inicia tomando arena de la parte alta de la playa para construir, naturalmente, barras para controlar la energía del oleaje extremo. Posterior a dicha construcción y al paso de la tormenta, inicia la



Erosión después de una tormenta. Fotografía: Debora Lithgow

destrucción, también natural, de la barra y la arena regresa poco a poco a la berma de la playa. El principal mecanismo que debilita y allana la barra es la rompiente de las olas. La dinámica descrita es el medio por el que una playa se protege a sí misma ante eventos extremos.

EROSIÓN CÍCLICA

De acuerdo con Short (2000) Silva y Mendoza (2015b) el comportamiento de las playas está determinado principalmente por la acción que el oleaje ejerce sobre los sedimentos. De manera general, una playa puede considerarse disipativa, reflejante o en transición entre ambos estados (Figura 1).

Las playas disipativas pueden definirse como sistemas litorales donde gran parte de la energía del oleaje se pierde debido a los procesos relacionados con la rompiente

del oleaje. La principal característica de este tipo de playas es que tienen pendientes muy suaves (valores entre 0.01 y 0.03°). Además, las playas disipativas suelen tener un volumen grande de sedimentos, generalmente, muestran una barra longitudinal lineal, aunque en ocasiones pueden llegar a tener más de una, formando sistemas con múltiples barras.

Otra característica distintiva de las playas disipativas es que en la frontera mar-tierra se aprecian cambios longitudinales mínimos. La energía de las olas incidentes alcanza un valor máximo en el punto de rotura del oleaje y disminuye conforme el oleaje se aproxima a la costa; mientras que, la energía de las olas alcanza un valor mínimo al llegar a la zona de lavado.

Cabe mencionar que en sitios con regímenes meso y macromareasles (rangos de marea mayores a 2 m), la franja litoral

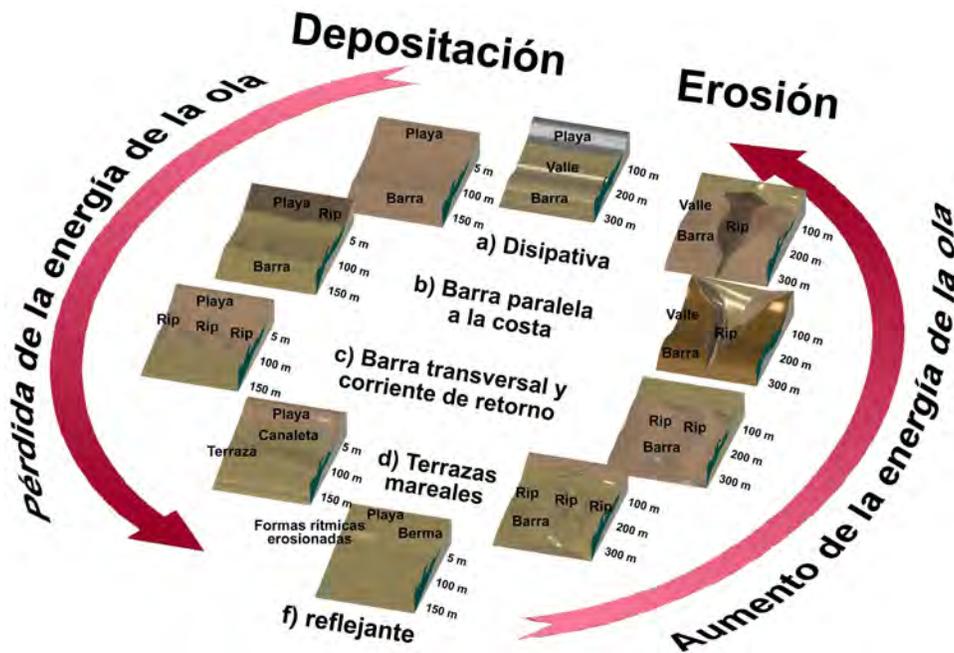


Figura 1. Secuencia de los estados morfodinámicos de las playas. Modificado de Short (2000)

puede ser disipativa durante la marea baja y reflejante durante la marea alta. En estas playas también pueden formarse cadenas de dunas transgresivas.

En contraste, el perfil transversal de las playas reflejantes tiene pendientes entre 0.10 y 0.20° y el material de la playa es más grueso que en las disipativas. El ancho de la playa sub-aérea suele ser estrecho con un escalón pronunciado al pie de la zona de lavado.

Dentro de las playas reflejantes pueden considerarse dos tipos: una que refleja poco o parcialmente la energía y otra que refleja toda la energía. En esta última se generan formas rítmicas en la zona de lavado debidas a la presencia de corrientes de retorno (rip). Se presume que dichas formas se desarrollan por las ondas de borde sub-armónicas. Además, en las playas reflejantes, la máxima energía del oleaje se presenta en la proximidad de la zona de lavado.

Cabe mencionar que en las playas reflejantes suelen formarse pequeñas dunas después de la zona de lavado.

1. En caso que sea necesario acelerar el proceso de recuperación de la playa es suficiente con reciclar la arena llevándola desde la barra hacia la playa seca.

2. Nunca es recomendable el uso de soluciones rígidas, es decir, estructuras de protección costera, para favorecer el proceso de recuperación o estabilización de una playa que está sujeta a erosión episódica.

En virtud que el oleaje tiene variaciones estacionales (a lo largo del año) y variación de

múltiples décadas (asociadas a fenómenos como El Niño y La Niña), los procesos de cambio de perfil, ancho de la playa, y las características mecánicas del sedimento deben considerarse como naturales, y no debe implementarse ninguna acción en particular.

EROSIÓN CRÓNICA O DE LARGO PLAZO

Las principales causas de la erosión gradual y permanente en una playa pueden ser:

- Disminución o déficit en el suministro de sedimentos
- Cambios permanentes en el clima marítimo
- Aumento del nivel del mar
- Actividades humanas que afecten el balance sedimentario

Antes de seleccionar alguna alternativa para solucionar la erosión, es necesario realizar un diagnóstico adecuado y, al menos, se deben responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la causa?
- ¿Qué impacto tienen?
- ¿Qué está en riesgo?
- ¿Qué se puede hacer?
- ¿Quién se hace cargo de los costos asociados?

Si el proceso de erosión es natural:

- Las costas no alteradas son moldeadas por procesos naturales, protegen a otros ecosistemas y cubren las necesidades de los seres humanos e incluso contribuyen a la

economía local y nacional. En general, estas playas muestran alta resistencia y resiliencia por lo que no requieren mantenimiento.

- Las costas con intervención humana, normalmente son moldeadas por las demandas humanas. Por lo tanto, solo suplen nuestras necesidades, no son sostenibles y requieren un mantenimiento constante, a veces, a un costo elevado.

Las obras de defensa costera siempre tienen algún efecto sobre las playas; mientras que las soluciones con rellenos artificiales siempre implican un costo de mantenimiento. En consecuencia, siempre que sea posible, se recomienda reubicar la infraestructura que está en riesgo a través de un manejo adaptativo.

El manejo adaptativo implica que, en algunas condiciones de erosión, puede

resultar más conveniente aceptar las consecuencias del retroceso de la línea de costa, aunque impliquen la pérdida de infraestructura y; establecer programas de adaptación. Es decir, en los casos en los que se decida seguir esa estrategia, no se debe intervenir o modificar los procesos naturales. Esta es una política de manejo que implica la pérdida de bienes materiales, ya se ha aplicado en algunos países como Irlanda del Norte, Escocia y Estados Unidos.

En general, las soluciones relacionadas con el manejo adaptativo son adecuadas en zonas donde el valor ecológico o social no es muy alto y/o cuando la infraestructura se puede relocalizar en una zona segura, por ejemplo, detrás de la duna. En estos casos, se asume que, a corto plazo, se tendrá una pérdida de activos. Sin embargo, permitir que una playa encuentre un



Casas abandonadas al quedar cubiertas por arena. Fotografía: Debora Lithgow

nuevo estado de equilibrio es una solución sostenible en el mediano y largo plazo. Este tipo de soluciones siempre deben ser implementadas en conjunto con estrategias para evitar o mitigar los posibles conflictos de intereses y de percepción social.

El manejo adaptativo también es aplicable en costas donde aún no se han establecido construcciones. En estas costas conservadas, se puede evitar el daño ambiental, social y económico a través de reglamentación y ordenamiento territorial.

El éxito del manejo adaptativo está fuertemente ligado al monitoreo de la playa y de los procesos geomorfológicos e hidrometeorológicos que la gobiernan.

Si el proceso de erosión es de origen antrópico:

- Se debe valorar la posibilidad de restablecer los flujos de arena,

posiblemente, con la remoción de infraestructura o la interrupción de las actividades humanas.

- La construcción de nueva infraestructura con o sin rellenos artificiales solo podrá estar justificada si previamente se demuestra que no es factible restablecer los equilibrios dinámicos de la playa (ver Capítulo 5). |



Playa de la estación biológica CICOLMA, donde la infraestructura esta detrás de las dunas. Fotografía: Oscar Jiménez

I Capítulo 2.

BUENAS PRÁCTICAS Y SOLUCIONES SUAVES

I SITIOS CON VEGETACIÓN DUNAR

La vegetación nativa de dunas estimula el crecimiento de dunas, atrapando y estabilizando la arena que es transportada por el viento. Cuando de manera natural se presenta vegetación, se reduce la velocidad del viento por fricción y como consecuencia directa disminuye notablemente la capacidad de transporte de arenas.

En general, la protección de las zonas con vegetación es esencial, particularmente en las zonas ubicadas por encima del nivel de máximo ascenso del oleaje.

Las especies de dunas son las únicas plantas que toleran e incluso mejoran su crecimiento cuando son enterradas por arena. Es por ello que estas plantas son

ideales para sembrar en estos ambientes en caso de requerirse algún tipo de actuación para estabilizar la playa.

PLAYAS SIN SUMINISTRO DE ARENA

En playas con suministro escaso de arena, es recomendable proteger la vegetación con cercas y pasarelas elevadas, evitando así que se transite sobre ésta. También se debe procurar que el movimiento de arena desde y hacia el mar se conserve. Se deben utilizar especies de plantas *psamófilas*, es decir, que tienen la capacidad de tolerar el enterramiento con arena y que incluso crecen más cuando son cubiertas por ésta. Estas especies son las formadoras de dunas por excelencia.

VEGETACIÓN SIN APORTACIÓN ARTIFICIAL DE ARENA

En lugares con erosión severa, se debe emplear un conjunto de estrategias combinadas para ayudar a resolver el problema de erosión. Una de estas acciones es proteger a la vegetación nativa. Esto se puede hacer de muchas maneras, por ejemplo, es recomendable construir estructuras, preferentemente de madera, que permitan el acceso a la playa sin interferir con las dunas y su vegetación (ver ejemplo Figura 2).





Figura 2. Acceso a la playa mediante una pasarela de madera. Fotografía: CC0 Public Domain.

