
INFRAESTRUCTURA DE PROTECCIÓN COSTERA

Paulo Salles Afonso de Almeida y Rodolfo Silva Casarín

Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

En este capítulo se describe en primer lugar la situación pasada y actual de la protección costera en México y el mundo, sus usos e importancia. De hecho, la infraestructura de protección costera, cuyas funciones son diversas, pero en general se reducen a proteger estructuras cercanas a la costa o a proteger la costa misma, existe desde que surgió la necesidad del ser humano por protegerse del embate de las inclemencias marinas en el litoral. En México, la longitud de costa relativa a su superficie es, entre los países continentales, de las mayores del mundo, por lo que la importancia y potencial de la costa es indudable. Sin embargo, la densidad poblacional en la costa y por ende el desarrollo costero, han sido históricamente bajos. En segundo lugar, se presentan los tipos de costa y playas que existen en México, los cuales son diversos, por lo que las obras de protección costera deben de planearse y diseñarse de acuerdo a dicha diversidad de ambientes. En tercer lugar, se presentan los tipos y funciones de las estructuras de protección costera, así como los aspectos más importantes que deben de tomarse en cuenta en el proceso de planeación y diseño de dichas estructuras. Finalmente, se presenta en términos generales la problemática de protección costera que prevalece en México y se proponen algunas ideas para mejorar la coordinación y efectividad de los esfuerzos que actualmente se están realizando en la materia.

ABSTRACT

This chapter presents first the importance and uses of the shore protection in Mexico and around the world. Shore projects, whose functions are binded to the protection of coastal and marine structures or the shore itself, developed from the need to protect human lives and settlements from hazardous events. Mexico is one of the countries with a large, and indeed the coastline importance and potential of the coast is evident. However, the population density in the coast and therefore the coastal development, have been historically low. The second part of this chapter presents, the diverse types of coasts and beaches in Mexico, showing that shore protection plans and designs have consistenly considered their diversity. Through the third section it is presented the types and functions of the shore protection structures, as well as the main aspects of the planning and design process. Finally, this chapter presents the shore protection in Mexico, giving suggestions and some ideas to improve the coordination and effectiveness of the current undertaken efforts.

13

INFRAESTRUCTURA
COSTERA



INTRODUCCIÓN

La protección costera es una actividad humana que surgió desde que el hombre adquirió, por medio de herramientas y obras simples, la capacidad de proteger el espacio que lo circunda para su propio beneficio. En su afán de establecerse en la costa en sitios convenientes por su clima y por la disponibilidad de insumos necesarios para su supervivencia y bienestar, también sufrían el embate de la naturaleza, por lo que el hombre se vió en la necesidad de construir obras o adecuar el entorno para protegerse. Hoy en día, con asentamientos costeros múltiples y numerosos y dado el dinamismo y vulnerabilidad del equilibrio de las costas, las cuales están en permanente cambio en escalas de tiempo con variaciones de horas a años o más dependiendo del tipo de costa y de las fuerzas desestabilizadoras e inductoras del cambio, la protección costera es un aspecto común de la vida cotidiana en las comunidades costeras.

En términos generales, la infraestructura de protección costera representa el conjunto de obras y sistemas construidos e implementados por el hombre para la defensa o estabilización costera contra el embate de las inclemencias del mar (o del cuerpo de agua en cuestión, sea este un río, lago, etc). La protección costera puede estar diseñada para proteger asentamientos establecidos en o cerca de la costa, o para proteger la costa misma. Específicamente, el objeto de dichas defensas puede ser para: 1) prevenir la erosión de la línea de costa, sea esta natural o artificialmente ganada al mar; 2) prevenir inundaciones en zonas costeras causadas por sobrelevaciones del nivel del mar (de alta frecuencia con oleaje generado por viento, con períodos comúnmente de 5 a 15 segundos de baja frecuencia como la sobrelevación por tormenta, con períodos de horas o días); 3) proteger contra el oleaje a las entradas y recintos de puertos o marinas, generando zonas de calma; 4) estabilizar canales de navegación en bocas estuarinas o lagunares; y 5) proteger obras de toma (e.g. de plantas de generación eléctrica o de plantas desalinizadoras) o de descarga (e.g. emisores submarinos) contra el azolve (USACE, 2002).

Existen países que dependen de la protección costera para controlar o por lo menos minimizar la pérdida de costa y por ende de territorio (e.g. Japón), y existen otros que dependen de ella para su misma supervivencia (e.g. Países Bajos). En otros países, como es el caso de México, la protección costera obedece generalmente a necesidades e intereses más localizados: por ejemplo, para la estabilidad de playas para fines turísticos o intereses de particulares por conservar estable su frente playero, o para la estabilidad de bocas lagunares o estuarinas para fines de navegación y/o circulación adecuada en lagunas y cuerpos de agua semi-cerrados. Sin embargo, se ha visto a lo largo de los años que la protección costera, vista como un instrumento para solucionar problemas locales y puntuales, refleja una visión limitada de la problemática real. Existen varias filosofías sobre qué proteger de las costas y cómo hacerlo, lo cual es un tema muy polémico que ha causado fricciones y problemas de índoles diversas, desde ambientales y económicos, hasta legales, políticos y sociales en las comunidades costeras.

Desde el punto de vista técnico, que es lo que nos compete en este capítulo, la protección costera en México ha sido una actividad cuyo diseño se ha enfocado, en la gran mayoría de los casos, en la solución inmediata de problemas costeros puntuales y específicos, sin considerar la aplicación ni el marco de referencia del manejo integral de la zona costera donde se tengan en cuenta tanto los procesos propios de la zona costera, -tanto la problemática local a resolver como las repercusiones que la solución del problema pueda tener en zonas costeras adyacentes- y los procesos que tienen lugar en zonas de la cuenca más alejadas del litoral, los cuales desembocan en la costa e influyen en su dinámica y calidad ambiental. Dicha visión ha llevado a situaciones en las que la protección costera se ha vuelto una lucha de intereses entre particulares, comunidades y el gobierno, con el consecuente detrimento del medio ambiente.

IMPORTANCIA DE LA COSTA Y LOS AMBIENTES COSTEROS

En términos globales, la importancia de la costa y los ambientes costeros es indudable, desde cualquier punto de vista, sea éste social, ambiental, económico, geopolítico o de soberanía. De acuerdo a Hinrichsen (1998), más de la mitad de la po-

blación del planeta - alrededor de 3.2 mil millones de habitantes - viven en una franja costera de 200 km de ancho, y cerca de dos tercios, 4 mil millones, se encuentran a menos de 400 km de la costa. La población de América Latina y el Caribe es aún

más litoral. Los países costeros de la región tienen una población total de alrededor de 610 millones, siendo que más del 75% vive a menos de 200 km de la costa.

Por un lado, el hecho de que un país tenga extensas longitudes de costa hace que probablemente sus fronteras sean en su mayoría marinas, y que por ende su relación con el mar sea inexorablemente intensa. Sin embargo, con el afán de poder comparar la importancia relativa de la costa entre países, es necesario hacer un ejercicio donde se obtenga la proporción de la longitud de costa, y la superficie del país. Cuanto más alta sea esa relación, es razonable suponer que la interacción y la interdependencia es mayor entre los habitantes, sus diversas actividades y la zona costera. Para ilustrar lo anterior, la Agencia Central de Inteligencia (CIA, 2002) muestra la lista de los 20 países costeros más grandes, combinado con los 20 países con mayor longitud de línea de costa, ordenados decrecientemente por su litoral. Dicha tabla presenta, para cada país, la superficie (km²), la longitud de línea de costa (km), la longitud de línea de costa relativa a la superficie (m/km²), así como el índice de ordenamiento decreciente de cada una de esas cantidades. Se puede ver que México ocupa el 15° lugar tanto en superficie como en longitud de línea de costa, y el 13° lugar en longitud relativa (México tiene 4.7 m de línea de costa por cada km² de superficie).

Además, se puede notar en la Tabla 1 que de los 12 países con mayor longitud de línea de costa relativa que México, es decir, de los 12 países que en principio tienen mayor interacción con el mar siguiendo el criterio antes descrito: (1) Seis son archipiélagos o cadenas de islas (Filipinas, con alrededor de 7,000 islas; Japón, Reino Unido y Nueva Zelanda con decenas de islas, Indonesia con alrededor de 17,000 islas; Groenlandia, con 84% de su superficie cubierta permanentemente por hielo), con pequeñas o nulas fronteras terrestres (Indonesia; 2,830 km; Reino Unido: 360 km; los demás países no tienen fronteras terrestres), lo cual hace que la longitud relativa sea alta y que sean obviamente países marítimos; (2) Cuatro son países peninsulares rodeados en gran parte por mar: Dinamarca, con 406 islas; Grecia, con alrededor de 2,000 islas; Noruega, con más de 50,000 islas y una línea de costa muy accidentada; e Italia; (3) Dos son países continentales: Canadá, con muchas islas al norte pero con 85% de la población viviendo a menos de 300 km de la frontera con Estados Unidos; y Turquía. Por lo tanto, tomando en cuenta que los diez países de los puntos (1) y (2) anteriores son marítimos por naturaleza, se puede decir que México es uno de los países continentales (dentro del grupo de los 20 mayores y/o de los 20 con mayor longitud de costa) con mayor litoral proporcional a su tamaño, lo cual demuestra la importancia de las costas en nuestro país.