VEGETACIÓN CON RELLENO DE ARENA

En la Figura 3 se presenta un ejemplo de proyecto de restauración de dunas en Estados Unidos. Este ejercicio necesitó de un relleno artificial de la playa y la reconstrucción de la duna.

En playas con dunas donde la vegetación fue removida y/o se implementó algún relleno con arena, es conveniente realizar medidas complementarias como el trasplante o sembrado de vegetación nativa de playas y dunas. Dicha vegetación debe provenir del mismo sitio o de sitios cercanos que sirvan como referencia.

En todos los casos se debe retirar/prohibir la introducción de especies exóticas o invasoras. Siempre se deben preferir las especies psamófilas, es decir adaptadas a suelos arenosos.

RESTAURACIÓN DE DUNAS COSTERAS

La restauración ecológica tiene como objetivo reparar y/o recuperar ecosistemas naturales que han sido degradados. Es decir, sistemas naturales que han sufrido alteraciones en su estructura. Dichas modificaciones son relevantes porque les impiden funcionar adecuadamente. Por lo tanto, su resistencia a futuros eventos o perturbaciones queda comprometida.

De acuerdo con la intensidad y el tipo de degradación, los ecosistemas pueden recuperarse total (restauración) o parcialmente (rehabilitación).

La meta principal de la restauración es tratar de revertir los procesos de deterioro de origen humano y, ocasionalmente, de origen natural, cuando el disturbio fue extremadamente intenso.



Figura 3. Duna restaurada vista desde la cima (derecha) y desde el frente (izquierda). Fotografía: Teri Frady para la NOAA

De acuerdo con la Sociedad para la Restauración Ecológica (SER, por su nombre en inglés), la restauración es una actividad que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema. Estas acciones están dirigidas hacia la recuperación de la salud, la integridad y la resiliencia del ecosistema, en este caso, el binomio playa-duna. La salud abarca procesos como el ciclo hidrológico o los de nutrientes; la integridad de la composición de especies y la estructura de la comunidad; mientras que la resiliencia se refiere a la resistencia a los disturbios y la capacidad de recuperación después de ellos (SER, 2004).

La restauración de un sistema dunar puede ser de dos tipos: pasiva o activa. La primera requiere poca intervención humana y se basa en permitir que el sistema dunar se recupere por medio de sus propios procesos naturales una vez que la fuente

del disturbio fue eliminada. Por ejemplo, después de un huracán, las dunas pueden desaparecer. Sin embargo, esto es parte de su dinámica natural. Las plantas de dunas están adaptadas a ello y se recuperan solas.

Cuando se decide que la vegetación puede recuperar sola, se deben colocar señalamientos que indiquen que está en una fase de regeneración y dar el tiempo necesario. No se necesita riego ni fertilizantes. Las plantas crecerán solas en poco tiempo. El viento puede tirar las hojas de especies como los palmares de coco e impedir que las plantas de dunas embrionarias tengan acceso a la luz, en cuyo caso, el retiro de las hojas es una acción que favorece la regeneración natural.

En contraste con lo anterior, la restauración activa necesita de diversas acciones impulsadas y controladas por el ser humano, las cuales se describen a continuación.

En el Cuadro 1 se muestran las diferentes técnicas de recuperación de ecosistemas, así como los alcances de cada una en relación con las tres características básicas de un ecosistema (salud, integridad, resiliencia).

Un ejemplo del proceso de restauración de vegetación de dunas se ilustra en la Figura 4.

La restauración activa es mucho más compleja y costosa que la restauración pasiva. Por lo tanto, sólo se recomienda implementar cuando:

a) El nivel de degradación es muy severo, natural o antropogénica, y no puede recuperarse por sí misma.

b) La degradación fue originada por acciones humanas.

c) Existen elementos que facilitarán la restauración. Por ejemplo, disponibilidad de arena, cercanía a fuentes de propágulos de especies de playa o duna. Además debe considerarse el nivel de conservación del paisaje en el entorno del sitio a restaurar porque se usará como referencia para elegir las especies de plantas a recuperar.

d) La restauración es urgente porque compromete los intereses de las comunidades humanas cercanas.

e) En la región se cuenta con las capacidades técnicas para emprender un proyecto de restauración.

f) Existen recursos económicos, gubernamentales o privados, que se pueden invertir en la restauración.



Rehabilitación de una playa para disminuir el impacto de tormentas. Fotografía: New York District, U.S. Army Corps of Engineers, CC-BY-SA-2.0

Cuadro 1. Técnicas de recuperación de ecosistemas y alcances de cada una en función de la salud, integridad y resiliencia de los ecosistemas.

Efectos/Acciones		Restauración	Revegetación	Rehabilitación	Reemplazo
		Recuperación de trayectoria histórica del ecosistema	Reforzamiento para que el sistema se auto-regenere	Recuperación parcial del ecosistema	Retorno a un ecosistema productivo pero distinto del original
Recuperación de salud	Ciclos biogeoquímicos	Muy buena	Muy buena	Buena	Baja
	Interacciones bióticas	Muy buena	Buena	Media	Baja
Recuperación de integridad	Composición de especies	Muy buena	Buena	Buena	Baja
	Estructura del ecosistema	Muy buena	Buena	Baja	Media
Sostenibilidad	Capacidad de resistencia a la perturbación	Muy buena	Muy buena	Baja	Baja
	Capacidad de auto-regeneración	Muy buena	Buena	Baja	Baja



Figura 4. Restauración de dunas costeras. Fotografía: Viriditas, CC-BY-SA 3.0.

PASOS BÁSICOS PARA RESTAURAR DUNAS COSTERAS

Antes de iniciar cualquiera de las acciones de restauración antes mencionados, se necesita hacer un diagnóstico de la zona a intervenir.

Entre las características del sitio que deben ser descritas antes de iniciar cualquier acción de restauración están:

- Conocer la dinámica de la costa
- Determinar si existe una fuente de arena disponible para la construcción de dunas.
- En caso de que no exista una fuente de arena cercana, se debe considerar que las acciones de restauración de playa o de duna no posibles. En estos casos, otras alternativas, como la rehabilitación, deben ser evaluadas.

En la Figura 5 se ilustra una de las técnicas para la construcción artificial de dunas en Playa de Varadero, Cuba, entre los años 2001 y 2003 (Martell, 2013). En el ejemplo, se incluyen los planos con el diseño en planta, de frente y transversal; la protección de la infraestructura, el uso de maquinaria para la construcción de la duna y la revegetación de la misma.

A grandes rasgos, la restauración de sistemas dunares se consigue a través de seis pasos básicos (Ley-Vega *et al.* 2007):

- Eliminación a control de las fuentes de degradación
- Recuperación topográfica
- Recuperación de la vegetación (cuando es necesario)
- Protección del sitio
- Divulgación
- Seguimiento a largo plazo

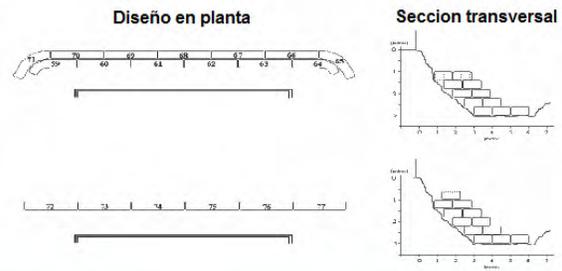


Figura 5. Creación de dunas con núcleo rígido utilizando bolsas geotextiles rellenas de arena, para la protección de instalaciones costeras en la playa de Varadero, Cuba (Tomada de Martell, 2013).

I ALGAS Y PASTOS MARINOS

ALGAS Y PRADERAS DE PASTOS MARINOS

Estos organismos ofrecen una protección natural contra la erosión de las playas, al igual que la vegetación dunar, ya que disminuyen la intensidad de las corrientes y oleaje.

La dinámica del fluido en la columna de agua es afectada principalmente por las formas de los brotes y hojas de los pastos marinos. Las velocidades del flujo son reducidas dentro del dosel debido a los efectos de fricción que causa la vegetación y provoca deflexión en las corrientes y la pérdida del *momentum* (cantidad de movimiento) dentro del dosel. Estos efectos de reducción del flujo ocasionado por las estructuras emergentes de los pastos marinos son de gran importancia para el funcionamiento de los ecosistemas (ver Figura 6).

Dependiendo de la especie de pasto marino, la velocidad de la corriente puede ser de 2 a 10 veces más lenta, que afuera de una pradera de pastos.

Las obras y actividades humanas no deben modificar directa o indirectamente la estructura y función de estas comunidades vegetales marinas.

Siempre debe considerarse que la hidrodinámica condiciona a los pastos marinos de muchas maneras, por ejemplo, en la obtención de nutrientes provenientes del sedimento, en la polinización de sus flores, en el transporte de materia orgánica adyacente al sistema, en la atenuación



Figura 6. Aspecto de rizomas y hojas de *Thalassia testudinum*, Puerto Morelos, México. Fotografía: Rodolfo Silva.



Pasto marino en el Golfo de México. Fotografía: James St. John

de la luz para la fotosíntesis y hasta a los organismos bénticos que dependen de la estructura de estos hábitats. De modo que la dinámica de los fluidos es muy importante en la biología, ecología y ecofisiología de los pastos marinos.

ALGAS Y PASTOS ARTIFICIALES

El sembrado de algas y pastos artificiales para incentivar la retención de sedimento es una de las alternativas en desarrollo tecnológico. Esta alternativa es alentada, principalmente, por el bajo impacto paisajístico y ambiental de la colocación de los colchones que forman campos de algas y/o de pastos marinos. Estos sistemas, buscan atenuar la energía del oleaje y con ello disminuir el transporte de sedimentos. Además de la protección, las algas y pastos marinos son el hábitat para otras especies y proveen diversos servicios ambientales.

En general, el costo de esta alternativa es bajo. Sin embargo, en las primeras fases de crecimiento pueden requerir mantenimiento frecuente. Cabe resaltar que la superficie que cubren los pastos marinos se está reduciendo a nivel mundial por razones principalmente antrópicas. En la Figura 7 se ilustra un tipo de pasto marino artificial desarrollado en la UNAM (Mendoza *et al.* 2012).

En virtud que la siembra y/o restauración de praderas de pastos o campos de algas puede ser muy lenta, la reducción de la hidrodinámica local con elementos artificiales puede favorecer el establecimiento de individuos naturales.

SIEMBRA DE ALGAS Y PASTOS MARINOS

En la naturaleza existen varias especies de algas y pastos marinos que pueden ser sembrados para aumentar la fricción sobre las corrientes y el oleaje, además de fijarse y establecer un sustrato más estable que el que ofrece la arena por sí misma. Este tipo de metodologías ha probado ser una buena solución o, al menos, un buen complemento en zonas relativamente abrigadas. Además de la protección, las algas y pastos marinos ofrecen hábitat para otras especies, aumentando la biodiversidad y los servicios ambientales. En México hay especies de pastos marinos que habitan en las lagunas costeras y otras son comunes en aguas abiertas.