Cabe señalar que en América Latina existen 8 países continentales (Panamá, Costa Rica, Belice, El Salvador, Chile, Ecuador, Honduras, Nicaragua) con mayor longitud de costa relativa, pero no se presentan en la tabla por no cumplir los criterios con los que se seleccionaron los países ahí incluidos (superficie y longitud de línea de costa). Por otro lado es importante señalar que la superficie y la longitud de línea de costa de México reportada por la CIA (2002) difieren de las reportadas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (1 964 375 km² y 11,122 km), por lo que los datos de la tabla deben tomarse con prudencia, ya que su objetivo es puramente comparativo y para poder colocar a México en una perspectiva global. Además, los índices de orden presentados en la tabla corresponden a la muestra de 29 países seleccionados a criterio de los autores, por lo que no corresponden al ordenamiento global de todos los países del mundo. En efecto, México se ubica globalmente en el lugar 157 en cuanto a longitud de costa relativa, y Dinamarca (primero en la Tabla 1) se ubica en el lugar 80, siendo que los primeros 79 son pequeños países insulares.

Además, dada la posición geográfica de México con una latitud en zonas templada y tropical, así como vertientes en los dos océanos más importantes del planeta, el potencial de las costas de México es enorme, y virtualmente toda la costa y el litoral son aprovechables y explotables para alguna o varias de las actividades humanas, en contraste con zonas costeras inhóspitas en otras latitudes (Canadá, Rusia, Groenlandia, Antártica, entre otras).

Sin embargo, el conocimiento, aprovechamiento y manejo adecuado de las costas y sus recursos en México ha sido bajo. Desde la época prehispánica, las civilizaciones mesoamericanas establecidas en lo que hoy es México tenían una interacción relativamente limitada con el mar, utilizando productos marinos en su alimentación y en sus ritos (INE, 1999), pero sin un desarrollo importante de la navegación, ni un interés y curiosidad por explorar nuevos territorios en alta mar. En la época de la colonia, las actividades estaban enfocadas a la explotación de las riquezas y potencialidades del altiplano tierra adentro (minería, agricultura y ganadería), y donde el litoral era en buena medida visto como la frontera entre esas riquezas y el Océano Atlántico que había que cruzar para hacerse de ellas. En la actualidad, la realidad demográfica sigue siendo la de una sociedad que no parece estar del todo conciente del potencial costero que tiene.

En efecto, los mayores centros urbanos no están en la zona costera, y de acuerdo a datos del INEGI (2000), los municipios costeros de México albergan únicamente el 14.7% de la población total del país. Dicho dato no corresponde forzosamente con la población costera, por ejemplo municipios no



Manejo Costero en México

Tabla 1. Superficie, longitud de línea de costa, y longitud de línea de costa relativa de los 20 mayores países costeros y de los 20 países con mayor longitud de línea de costa. (Fuente: CIA, 2002).

País	Superficie (km ²)	Orden	Línea de Costa (km)	Orden	Línea de Costa Relativa (m/km ²)	Orden
Canada	9,976,140	3	202,080	1	20.256	11
Indonesia	1,919,440	17	54,716	2	28.506	8
Groenlandia	2,166,086	14	44,087	3	20.353	10
Rusia	17,075,200	1	37,653	4	2.205	15
Filipinas	300,000	25	36,289	5	120.963	2
Japón	377,835	22	29,751	6	78.741	4
Australia	7,686,850	7	25,760	7	3.351	14
Noruega	324,220	23	21,925	8	67.624	5
Estados Unidos	9,629,091	4	19,924	9	2.069	17
Antártica	14,000,000	2	17,968	10	1.283	23
Nueva Zelanda	268,680	26	5,134	11	56.327	6
China	9,596,960	5	14,500	12	1.511	20
Grecia	131,940	28	13,676	13	103.653	3
Reino Unido	244,820	27	12,429	14	50.768	7
México	1,972,550	15	9,330	15	4.730	13
Italia	301,230	24	7,600	16	25.230	9
Brasil	8,511,965	6	7,491	17	0.880	26
Dinamarca	43,094	29	7,314	18	169.722	1
Turquía	780,580	21	7,200	19	9.224	12
India	3,287,590	8	7,000	20	2.129	16
Argentina	2,766,890	9	4,989	21	1.803	19
Kazakhstan	2,717,300	10	2,964	22	1.091	24
Arabia Saudita	1,960,582	16	2,640	23	1.347	22
Irán	1,648,000	19	2,440	24	1.481	21
Perú	1,285,220	20	2,414	25	1.878	18
Libya	1,759,540	18	1,770	26	1.006	25
Algeria	2,381,740	12	998	27	0.419	27
Sudán	2,505,810	11	853	28	0.340	28
Rep. Dem. Congo	2,345,410	13	37	29	0.016	29

costeros pero cercanos a la costa pueden tener una población que se considere costera, y parte de la población de municipios costeros que se extienden tierra adentro tiene probablemente pocos vínculos y actividades costeras. Por lo tanto, aun cuando la tendencia reciente ha sido la de un aumento en las

tazas de crecimiento poblacional en las zonas costeras, debido en parte al aumento de las actividades turística y la acuicultura (INE, 1999), México presenta una densidad poblacional costera mucho menor que la media mundial, y en particular que la media latinoamericana.

USOS Y TIPOS DE LA FRANJA COSTERA Y LAS PLAYAS

Para fines prácticos de protección costera, la costa puede clasificarse en tres tipos:

- **Costas rocosas.** Son casi inalterables, al menos en las escalas de tiempo que nos interesan aquí (años).
- **Costas de arena** (material granular no cohesivo). Se deforman fácilmente con la acción del oleaje y las corrientes. En estas costas la posición de la línea de costa está en constante movimiento.
- **Costas de material cohesivo.** Estas costas de sedimento cohesivo involucran interacciones eléctricas y químicas ya sea en partículas individuales o en grupo, lo cual hace que no sean fácilmente erosionables.

Cada uno de estos tipos de costa pueden o no estar vegetados, lo cual también disminuye la capacidad del agua (y el aire) de erosionarlas, dada la cobertura vegetal que protege el suelo. De cualquier forma y en cualquier circunstancia, el tipo de costa más fácilmente erosionable es la costa de material no cohesivo, y por lo tanto es el tipo de expresión costera más susceptible a ser protegida, sea para evitar la erosión misma o para evitar que se azolve una zona u obra artificialmente dragada (puerto, marina, bahía, desembocadura, boca lagunar, estuario, etc.). Con la finalidad de simplificar la física y poder extraer los procesos más relevantes, los físicos e ingenieros costeros han comúnmente dividido la morfodinámica costera, y en particular el análisis del cambio en una playa, en dos tipos de manifestaciones: una que ocurre en forma longitudinal (e.g., transporte litoral de sedimentos) y otra en forma transversal (e.g., cambio estacional del perfil de una playa) a lo largo del tiempo. Cuando no se presenta ningún cambio significativo en la morfología de la playa, salvo quizá fluctuaciones estacionales alrededor de un valor medio o perturbaciones menores que no logran modificar permanentemente sus características geométricas, se dice que la playa se encuentra estable, en un estado de equilibrio dinámico, presentando el llamado *perfil de equilibrio*.

Dados pequeños accidentes o perturbaciones naturales o antropogénicas en la línea de costa, y dada la misma hidrodinámica costera, raramente se presentan playas estrictamente rectilíneas o con curvaturas continuas. De hecho, las costas de arena generalmente contienen formas de media luna de mayor o menor dimensión y varios radios, con salientes o puntas de arena o entrantes moderada-

mente profundas y alargadas. Losada (1988) indica que estas formas son conocidas por diversos nombres, tales como: formas arenadas (*beachcusps*), ondas de arena (*sand waves*), playas rítmicas (*shoreline rhythms*), arcos gigantes (*giant cups*), barras crecientes (*crescentic bars*), etc.