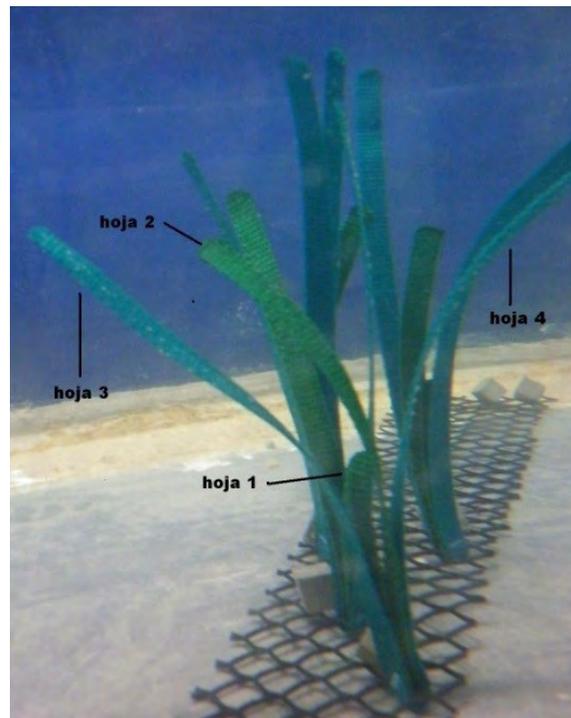


Figura 7. Modelo de pasto marino desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Si las condiciones del sitio son adecuadas, puede ser suficiente con un control parcial de las condiciones hidrodinámicas para que estas especies se establezcan sin la intervención del hombre.

Un ejemplo se tiene en Puerto Morelos, Quintana Roo, México, en las inmediaciones del Hotel Now Jade (ver Figura 8).

I SITIOS CON PRESENCIA DE ARRECIFES

Los arrecifes coralinos saludables son uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad y económicamente más valiosos en la tierra por los servicios ecosistémicos que proveen. Los corales son una fuente de alimento para millones de organismos. Además, proveen servicios ecosistémicos como el de protección contra tormentas: el recreativo que fomenta el turismo y es una fuente de ingreso para las comunidades locales (Figura 9). También, son de gran importancia cultural en muchas partes del mundo y son uno de los ecosistemas más afectados por el cambio climático y la acidificación de los mares.

Las obras y actividades humanas nunca deben modificar directa o indirectamente la estructura y función de las zonas de arrecifes coralinos o rocosos. Tampoco se debe modificar la calidad de agua de dichas zonas.

Aun así, cuando se planea un afectación, se debe realizar un análisis cuidadoso del costo que significa perder los servicios ecosistémicos antes mencionados.



Figura 8. Establecimiento de pastos marinos en las inmediaciones de un arrecife artificial en Puerto Morelos, Quintana Roo, México.



Figura 9. En la imagen superior, vista aérea del arrecife de Cancún (Fotografía: S. Ata. Safizadeh, CC BY 3.0) y en la imagen inferior, aspecto del sistema arrecifal en Punta Nizuc, Quintana Roo, México (Fotografía: Jerry Reid para U.S. Fish and Wildlife Service WO-3540-CD42A)

En costas abiertas se requiere la plantación de áreas lo suficientemente extensas y de condiciones que favorezcan el crecimiento de las algas y pastos para que puedan constituir una opción viable en zonas con problemas de erosión. En costas abiertas con procesos erosivos severos esta técnica puede no ser recomendable si se considera el tiempo de crecimiento que necesitan estas especies para madurar.

I DEFENSA Y FORMACIÓN DE DUNAS

La construcción de cercas semipermeables, con alturas del orden de 40 a 120 cm, fabricadas con pequeñas estacas separadas entre sí unos centímetros, preferentemente de madera, a lo largo de la cara hacia el mar de las dunas, fomenta el depósito de arena transportada por el viento y reduce el pisoteo de la vegetación existente o trasplantada (Figura 10).

La ubicación más apropiada de las cercas semi-permeables en las playas es un poco arriba del nivel de ascenso máximo del oleaje. Además, en condiciones de erosión severa se debe considerar el sembrado de vegetación, como medida complementaria.

En esos casos, aunque su costo es muy bajo, necesitan mantenimiento frecuente. Por otro lado, tienen un impacto ambiental mínimo. También, pueden ser utilizadas para delimitar los accesos a la playa.

Los únicos inconvenientes que tienen las cercas son que así como retienen arena y disminuyen el transporte por viento, también retienen basura. Asimismo, estas estructuras no son resistentes a los embates de tormentas ni marejadas severas.



Figura 10. Estabilización de dunas utilizando cercas semipermeables. Pensacola, Florida. Fotografía: Marisa Martínez

Las obras y actividades desarrolladas en las dunas costeras deben cumplir con los siguientes lineamientos, criterios y especificaciones (ver SEMARNAT, 2013):

- En el diseño y construcción de obras se debe evitar afectar el hábitat de las especies, en particular aquellas enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010; sitios Ramsar; las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS); las Regiones Prioritarias Marinas, Terrestres e Hidrológicas y las Áreas Naturales Protegidas Federales y las Áreas Protegidas Estatales.

- Las obras deben localizarse detrás del primer cordón de dunas, en zonas donde no hay acumulación de arena, y por lo tanto, no hay sistemas de dunas. Aquí, el suelo ya no es arenoso por lo que las construcciones estarán mejor fincadas. Además, las obras antes mencionadas deben ser establecidas por encima del nivel máximo del agua.

Establecer la estructura por encima del nivel máximo del agua, aumenta la protección contra inundaciones. Una alternativa es la construcción de infraestructura siguiendo las recomendaciones que se exponen en el Capítulo 4.

- Mantener los corredores biológicos para el funcionamiento y la conectividad de las dunas costeras.

- Los accesos a la playa deben incluir andadores que permitan a los visitantes acceder a la playa sin afectar el movimiento de la arena ni a las especies características de las dunas.

- En las playas y dunas embrionarias únicamente pueden implementarse acciones que estén encaminadas a lograr la regeneración o rehabilitación de dunas. En estos casos, siempre debe usarse material sedimentario compatible con el nativo.

- En las dunas primarias que han sido estabilizadas con vegetación,



Pasarela elevada que conduce a los visitantes hasta la playa. Fotografía: Neleh Roberts,CC-BY-SA-0

se debe garantizar que la dinámica natural del transporte sedimentario no sea modificada. En estas zonas puede haber construcciones de madera o material degradable y piloteadas. Ejemplo de estas estructuras son las casas tipo palafito o andadores elevados mostradas en el Capítulo 4. Dichas estructuras, deben colocarse detrás de la cara posterior del primer cordón de dunas y evitando la invasión de la cresta de estas dunas.

- En dunas secundarias ubicadas en sitios expuestos y formadas por material no consolidado, las construcciones deben ser similares a las de las dunas primarias. Es decir, biodegradables y piloteadas. Además, deberán ubicarse detrás del primer cordón.

- El pilotaje debe seguir los siguientes requisitos:

a) Ser superficial (hincado a golpes) y no cimentados.

b) Se deben considerar los datos sobre el patrón de vientos en el sitio con el fin de evitar posible erosión local.

c) La orientación de las edificaciones debe disminuir la superficie de choque del viento.

- En la evaluación de impacto ambiental de obras sobre dunas, se deberá demostrar, ante la autoridad ambiental correspondiente, la capacidad de resiliencia del sistema ante eventos hidrometeorológicos normales y extremos.

- El tránsito vehicular dentro de cualquier desarrollo turístico y/o inmobiliario turístico debe realizarse fuera de la zona de dunas. Especialmente, se evitará transitar sobre hondonadas.



Casa en la cara posterior de la duna. Fotografía: Paul Brennan, CC-BY-SA-0

Actualmente, la resistencia y resiliencia de un sistema puede ser evaluado a través de diversos métodos como: fotografías, imágenes satelitales y levantamientos topobatemétricos históricos. Con estas herramientas, se pueden registrar las condiciones previas y posteriores al impacto de una tormenta. Además, se puede evaluar la velocidad de recuperación de un sistema dado. Para ello, será necesario tomar en cuenta diversos aspectos como:

- a) Tipo de vegetación y porcentaje de cobertura de las especies de plantas presentes en las dunas.
- b) Tipo de sedimento. Se debe evaluar la disponibilidad de arena en el sistema y sus características: textura y tamaño de grano.
- c) Contenido de carbonato de calcio.
- d) PH de la arena.
- e) Velocidad de infiltración.

I RELLENOS DE PLAYA

El relleno implica la importación de arena o grava para mitigar las pérdidas asociadas a la erosión o para regenerar una playa artificialmente. Al respecto, se deben considerar dos tipos de acciones claramente diferenciadas:

RECICLADO DE ARENA

Esta técnica se aplica cuando:

- a) La erosión no es temporal
- b) Es una situación de emergencia
- c) El viento puede transportar la arena tierra adentro y;
- d) Existe un exceso de arena en canales de navegación, áreas portuarias, etc.

El reciclaje local de arena por medios mecánicos, desde zonas de acumulación hacia las zonas de erosión, pueden ser una alternativa eficaz para atacar la erosión.



Relleno de playa. Fotografía: Ann Cameron Siegal para U.S. Army Corps of Engineers

En general, el reciclaje de arena es una solución que se puede implementar en cualquier área.

Algunas de las ventajas de esta técnica son: a) costos moderados porque la arena proviene de una o varias áreas cercanas; b) tiene muy buena eficacia a corto plazo; c) acelera los beneficios naturales de una recuperación; d) elimina los problemas asociados con el uso de material proveniente de otros sitios para acciones de alimentación.

Sin embargo, la transferencia de problemas de contaminación debe ser evitada. Debe ponerse especial cuidado cuando la arena es llevada desde un recinto portuario o desde zonas con descargas de agua contaminada.

REGENERACIÓN DE PLAYAS

La regeneración de playas puede involucrar el reciclado de arena y de grava. Como se mencionó anteriormente, debe usarse material local o de zonas cercanas.

Además, se necesitan diseñar estrategias específicas para cada playa intervenida. En especial, si se decide implementar un proyecto de recuperación que involucre sistemas de alimentación.

La cantidad de material, arena o grava, necesario para regenerar una playa puede variar de un sitio a otro. Por ejemplo, la recuperación de un área pequeña podría necesitar pocos camiones de arena. En contraste, playas de grandes extensiones pueden necesitar hasta varios millones de metros cúbicos. En el último caso, se requiere el suministro de arena dragada del fondo marino.

En la Figura 11 se muestra una regeneración con repetidos rellenos han sido necesarios para mantener una playa turística en Cancún, México (Silva *et al.*, 2012).



Figura 11. Vista de la ejecución de los trabajos de alimentación artificial de arena en la playa de Cancún (año 2006, draga Barent Zanen de la compañía Royal Boskalis Westminster).