Por otro lado, el estado morfodinámico de una playa, es la descripción de la forma que el perfil de playa adquiere como consecuencia de la interacción agua-sedimento. La evolución de un estado morfodinámico de la playa está gobernada por la morfología existente y la evolución de la dinámica marina, mientras que los límites topográficos de la playa, la existencia o ausencia de estructuras de protección costera y las características de los materiales imponen las condiciones de contorno.

En el marco de la descripción del tipo de playa con la finalidad de comprender su respuesta a alteraciones y poder realizar diseños adecuados de protección costera, Wright & Short (1984) realizaron una tipología de los estados morfodinámicos límites, definiendo seis estados morfodinámicos de playa, cuatro de ellos intermedios y dos estados límite:

Playa Disipativa (Disipative, D):

La playa disipativa (Fig. 1) tiene una morfología prácticamente bidimensional con un perfil muy tendido (pendiente entre 1 y 2%). En este perfil existen una o varias barras longitudinales paralelas a la línea de costa (donde las olas rompen suavemente por descretamiento) y separadas por valles poco marcados. Este perfil tiende a prevalecer en playas bajo la acción del oleaje con gran energía, con material fino y abundante. El transporte de sedimentos en estas playas es el resultado de la segregación vertical de los flujos hacia el mar y hacia tierra más que por las corrientes de retorno, siendo el flujo hacia tierra superficial e interno, mientras que el flujo hacia el mar es más débil y se realiza por los niveles inferiores (resaca). En condiciones de equilibrio de la playa, la resultante de ambos flujos es cero.

Los siguientes son los estados morfodinámicos intermedios:

- **Barra longitudinal y valle**
(Longshore Bar and Through, LBT)
- **Barra y playa rítmica**
(Ritmic Bar and Beach, RBB)



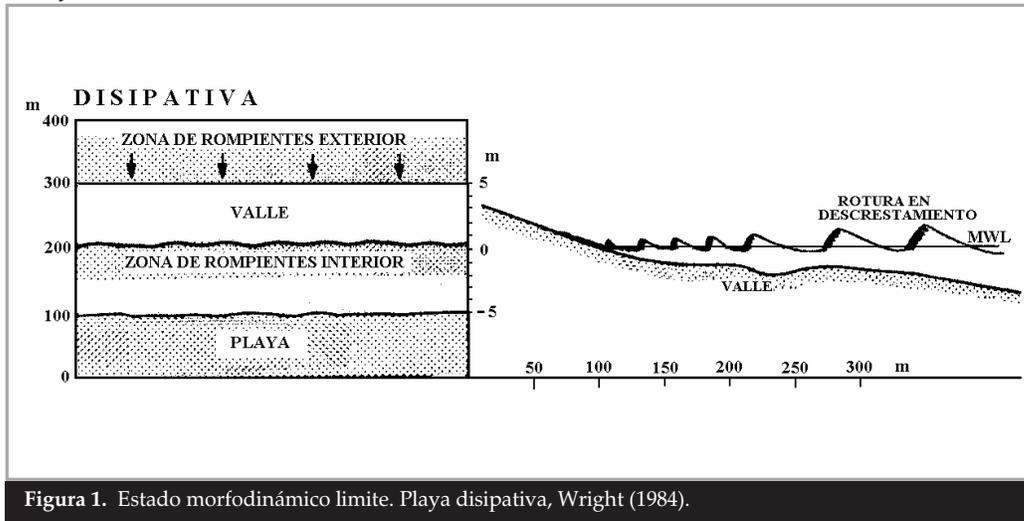


Figura 1. Estado morfodinámico límite. Playa disipativa, Wright (1984).

- **Barra transversal y corriente de retorno**
(Transverse Bar and Rip, TBR)
- **Terrazas mareales**
(Ridge Runnel or Low Tide Terraze, RR o LTT)

Los cuatro estados intermedios poseen elementos de los estados disipativo y reflejante, a su vez, el parámetro de escala de rompiente varía notablemente tanto transversal como longitudinalmente. Como en general las playas intermedias presentan diferentes estados, con morfologías muy complejas, en función de las condiciones del oleaje, su variabilidad total es muy elevada.