En todos los casos de regeneración de playas, se debe tener cuidado con que la explotación de los bancos no ocasione daños irreversibles a los ecosistemas circundantes.

El material extraído de los bancos de explotación, grava o arena, debe estar libre de partículas finas que puedan quedar suspendidas en el agua y afectar a los ecosistemas adyacentes.

La calidad de la arena de explotación y la nativa, deben tener características físicas compatibles (ej. tamaño, forma y color).



Draga Barent Zanen. Fotografía: CC0 Public Domain

I DRAGADOS

En los dragados, se deben implementar medidas para evitar la dispersión del sedimento, la disposición inadecuada del material dragado y la afectación de los ecosistemas costeros presentes en el sitio. Esta situación es especialmente crítica en los dragados de lagunas costeras en las que se busca desazolvar y donde frecuentemente el producto del dragado se deposita sin ningún estudio y con frecuencia regresa rápidamente a la laguna alterando la dinámica de la boca. Más aún, se debe prohibir que los sedimentos se coloquen mar adentro ya que se genera un déficit de arena en el balance sedimentario.

La anterior recomendación se suma a las previsiones y autorizaciones en su caso, que establezca la SEMAR de acuerdo a sus atribuciones en la Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas.

I CONSTRUCCIÓN DE MARINAS

Para la construcción de marinas se debe aprovechar la morfología natural de la costa y elegir un área protegida de oleaje y vientos, como una bahía o entrada de agua y usar en todos los casos una estructura piloteada o flotante, evitando en todo momento que la infraestructura fraccione las celdas litorales, afecte arrecifes o humedales.

I SITIOS DE ANIDAMIENTO DE TORTUGAS

En relación con los posibles efectos de actividades humanas sobre las tortugas marinas, en los casos de playas alimentadas artificialmente, es fundamental evitar:

- a) La presencia excesiva de limos, arcillas y partículas de conchas con

una distribución espacial pobre de los granos de arena.

b) Pendientes del relleno de construcción muy peraltadas ya que la nueva playa quedaría:

- Propensa a la información de pendientes abruptas, lo cual bloquea físicamente el acceso a las zonas de anidación.

- Muy compacta, lo que, en el mejor de los casos, modifica la geometría de la cámara-nido y altera el ocultamiento de la misma y en el peor, ni siquiera permite la excavación de dichos nidos.

- Proclive a variaciones extraordinarias en el contenido de humedad, reflexión solar y conducción térmica, lo cual puede afectar la anida-

ción, el éxito de eclosión y la aptitud de las crías.

- En las zonas de anidamiento de tortugas se debe prohibir cualquier actividad que modifique la pendiente natural, grado de compactación y propiedades fisicoquímicas de las arenas de las playas y dunas.

Aunque, el relleno de playa es más recomendable que otras soluciones de regeneración, en ocasiones en playas turísticas, el manejo de los nidos de tortugas es muy complejo. Por ejemplo, en Cancún, los corrales de tortugas quedaron destruidos después de una intervención de emergencia tras el huracán Dean. Es por ello que estas acciones deben estar acompañadas por labores de concientización ambiental como la que se ilustra en la Figura 12. |



Figura 12. Esfuerzos de recuperación de tortugas que involucran tanto a los cuidadores como a la población. En el fondo a la izquierda se observa el corral utilizado para proteger a los nidos de los depredadores. Fotografía: Marisa Martínez

I Capítulo 3.

OBRAS DE PROTECCIÓN

COSTERA

Las estructuras de protección costera tales como muros, espigones y rompeolas, solo deben establecerse cuando exista una justificación. Por ejemplo, la existencia de población en riesgo. Además, se deben prevenir impactos ambientales y en la dinámica costera y; evitar la transferencia de los problemas de erosión a playas vecinas. La autoridad ambiental siempre debe considerar la información sobre la dinámica costera, las características hidrodinámicas y batimétricas del sitio para la evaluación de impacto ambiental. Siempre debe existir un estudio que demuestre el funcionamiento de la obra, incluyendo el mantenimiento del intercambio de agua y sedimentos entre las lagunas y el mar en el caso cualquier obra civil costera (Capítulo 5).

A continuación algunos requisitos para la construcción en ecosistemas costera:

- En zonas de humedales con vegetación diferente a manglar, las estructuras deben ser piloteadas (Capítulo 4) para no alterar la dinámica de flujo de agua superficial y subterránea, el libre movimiento de los organismos o del sedimento, preservándose el equilibrio dinámico de las condiciones de salinidad. Para construcciones en manglar, se debe acatar el Artículo 60 TER de la Ley General de Vida Silvestre (NOM-022-SEMARNAT-2003).

- En obras colocadas en la parte marina del litoral, se debe mantener el balance sedimentario longitudinal para evitar la erosión en otras zonas.

- Las obras en cuerpos lagunares deben ser piloteadas o flotantes para no afectar el libre movimiento de los organismos ni la dinámica hidrosedimentaria del sitio.

- En la parte terrestre del litoral, así como aquellas obras que pretendan ganar terreno al mar, se deben considerar los posibles efectos sobre el transporte de sedimentos a lo largo del litoral, hacia los distintos tipos de humedales y hacia tierra adentro para minimizar su impacto.



I ESTRUCTURAS DE BOLSAS DE GEOTEXTIL

Las bolsas de geotextil están rellenas de arena, pueden ser de varios tamaños. Las estructuras de este material pueden utilizarse para formar arrecifes, diques, espigones, revestimientos en las playas de arena o promontorios temporales.

Las bolsas deben ser fabricadas con un geotextil resistente que luego son llenadas con arena de la playa que se está protegiendo. Por lo tanto, estas estructuras tienen un costo relativamente bajo pero una vida útil que normalmente no supera los cinco años. Son estructuras temporales con requerimientos técnicos de fabricación muy accesibles y, cuando ya no son necesarias, la arena es devuelta a la playa.

Por otro lado, tienen el inconveniente de ser muy vulnerables al vandalismo y al rápido deterioro debido a la acción del oleaje, luz solar y potenciales accidentes de embarcaciones.

En la Figura 13 se ilustra un tipo de geobolsas muy utilizadas en condiciones de emergencia, en este caso, las estructuras que se emplearon después del impacto de Katrina en Nuevo Orleans, EEUU.

Cuando se considere su implementación, debe tomarse en cuenta que las bolsas de geotextil son estructuras prácticamente impermeables, lo que provoca reflexión del oleaje y por consiguiente, se pueden presentar problemas de socavación. Su uso es recomendable en condiciones de emergencia y con carácter temporal.



Figura 13. Ensayos en el Laboratorio de Ingeniería de Costas y Puertos de la UNAM.



Bolsas de geotextil utilizadas para la regeneración de una playa. Fotografía: Axis Ingeniería

I GAVIONES

Los gaviones son cestas de malla de alambre llenas que pueden ser rellenas de cantos rodados o de rocas de tamaño pequeño, son fabricadas en la playa que necesita ser protegida. Frecuentemente, para su elaboración, se utilizan materiales disponibles localmente. Por lo tanto, estas estructuras tienen un costo relativamente bajo.

Debido a que los gaviones son flexibles y porosos, dependiendo de su ubicación, son capaces de disipar parte de la energía del oleaje y de la energía eólica.

Los gaviones, normalmente, se colocan en forma piramidal y se pueden utilizar como arrecifes, diques, espigones, encauzamientos, muros de contención, revestimientos costeros o promontorios rocosos (Figura 14).

El diseño mecánico y geométrico de estructuras fabricadas a partir de gaviones, está limitado por las fuerzas que se generan en temporales de media a alta intensidad.

La vida útil de estos elementos, especialmente en zonas costeras, es relativamente corta.

Los gaviones pueden durar hasta 10 años por lo que no se recomienda usarlos para periodos de retorno de más de 5-10 años.

Están fabricados de alambre y están expuestos al agua salada, se oxidan y son antiestéticos así como peligrosos. En consecuencia, su utilización en zonas de recreo debe ser muy limitada.

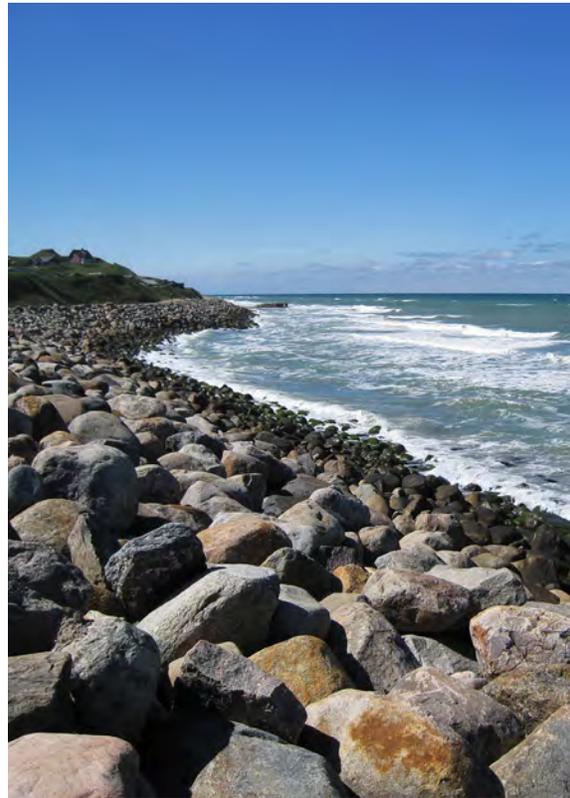


Figura 14. Gaviones utilizados para la defensa de la costa. Fotografía: Hugh Venables (derecha); J Thomas (izquierda), CC BY-SA 2.0

I PROTECCIÓN ARTIFICIAL DE DUNAS

Se trata de la colocación de promontorios de rocas (naturales o artificiales) contruidos al pie de las dunas para proteger sitios estratégicos y permitir que los procesos naturales continúen en el resto del sistema playero (Figura 15). Construir estas estructuras es menos costoso que proteger toda la duna y se logra salvaguardar la infraestructura de interés o zonas en riesgo.

Es una opción de rápida implementación con mantenimiento moderado a bajo costo; pueden combinarse con otras alternativas; son visualmente intrusivas y sólo controlan la erosión en áreas muy localizadas y con el riesgo de transferirla a otros segmentos de la playa.



Protección de playa y duna con rocas naturales. Fotografía: Assy CC-BY-SA-0



Figura 15. Protección artificial de dunas en la Isla de Sylt, Alemania. Fotografía: Kerstin Herrmann CC-BY-SA-0

I ARRECIFES ARTIFICIALES

Los arrecifes artificiales son estructuras permeables, normalmente fabricadas a base de rocas naturales o piezas artificiales de concreto.

Estas estructuras se colocan paralelas a la costa y coronadas por debajo del nivel medio del mar. Dependiendo del tipo de problema que se quiera resolver con estas estructuras, pueden ser construidas para que trabajen individualmente o en serie.