Los estados intermedios presentan las siguientes características:

- Formas de playa muy variadas en tipos y tamaños, tales como sistemas de barras, barra creciendo, sistema rítmico de barras cruzadas por corrientes de retorno.
- Dichas barras protegen la cara interior de la playa de la acción de las grandes olas, por lo que ésta presenta dos dinámicas diferenciadas, una externa disipativa (asociada, en general, a la bajamar) y otra interna reflejante (correspondiente a condiciones de pleamar). Debido a la forma de las barras, una sección completa de la playa puede ser disipativa, mientras que otra, por ejemplo protegida por las corrientes de retorno, actúa como reflejante.
- La playa puede verse afectada por una combinación de ondas, incidente de periodo T , reflejada de periodo T , ondas subarmónicas de periodo $2T$ y $4T$ y oscilaciones infra-

gravitatorias de periodos 10 a $20T$, prevaleciendo cada una de ellas sobre las otras en función del perfil analizado.

- Las olas que rompen bajo la acción de las diversas formas de barra, se reorganizan en nuevas olas de periodos del orden de la mitad del incidente las cuales, al alcanzar el talud interno de la playa, se reflejan produciendo una onda estacionaria. Ello trae consigo la creación de formas arqueadas en el talud interior, algunas veces de dimensiones muy pequeñas, como respuesta al oleaje incidente de corto periodo.
- Una característica fundamental de las playas intermedias es la existencia de un canal paralelo a la playa y que al separar la playa interior de la barra, encauza el flujo de retorno hacia los puntos de salida donde se establecen las corrientes de retorno.
- La presencia del oleaje incidiendo oblicuamente y la soldadura de parte de la barra con la playa interior origina sistemas circulatorios sumamente complicados donde coexisten corrientes de retorno en respuesta al oleaje incidente y una onda subarmónica $2T$, en los puntos de soldadura, con corrientes de retorno con pulsaciones asociadas a oscilaciones infragravitatorias originadas por las roturas en descrestamiento sobre la barra no soldada.

Playa Reflejante (Reflective, R)

La playa reflejante (Fig. 2) se encuentra en el otro extremo límite de la escala de estados morfodinámicos de la playa. En ésta se producen roturas en colapso o en oscilación sobre el frente de la playa,

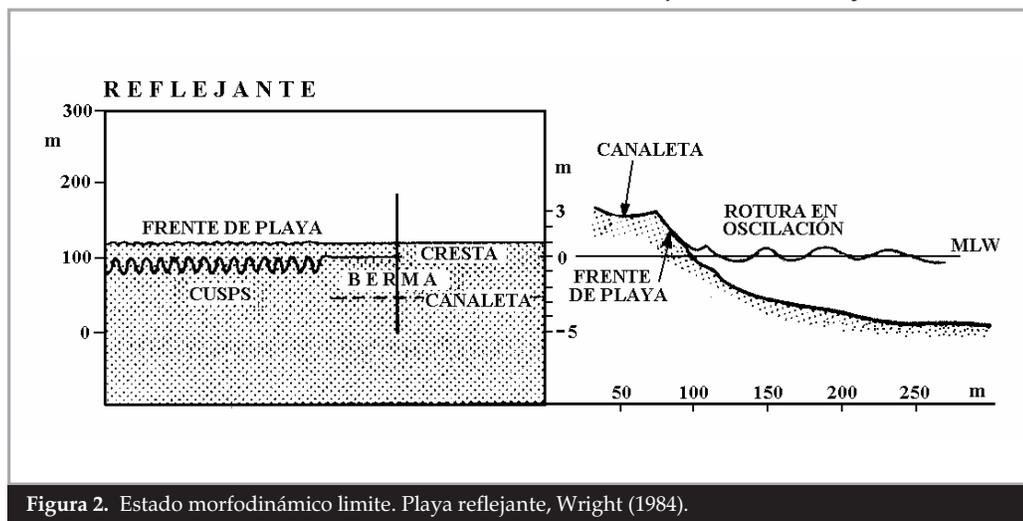


Figura 2. Estado morfodinámico limite. Playa reflejante, Wright (1984).

que tiene pendientes elevadas ($\tan \beta \cong 0.01 - 0.02$) y con valores del parámetro de escala de rompientes, (ϵ) menores de 3. La turbulencia relacionada con el proceso de rotura se ve confinada a la zona de ascenso y descenso sobre el frente de la playa. Bajo condiciones de baja energía el talud de la playa finaliza por la parte superior de una berma alta y recta, tras la cual puede aparecer un canal como resultado de la incorporación de la berma al talud más tendido que corresponde a las condiciones de mayor energía. Inmediatamente debajo del talud de la playa se puede encontrar un escalón pronunciado compuesto de material grueso, la profundidad se incrementa con la altura de ola. En playas con marea, el barrido del oleaje sobre el escalón lo destruye por lo cual no aparece en el pie del frente de playa en bajamar. Hacia el lado del mar del frente de la playa, la pendiente disminuye notablemente, dando al perfil una forma cóncava bien marcada.