Actualmente, los arrecifes artificiales son una de las soluciones más empleadas en el mundo porque, en comparación con otras estrategias, ocasionan poco impacto en el paisaje costero. Además, la implementación de estos sistemas tiene el valor agregado de funcionar como corredor entre fragmentos de arrecifes naturales y de incentivar el reforzamiento de otros ecosistemas costero-marinos (Figura 16).

Para el diseño de arrecifes artificiales se deben considerar: El diseño e implementación tienen un costo que va de moderado a alto; en algunas ocasiones, dependiendo de su ubicación, se requieren medidas para lograr el mantenimiento de la playa elevando los costos significativamente.

En ocasiones pueden incentivar zonas de erosión, sin embargo, si están bien diseñados generan una zona de abrigo adecuada. Debido a su sumergencia relativa (normalmente próxima al nivel medio del mar) pueden ser peligrosas para la navegación y en condiciones de marea de tormenta, su efectividad disminuye considerablemente.



Figura 16. Arrecifes artificiales frente al Hotel Now Jade, Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

I ESPIGONES

Son obras perpendiculares a la costa cuyo objetivo es interrumpir el transporte longitudinal de sedimentos, propiciando que la propia dinámica litoral genere un tramo de costa adicional allí donde ha habido erosión o bien donde nunca ha existido (Figura 17).

Se trata de una medida muy utilizada, aunque hay que prever que generará una erosión costera en sus inmediaciones, normalmente muy severa, centrándose en este caso aguas debajo de su ubicación con respecto al oleaje predominante.

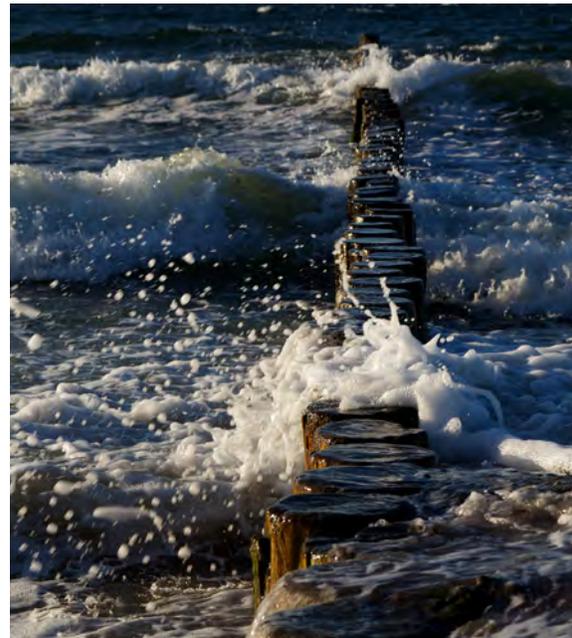
Es por ello que difícilmente se utiliza uno de estos elementos de forma aislada, siendo lo habitual encontrarlos en grupo. En cualquier caso se debe garantizar que no exista transferencia de la erosión a otros segmentos de la playa y considerar que se reduce la calidad estética de la playa. Son normalmente una mala solución al déficit de arena en una playa.



Figura 17. Aspecto de la costa de Recife, Brasil (Tomada de Silva *et al.*, 2014b).



Estructura de madera perpendicular a la costa. Fotografía: Michael Maggs CC-BY-3.0



Estructura perpendicular a la costa. Fotografía: Beatriz Murch, CC-BY-2.0

I DIQUES EMERGIDOS

Son elementos de defensa de la costa, situados generalmente de forma paralela a ella y que dan lugar a una zona de “aguas tranquilas” en la parte abrigada. Este hecho tiene efectos directos sobre la franja de playa asociada al dique y se construyen con la idea de mantener una cierta cantidad de sedimento en la playa ubicada en la zona de abrigo o bien contribuir a su creación en aquellas zonas donde es inexistente, estando ambos fines motivados en la mayoría de situaciones por causas turísticas. Cuando estas estructuras están bien diseñadas y ubicadas, proporcionan excelentes resultados, sobre todo en el caso de que se combinen con otro tipo de medidas adicionales como por ejemplo la regeneración de dunas. Si bien, por un lado inducen la acumulación de arena en su parte trasera por otro, asociado a la concentración de energía difractada del oleaje, irán acompañadas ineludiblemente de una erosión a ambos costados de dicha zona de acreción (Figura 18).

Por el impacto visual que tienen este tipo de obras no se recomienda su uso generalizado en playas abiertas. Se debe limitar su uso en zonas de uso turístico, a la protección de áreas semi-cerradas.

Cuando se construyen en la parte intermedia de una celda litoral y no forman parte de una solución integral deben de ir acompañadas de un programa de trasvase de arena.



Figura 18. Diques emergidos en Recife, Brasil. (Tomada de Silva *et al.*, 2014a).



Protección paralela a la costa en Nayarit, México. Fotografía: Edgar Mendoza

I REVESTIMIENTOS PERMEABLES O MUROS LONGITUDINALES EN LA TIERRA

Son obras defensivas formadas por bloques de piedra o materiales prefabricados que tienen como objetivo proteger el terreno ubicado en la parte posterior del muro.

En este caso, se busca fijar un límite al avance del proceso erosivo de la playa. Es decir, no es una medida destinada directamente a la protección de ésta. Los revestimientos permeables son una medida protectora adoptada de forma transitoria que, por lo general, es reforzada con otro tipo de defensas.

La ventaja de esta estrategia es que es más económica y sencilla de ejecutar que otro tipo de opciones. Sin embargo, una de las grandes desventajas es su impacto en el paisaje y en los ecosistemas aledaños.

I REVESTIMIENTOS IMPERMEABLES Y MUROS COSTEROS

Los revestimientos impermeables en talud son estructuras continuas hechas de concreto o piedra. Se construyen a lo largo de la costa, por encima del límite del ascenso máximo del oleaje en condiciones normales (Figura 19). En las zonas vulnerables al rebase durante marea y oleaje de tormenta, se construyen defletores para reducir el rebase del agua.

Por otro lado, los malecones son estructuras verticales contiguas a la costa, normalmente cimentadas con pilotes de concreto o mampostería y diseñados para resistir el embate del oleaje de tormenta.

Fueron muy populares en el siglo pasado pero ahora se consideran estructuras costosas y no aptas para mitigar problemas de erosión.

I REVESTIMIENTOS DE MADERA

Los revestimientos de madera pueden variar desde barreras impermeables permanentes hasta barreras temporales muy permeables. Éstas se construyen para mitigar parte de la energía del oleaje sobre la zona de resaca o para consolidar dunas costeras. En México, han sido ampliamente utilizadas para la protección de costas, donde a falta de estudios técnicos, limitaciones de presupuesto o impactos de una solución rígida, han orillado a los pobladores a tomar acciones de emergencia. La flexibilidad de estas estructuras las hace multifuncionales. Los revestimientos permeables, proporcionan una barrera parcial a la energía del oleaje. Por su parte, los revestimientos impermeables sirven para otros fines como la estabilización de dunas (Figura 20).

Este tipo de soluciones puede ser viable cuando la erosión es periódica y moderada. Sus costos normalmente no son elevados y en general tienen buena aceptación social y ambiental.

Dos de sus grandes problemas están asociados a la vida útil y al hecho que, como normalmente se construyen de forma empírica, en muchas ocasiones agravan el problema en lugar de solucionarlo.



Figura 19. Revestimiento costero a base de enrocamiento. Fotografía: Storye book CC-BY-3.0



Figura 20. Revestimiento de madera. Fotografía: Colin Cubitt CC-BY-SA-2.0

I BLOQUES DE CONCRETO INTERCONECTADOS

Estas estructuras se colocan paralelas o casi paralelas a la línea de costa para separar una zona de tierra de una zona marina. El objetivo principal de un revestimiento es proteger las propiedades. A diferencia de los muros marinos, los revestimientos no tienen auto-soporte y dependen del suelo subyacente para su estabilidad. Por otro lado, reflejan las olas sobre sus superficies inclinadas y disipan la energía del oleaje sobre sus frentes. Casi todos los sistemas de bloques de interconexión están patentados, han sido conceptualizados para la protección de estuarios, riberas y la cara de terraplenes (Figura 21).

La integridad funcional depende de la estabilidad estructural del acorazamiento primario y puede construirse sobre la playa o sobre el talud de un banco estable.

Un talud inestable debe ser evaluado antes de la colocación del revestimiento. Las superficies en talud, especialmente de material rugoso, no reflejan las olas de la misma forma que las superficies verticales de las mamparas y de los muros marinos.

Un revestimiento puede causar daños a la playa frente a la estructura debido a la reflexión del oleaje, a menos de que el revestimiento se localice tan alto en la playa que éste sólo sea expuesto al oleaje durante tormentas severas.

Estas soluciones, con independencia de su costo y proceso constructivo, no son recomendables en playas de uso lúdico o para la estabilización de dunas. Además, debe considerarse que pueden casuar un impacto negativo en playas aledañas.



Figura 21. Ejemplo de bloques interconectados. Fotografía: US Army Corps of Engineers Savannah District CC-BY-SA-2.0

ROMPEOLAS FLOTANTES

Los rompeolas flotantes son utilizados en zonas en las cuales se puede demostrar que la erosión está asociada a períodos de oleaje corto. Este tipo de oleaje, es normalmente generado por el viento o por el paso de embarcaciones.

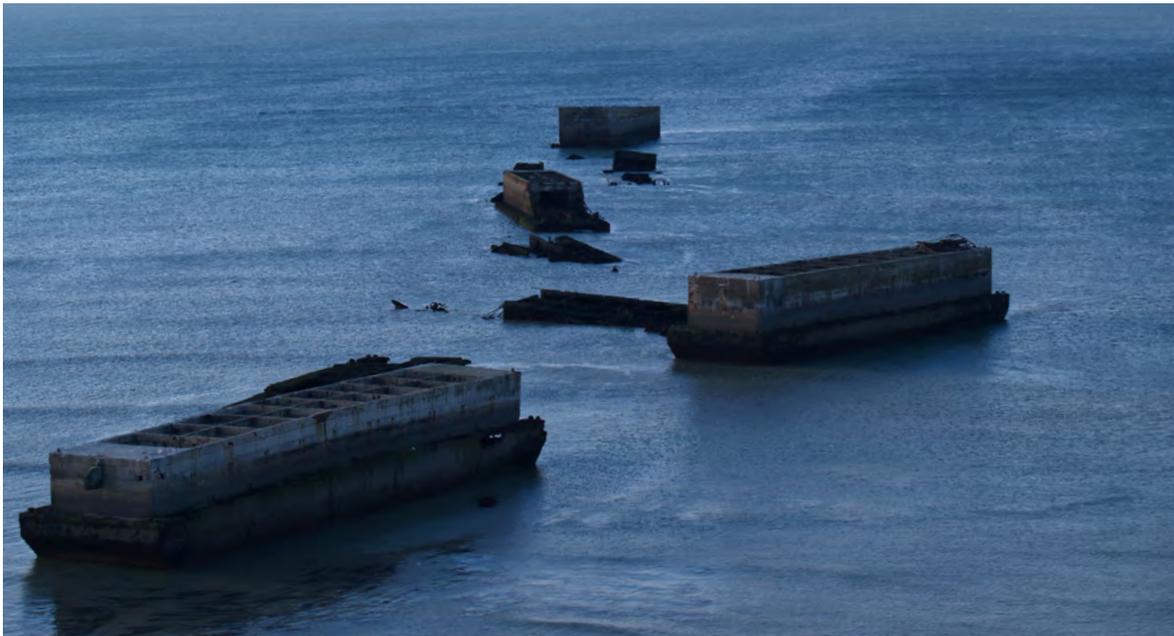
Estas estructuras flotantes suelen construirse como zona de abrigo para embarcaciones de diverso calado.

Una de las principales ventajas de este tipo de rompeolas es que tienen un impacto ambiental significativamente menor que otros tipos de rompeolas. Sin embargo, tienen un elevado costo económico.

En general, no son una solución económica, pero tienen la virtud de permitir el recambio natural de las aguas evitando su estancamiento.



Marina y rompeolas flotantes. Fotografía: Washington State Dept of Transportation CC-BY-SA-2.0



Rompeolas flotantes. Fotografía: Dennis Peeters, Public domain, via Wikimedia Commons

I OTROS SISTEMAS

Otro método de protección del litoral implica la colocación de embarcaciones o plataformas marinas paralelamente a la costa para disipar la energía del oleaje incidente.

El costo de la protección y mantenimiento son relativamente bajos, sin embargo, este método no siempre es recomendable dado que pueden ser peligrosos para la navegación recreativa y se deben tomar muchas precauciones en cuanto a los potenciales problemas de contaminación.

Existen otras técnicas y métodos, sin embargo, son sistemas que en su mayoría se encuentran en fase de experimentación o en algunos otros casos son de uso muy particular, por tanto no se abordan en este texto.



Colocación de sistema atenuador de olas Fotografía: Wave Dispersion Technologies CC-BY-SA-2.0



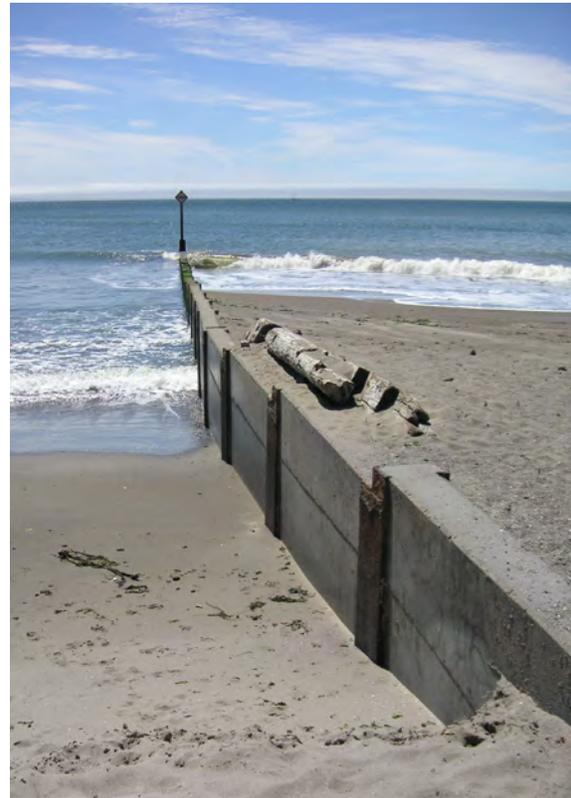
Sistema atenuador del oleaje en operación. Fotografía: Wave Dispersion Technologies CC-BY-SA-2.0

I EJEMPLOS DE OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA SOBRE LA PLAYA

Los sistemas de protección costera pueden tener efectos negativos durante su construcción y/o su operación. Actualmente, se trabaja en el diseño de las estructuras más utilizadas, rompeolas, muros, etc., para disminuir dichos impactos.

En la Figura 22 se presentan los posibles efectos negativos, sobre la línea de playa, que producen los espigones, muros verticales y los rompeolas paralelos a la costa (Silva *et al.*, 2014b).

En México, los daños más frecuentes en las playas se deben a la degradación o eliminación de las dunas frontales, primarias y secundarias o a la interrupción del transporte de sedimentos longitudinal, tal como se ilustra con algunos ejemplos en la Figura 23 y en la Figura 24. |



Estructura perpendicular a la costa. Fotografía: Beatriz Murch, CC-BY-2.0

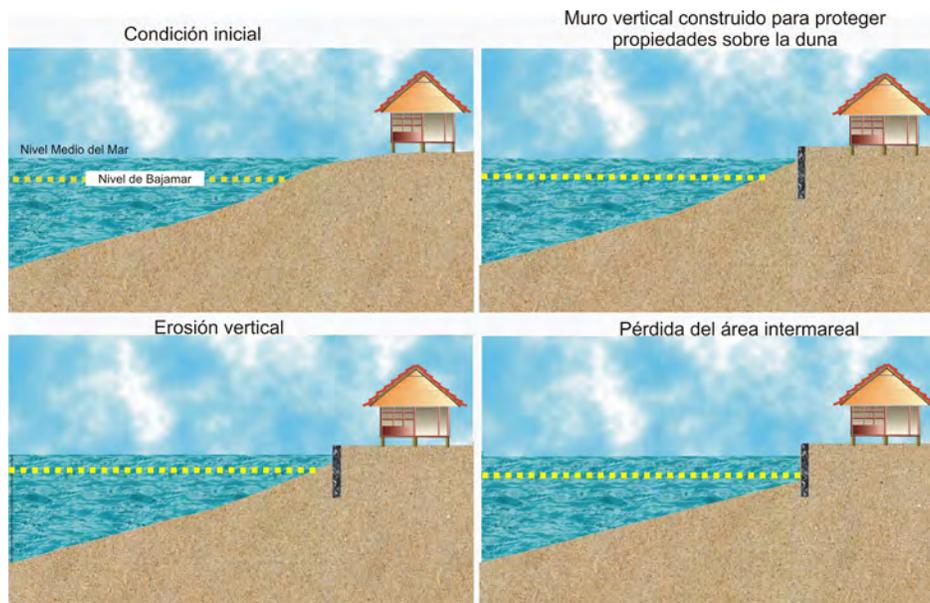


Figura 22. Evolución temporal de los efectos de la construcción de muros verticales sobre la zona de dunas. (Modificada de Silva *et al.* 2014b)

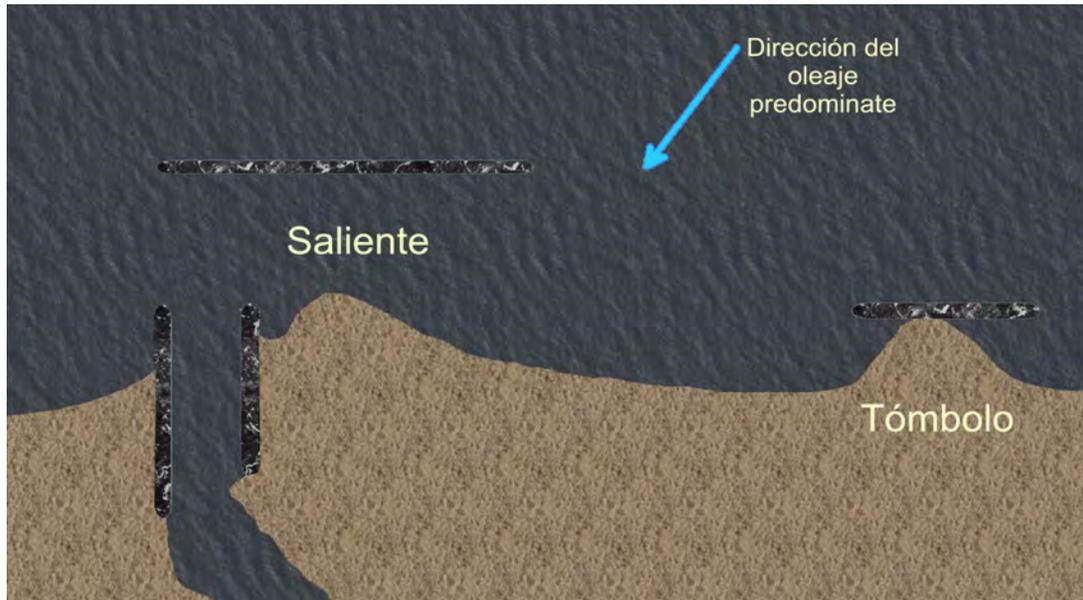


Figura 23. Efecto sobre la línea de costa de rompeolas paralelos a la costa.

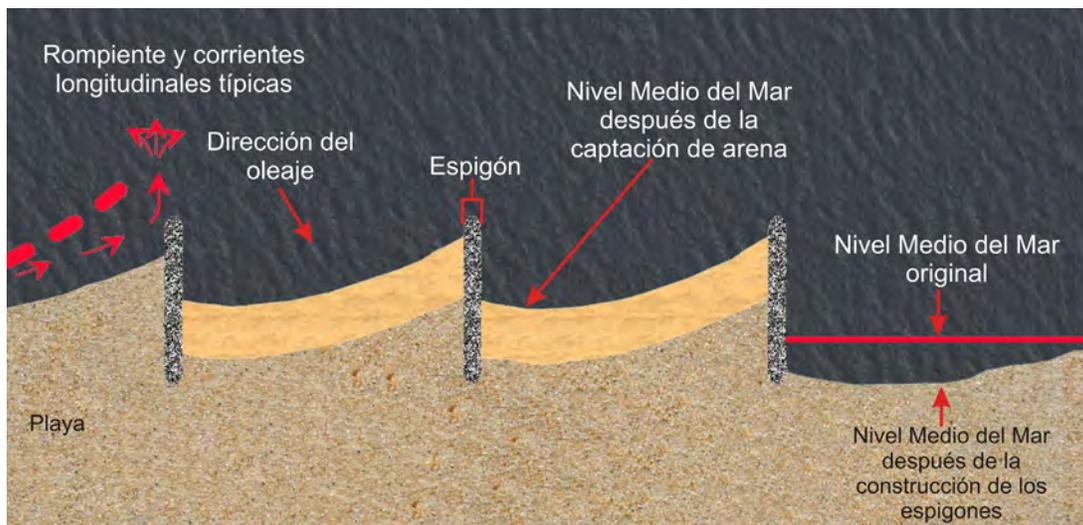


Figura 24. Efecto de espigones sobre la línea de costa.

I Capítulo 4.

CIMENTACIONES EN LA ZONA COSTERA

I INTRODUCCIÓN

Por su importancia, la cimentación de las edificaciones en zonas costeras debe diseñarse tomando en cuenta diferentes aspectos técnicos.

Los materiales utilizados en las edificaciones establecidas en zonas costeras deben ser resistentes a las condiciones del medio marino. El alto nivel de salinidad, la velocidad del viento, el impacto del oleaje, las inundaciones, entre otros. Estas condiciones medio-ambientales están estrechamente relacionadas con la vida útil de las obras costero-marinas.

Debido a los elementos antes mencionados, tanto el diseño de la obra así como la cimentación deben considerar que se

enfrentarán a procesos como la erosión y la socavación, el impacto del oleaje y las inundaciones. Estos eventos pueden ser esporádicos o frecuentes y se deben al efecto combinado de mareas astronómicas y a la marea de tormenta. Además, deben considerarse los efectos negativos de los escombros que pueden ser transportados por el agua y/o el viento.

Por lo tanto, las cimentaciones costeras deben ser diseñadas y construidas con una planificación un tanto más cuidadosa que en otros ambientes.

En las zonas del interior de la costa, donde normalmente el viento y los sismos son las sollicitaciones más importantes, los criterios para el diseño y construcción de cimentaciones están definidos. Además, son fáciles de entender por los ingenieros, arquitectos, constructores y funcionarios.

Durante décadas, en México, los reglamentos de construcción han establecido guías detalladas para el diseño, tierra adentro, de cimentaciones. Sin embargo, no se han desarrollado guías tan detalladas para construcciones en zonas costeras.

Algunos de los procesos que ocurren en la costa, como la socavación y erosión, han sido poco investigados por lo que no se han integrado en los códigos o normas.



I ASPECTOS GENERALES

Los niveles de inundación, tanto reinantes como extraordinarios deben ser determinados cuando se construya una edificación costera dentro de una zona expuesta a las oscilaciones marinas (oleaje, marea astronómica, marea de tormenta, entre otras).

Las edificaciones expuestas a inundaciones deberán resistir a las fuerzas ejercidas por los fenómenos asociados a su ubicación, permanecer libres de obstrucciones y se necesitará utilizar materiales resistentes a las inundaciones.

Por su parte, las estructuras en zonas sometidas a la acción del oleaje deben ser apoyadas sobre pilotes, columnas o muros de corte.

Es decir, las cimentaciones superficiales solo se pueden utilizar cuando se desplanten por debajo de la cota de la máxima erosión estimada del suelo.

El nivel de francobordo es la distancia vertical entre el nivel de coronación de la estructura y el nivel del mar. La dicha distancia que deberá mantenerse depende de la importancia de la construcción así como de la orientación, en relación a la incidencia del oleaje (del orden de 50 cm), de los elementos estructurales del edificio. De esta manera, se garantizará que tengan una elevación suficiente y el anclaje apropiado para resistir la flotación, colapso y movimientos laterales.

Las construcciones en ambientes costeros plantean desafíos únicos como:

- Los efectos de la marea de tormenta, el oleaje y la erosión hacen que las inundaciones costeras sean más perjudiciales que las de tierra adentro.

- El nivel de desplante de los edificios tiene que ser más elevado de lo que sería en sitios interiores para evitar las inundaciones y la acción de las olas, en especial en las zonas donde la marea de tormenta ciclónica puede infligir graves daños en los edificios.

- Las cimentaciones están expuestas al impacto de desechos que son removidos por el efecto combinado de marea de tormenta y oleaje cuando las inundaciones destruyen construcciones más débiles.

- La erosión y socavación pueden debilitar las cimentaciones.

- Normalmente las velocidades de los vientos son mayores en zonas costeras.

De tal forma que:

- La elevación de las construcciones debe ser lo suficientemente alta para evitar inundaciones.

- Las estructuras, incluyendo sus cimentaciones, deben ser lo suficientemente fuertes para resistir todas las cargas esperadas durante la condición de diseño.

- Se debe evitar la flotación, colapso y movimiento lateral de la estructura.

- Siempre se deben utilizar materiales resistentes a las inundaciones en las cimentaciones.

- La planta más baja de una construcción siempre debe estar por encima del máximo nivel de agua esperado durante la tormenta de diseño.

- La inducción de socavación y erosiones durante toda la vida útil de la construcción debe ser evitada.

- Los aumentos del nivel del mar esperados durante la vida útil de las obras deben ser consideradas en el diseño.



Casas inundadas en Haití. Fotografía: Naciones Unidas CC BY-NC-ND 2.0



Efectos del huracán Sandy. Fotografía: Logan Abassi para la Organización de las Naciones Unidas/MINUSTAH

I CIMENTACIONES SOBREELEVADAS EN LA ZONA COSTERA

Las edificaciones en zonas costeras pueden ser elevadas en muchos sentidos, por ejemplo: elevadas en relleno, construidas con cimentaciones directas o construidas sobre cimentaciones abiertas (mediante muelles, pilotes o columnas). No todos los métodos de elevación son adecuados para todas las áreas costeras, de hecho, varios métodos deben estar prohibidos.

I SOBREELEVACIÓN CON RELLENO DEL TERRENO

Antes de la construcción, el nivel de desplante puede ser elevado con relleno. Debido a que el relleno es susceptible a la erosión, no siempre es la mejor opción para mitigar los riesgos de inundación. Su uso debe estar prohibido como un medio para proporcionar soporte estructural a las construcciones y no se debe permitir en las zonas costeras sujetas al oleaje o flujos de agua con velocidades altas.

CIMENTACIONES DIRECTAS

Una cimentación directa obstruye los flujos de agua y no permite que el agua pase a su través. En condiciones de tormenta, este tipo de cimentaciones pueden ser alcanzadas por el oleaje y marea de tormenta. Debido a su fragilidad e inducción de socavación y erosiones cuando las olas rompen sobre de ella, deben ser prohibidas en zonas costeras.

Sólo en casos excepcionales, con impactos de oleajes de tormenta de diseño menores a 50 cm, las paredes de las

cimentaciones deben contar con aberturas que permitan el flujo y reflujo adecuado del agua. También las aberturas son necesarias para evitar un desequilibrio de las cargas a las cuales puede estar sujeta una edificación.

CIMENTACIONES ABIERTAS

Este tipo de cimentación se construye de tal manera que permita que las aguas fluyan libremente a través de ella.

A diferencia de las cimentaciones directas, las cimentaciones abiertas minimizan la superficie total sobre la cual los flujos de agua pueden actuar. En consecuencia las fuerzas sobre la cimentación, socavación y erosiones serán menores.

Una de las ventajas es que son menos susceptibles a los daños causados por los desechos que mueven las tormentas porque ofrecen menos superficie de contacto.

La parte de la cimentación sobre el nivel exterior es mínima y permite un movimiento casi sin restricciones de las aguas debajo de las edificaciones.

Este tipo de cimentación se puede describir como profundas, tipo muelle o piloteado o someras sobre patas. Los términos "profundo" y "somero" se refieren a la máxima socavación y/o erosión esperadas durante un evento de diseño o durante la vida prevista de la construcción.

Por lo expuesto anteriormente, en zonas de playas solo se deben permitir cimentaciones abiertas. Estas cimentaciones no obstruyan la dinámica costera.

Además, se deben establecer niveles mínimos de la sobre-elevación de las construcciones.



Casa en una duna semi-movil. siendo enterrada. Fotografía: Planet Light, CC BY 2.0



Casa piloteada a la orilla del mar. Fotografía: Captain Tucker, CC BY 3.0

I SOBRE-ELEVACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES EN ZONAS COSTERAS

Antes de construir cualquier obra en la zona costera se debe determinar el nivel de sobre-elevación (Figura 25). El nivel mínimo de sobre-elevación se determina tomando en cuenta, al menos, cinco aspectos relacionados con el nivel de la marea y del oleaje tanto en condiciones normales como en condiciones de tormenta. Algunos de los aspectos a considerar son:

- El nivel de pleamar máxima por efectos astronómicos.
- La marea de tormenta. Sobreelevación por efecto de apilamiento del viento más la sobreelevación por gradiente atmosférico (efecto de barómetro inverso que se genera con los ciclones).
- El remonte o ascenso máximo del oleaje.
- Sobreelevación por la descarga de ríos.
- Factor de seguridad. Normalmente se toma un francobordo con un mínimo 50 cm.

Diferentes normas internacionales señalan que el periodo de diseño debe ser de al menos 100 años. Sin embargo para ciertos usos temporales, con excepción de aquellos en los cuales puedan pernoctar personas, el periodo de diseño puede ser menor, pero siempre mayor a 25 años.



Figura 25. Nivel mínimo de desplante de estructuras en la zona de playas.

I Capítulo 5.

ESTUDIOS BÁSICOS NECESARIOS PARA LA INTERVENCIÓN EN LA ZONA COSTERA

I NECESIDAD DE ESTUDIOS CON UNA VISIÓN INTEGRAL

Los ecosistemas costeros están interconectados (ver volumen “Aspectos generales de la zona costera”) y las afectaciones en uno de ellos tienen consecuencias en los otros. Son muy dinámicos y responden a pulsos que modifican sus condiciones y esta forma de funcionamiento es lo que les permite responder a las condiciones tan variables que se presentan en la costa, a nivel de oleaje, vientos, bajadas de agua dulce y movimiento de sedimentos.

Un error frecuente en los estudios que limita el análisis de los resultados y no

permite tener seguridad en las afectaciones, es que no se toma en cuenta lo que rodea al ecosistema que se va a impactar de manera directa. Los estudios, sobre todo los de impacto ambiental, están generalmente enfocados al ecosistema sobre el cual se va a tener el impacto y no se visualizan los impactos en ecosistemas costeros vecinos e interconectados y/o a lo largo de la celda. Ello hace que no se tenga una apreciación real de la dimensión del impacto y que desde el punto de vista económico, se tenga que invertir mucho más posteriormente para dar solución a los impactos que no se previeron.

Existe la figura legal de las MIAs de carácter regional (Manifestaciones de Impacto Ambiental), sin embargo frecuentemente los promotores las presentan como MIAs de impactos de obras muy específicas y no como el todo que deben ser. En particular en la zona costera, las MIAs deberían ser de carácter regional por lo explicado anteriormente y a lo largo del presente volumen.

Por lo tanto, en la zona costera se recomienda que todas las obras e intervenciones desarrollen una MIA que incluya no solamente el impacto específico al ecosistema que se va a afectar directamente,



sino también a los interconectados y que abarque la totalidad de la celda o si éstas son muy pequeñas, que abarque dos celdas más a ambos lados.

I CARACTERÍSTICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS ESTUDIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVA INFRAESTRUCTURA EN LA PLAYA Y OBRAS DE PROTECCIÓN EN LA COSTA

De acuerdo con Silva y Mendoza (2015a) el proceso de planeación, diseño y ejecución de obras en la zona costera inicia con la revisión de los diferentes aspectos técnicos, sociales, económicos y medioambientales que confluyen en cualquier obra de ingeniería de costas. En esta revisión se deben plantear claramente cuáles son las necesidades y/o las demandas sociales para delimitar el problema a resolver y definir la actuación que ofrezca una respuesta conveniente de acuerdo con otras condiciones tales como prioridades políticas, disponibilidad económica y aspectos estratégicos. Las fases mínimas a desarrollarse son diagnóstico, evaluación de alternativas, diseño y seguimiento y evaluación del proyecto.

Es importante considerar que se debe contar con el financiamiento adecuado para completar toda la obra, ya que cuando no se terminan el impacto es muy negativo.

DIAGNÓSTICO

Esta fase tiene como objetivo la determinación de las causas que han originado el estado actual de una playa. Esta fase es de extrema importancia ya que si el diag-

nóstico no es correcto difícilmente lo será la solución propuesta.

La solución de un problema de costas obliga al responsable no solo a estar actualizado en sus conocimientos sino a ser objetivo, veraz e imparcial respecto de las alternativas posibles y probables. Una de las primeras y principales tareas en las que debe enfocarse el ingeniero es plantear adecuadamente el problema (lo que incluye la determinación de si realmente existe uno) y formular las preguntas adecuadas. La respuesta a estas preguntas ha de convertirse en la solución buscada.

En este sentido, la conformación de grupos interdisciplinarios es fundamental para el correcto diagnóstico de cada situación específica. Entre las disciplinas que suelen estar involucradas en los problemas de ingeniería costera se cuentan, además de ella misma, las ingenierías estructural, geotécnica e hidráulica, la oceanografía, biología, geología, economía, planeación urbana, sociología y diseño de transportes. No todas las disciplinas intervienen en todos los casos; sin embargo, es importante que el responsable del proyecto tenga la capacidad de contactar y trabajar con los que sean necesarios.

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS O POSIBLES ESCENARIOS

Tiene como objetivo el establecimiento de una serie de alternativas de solución con una definición robusta y sirve para compararlas y, de acuerdo con otros condicionantes, elegir la que ha de erigirse como solución proyecto.

Una vez que se tiene un abanico de soluciones, la selección de alguna requiere un nuevo planteamiento de preguntas, las

cuales giran alrededor de tres ejes: la factibilidad técnica, las implicaciones tanto económicas como políticas y el impacto ambiental. Es obvio que la solución que ofrezca los mayores beneficios en los tres aspectos estará cerca de ser la óptima.

De manera más detallada, el proceso general de planeación puede resumirse en seis etapas, mismas que se describen a continuación.

1. Delimitar el problema: En la mayoría de los casos el origen de un proyecto es una necesidad social, ya sea de protección o desarrollo. De ahí se derivarán los requerimientos de investigación y solución de problemas específicos, así como el alcance y relevancia del proyecto.

2. Caracterizar las condiciones si no se realiza ninguna acción: Se refiere al reconocimiento de las características iniciales de la zona de interés. Esto puede incluir, además de la dimensión del sitio y su entorno, aspectos biológicos, culturales, sociales, políticos, de seguridad y paisajísticos. Entre mayor información y caracterización se tenga, aumentará la posibilidad de involucrar más actores y realizar un trabajo exitoso en todos sentidos. Al mismo tiempo, el conocimiento de las condiciones iniciales permite comparar las soluciones con el escenario en que no se realiza ninguna acción para así evaluar objetivamente los beneficios y desventajas de cada una.

3. Formular un conjunto de alternativas: La estructuración de un grupo de soluciones asegura que la mayoría de las posibilidades están siendo tomadas en cuenta, algunas podrían pare-

cer descartables desde un inicio; sin embargo, acciones que al principio no parecerían factibles pueden convertirse en óptimas. Las alternativas han de diferir no solo en las dimensiones de las estructuras, sino también en el tipo de estructuras, materiales de construcción y acciones complementarias. A cada alternativa se le debe asignar un tiempo considerable de análisis, en el entendido además, que en la medida en que se estudie cada una, se obtendrá mayor sensibilidad respecto del problema y se estará en condiciones de resolverlo de la mejor manera.

4. Evaluar consecuencias: La evaluación de efectos puede sintetizarse como una comparación entre planes de acción y la no actuación. Las modificaciones que cada solución ocasione en las condiciones iniciales deben clasificarse y ponderarse para homogeneizar y facilitar la toma de decisiones. Algunos rubros en que pueden clasificarse los efectos de cada solución incluyen efectos ambientales (todos aquellos relacionados con el medio físico), económicos (locales, regionales y nacionales) y sociales.

5. Comparar las alternativas de solución entre sí. La primera comparación entre soluciones tiene que ver con los efectos abordados en el punto anterior; sin embargo, también se debe realizar una comparación económica. Si entre las soluciones asequibles no se satisfacen adecuadamente las necesidades que dieron origen al trabajo, se deben reformular soluciones hasta que se garantice dicha satisfacción.

6. Seleccionar la más adecuada: La solución que, siendo técnica y económicamente viable, cause los efectos que den respuesta a la necesidad original, es la que se someterá a juicio de valoración.

DISEÑO

Tiene como objetivo la evaluación detallada de la alternativa que ha sido seleccionada como opción de solución. En esta etapa se utilizan las mejores herramientas e información disponibles.

Para lograr el diseño final es necesario llevar el proceso de planeación hasta sus últimas consecuencias. Un trabajo está en etapa de diseño final cuando se tiene una solución que cubre las necesidades y que los resultados que se esperan obtener de dicha solución son adecuados. Al menos la solución propuesta deberá ser evaluada considerando condiciones normales y extremas de operación, de tal forma que la elección de la vida útil se realizará para cada proyecto ajustándose al tiempo en que se prevé en servicio a la estructura. Para su valoración se tendrá en cuenta la posibilidad, facilidad y factibilidad económica de las reparaciones, la probabilidad y posibilidad de cambios en las circunstancias y condiciones de utilización previstas en el proyecto como consecuencia de variaciones (Ej. aumento del nivel del mar), y la viabilidad de refuerzos y readaptaciones a nuevas necesidades de servicio.

Dado el carácter de las acciones que actúan sobre las obras marítimas, no es realista la aplicación exacta de los criterios anteriores a obras con vidas previsible muy cortas. Se adoptarán, como mínimo 15 años cuando su falla supone poco riesgo

de pérdidas humanas o daño medioambiental y 25 años para la infraestructura de interés general o que sus consecuencias puedan afectar otros segmentos de la costa.

En esta fase es necesario definir con precisión todos los detalles relacionado con las actividades asociadas a la construcción del proyecto, su inutilización, desmontaje o cambio de uso.

SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROYECTO

La fase de seguimiento y evaluación del proyecto tiene como objetivo la verificación de que la implementación del diseño seleccionado evoluciona de acuerdo con lo previsto. Esta fase es necesaria dado que toda obra marítima está sujeta a la acción de dinámicas aleatorias (por ejemplo: oleaje, viento, movimientos sísmicos) por lo que siempre existe un determinado riesgo de que la actuación evolucione con una cierta variación respecto a la evolución prevista. Al respecto será necesario:

- Inspección y monitoreo periódicos de las condiciones ambientales y la respuesta de la estructura.
- Evaluación de las condiciones físicas de la obra y su comportamiento respecto de los valores de diseño.
- Determinación de respuestas derivadas de la evaluación. Las posibles respuestas son no actuar (en caso de problemas nulos o menores), rehabilitar parte o toda la estructura, reparar parte o toda la estructura o las consecuencias medioambientales. |

BIBLIOGRAFÍA

- Bird, E.F.C. 1996. *Coastal erosion and sea-level rise*. En: Milliman, J.D., y Haq, B.U. (Eds.), *Sea-level rise and coastal subsidence*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 84-104 pp.
- Ley-Vega, J.C., Gallego-Fernández, J.B., y Vidal, C. 2007. *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Costas. España, 251 pp.
- Martell, R. 2013. *Hidrodinámica litoral y evolución morfológica en playas con aporte sedimentario escaso*. Tesis doctoral. UNAM, México, 226 pp.
- Mendoza, E., Hoil, J., Silva, R., y Enríquez, C. 2012. *Evaluation of sea-grass as a wave energy dissipation element*. Coastal Engineering Proceedings, 1(33), posters-17.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2013. *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias*. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial. Autores: Pedroza, D., Cid, A., García, O., Silva-Casarín, R., Villatoro, M., Delgadillo, M.A., Mendoza, E., Espejel, I., Moreno-Casasola, P., Martínez, M.L. e Infante Mata, D.
- SER (Society for Ecological Restoration). 2004. *The SER international primer on ecological restoration*. Web-based resource (available from www.ser.org).
- Short, A.D. 2000. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons. Chichester, 392 pp.
- Silva, R., Martínez, G.R., Mariño-Tapia, I., Vanegas, G.P., Baldwin, E.M., y Mancera, E.E. 2012. *Manmade vulnerability of the Cancun beach system: the case of hurricane Wilma*. CLEAN-Soil, Air, Water, 40: 911-919.
- Silva, R., Martínez, M.L., Hesp, P.A., Catalan, P., Osorio, A.F., Martell, R., Fossati, M., Moit da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienfuegos, R., Klein, A., y Govaere, G. 2014a. *Present and future challenges of coastal erosion in Latin America*. Journal of Coastal Research, SI, 71: 1-16.
- Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz-Pérez, M.A., Mendoza, E., Delgadillo, M.A., Escudero, M., Félix, A., y Cid, A. 2014b. *Caracterización de la zona costera y planeamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*. UNAM/SEMARNAT, México, 125 pp.
- Silva, R., y Mendoza, E. 2015a. Capítulo A.2.17 Obras Marítimas: Tomo I, Sección A: Hidrotecnia, Tema 2: Hidráulica. *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Comisión Federal de Electricidad. México. (En imprenta)
- Silva, R., y Mendoza, E. 2015b. Capítulo A.2.17 Obras Marítimas: Tomo III, Sección A: Hidrotecnia, Tema 2: Hidráulica. *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Comisión Federal de Electricidad. México. (En imprenta)
- Silva, R., y Mendoza, E. 2015c. Capítulo A.2.17 Obras Marítimas: Tomo V, Sección A: Hidrotecnia, Tema 2: Hidráulica. *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Comisión Federal de Electricidad. México. (En imprenta)

La preservación de los ecosistemas costeros y de los servicios que proveen a la sociedad requiere de lograr un manejo integral que considere que la zona está formada por subsistemas interconectados y que su deterioro puede ser causado por eventos que ocurren tierra adentro o en sitios contiguos.

La erosión costera es una preocupación a nivel mundial por las severas consecuencias ecológicas y socioeconómicas que genera. El presente estudio tiene como objetivo entender las causas naturales y antrópicas de la erosión; los tipos de erosión que existen (temporal, episódica, cíclica y crónica) así como las distintas técnicas existentes para hacer frente a dicho fenómeno.

Se explican las circunstancias en las que debe favorecerse cada estrategia propuesta. Finalmente, se enlistan las características estructurales y estudios básicos que deberían ser considerados en la implementación de proyectos desarrollo en dicha zona.