En México, la franja costera, que va desde tierra adentro hasta aguas oceánicas en el límite de la plataforma continental, es aprovechada y utilizada con diversas actividades, entre las que destacan:

- (1) mineras (sal, roca caliza y arena) y de explotación, producción y distribución de hidrocarburos
- (2) industriales (petroquímica, siderúrgica, fábricas papeleras e ingenios azucareros, entre otras), comerciales y de transportación marítima
- (3) turísticas, de esparcimiento y recreación, las cuales están relacionadas con actividades comerciales y de construcción
- (4) pesqueras y acuícolas

A pesar de la relativa baja densidad poblacional en las zonas costeras del país, el aumento de la población, la urbanización y la industrialización de forma no sustentable, como es el caso en buena parte de las costas del país, tienen consecuencias graves para el medio ambiente desde el punto de vista de:

- La degradación de ambientes naturales terrestres (zonas de humedales, manglares, marismas, etc) o marinos (pastos marinos, arrecifes, etc)
- De acuerdo a la FAO, en 1995 cerca del 70% del stock pesquero se encontraba completa o fuertemente explotado, sobreexplotado, agotado, o recuperándose lentamente
- La baja calidad del agua en las costas debido a la descarga directa al mar (o a ríos que descargan en el mar) del drenaje urbano, agrícola e industrial

De hecho, dada la gran biodiversidad y variedad de hábitats y expresiones costeras (playas arenosas, playas rocosas, bahías, ensenadas, estuarios, zonas de manglar, humedales, prados de pastos marinos y arrecifes de coral), las actividades de conservación y manejo costero, a pesar de aparentemente no tener un producto palpable inmediato o a corto plazo, son igualmente importantes. Dichas actividades, las cuales se han expresado con la creación del sistema de áreas naturales protegidas, dependen concretamente del gobierno, pero también en gran medida de la instauración y adquisición de una cultura de conservación por parte de la sociedad en general y las comunidades costeras en particular. La cultura de la conservación, su implementación y proyección en aplicaciones concretas, son la base de la sustentabilidad del desarrollo de la zona costera, y por ende del país.



TIPOS Y FUNCIONES DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

En la Tabla 2 se presenta la clasificación de estructuras del Coastal Engineering Manual (USACE, 2002), describiendo los objetivos y funciones de cada una de ellas.

Dichas estructuras son muy diversas y cumplen funciones específicas. Las estructuras tipo (1) a (4) son las de *acorazamiento costero*. Existen también combinaciones de estructuras de acorazamiento, como se ejemplifica en USACE (2002), para satis-

facer demandas y problemáticas específicas. Las estructuras de tipo (5) a (9) son estructuras de *estabilización playera*. Las estructuras o sistemas (10) a (16) corresponden sea a protecciones a instalaciones costeras, sea alternativas no estructurales, sea a nuevas tecnologías.

Adicionalmente a las alternativas mencionadas anteriormente, es decir acorazamiento costero, estabilización playera, relleno playero, técnicas nue-

Tabla 2. Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera. (Fuente: USACE, 2002).

Tipo de Estructura	Objetivo	Función Principal
Dique	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas	Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra a través de
Muro vertical (espaldones)	Proteger tierra y estructuras contra inundaciones y rebase	Refuerzo de parte del perfil de playa
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosiones	Refuerzo de parte del perfil de playa
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión playera	Reducción de transporte longitudinal a la playa
Rompeolas no ligado a la playa	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura
Dique o rompeolas arrecife	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la playa
Dique sumergido	Prevenir erosión playera	Retardar el movimiento del sedimento mar adentro
Rompeolas	Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes	Disipación de energía de oleaje y/o reflexión del oleaje hacia mar adentro
Dren de playa	Prevenir erosión playera	Acumulación de material playero en la porción drenada de la playa
Relleno artificial de playa y dunas	Prevenir erosión playera y proteger contra inundaciones	Relleno artificial de la playa y duna para que sea erosionado en lugar del material naturalmente depositado
Rompeolas flotante	Proteger puertos y zonas de atraque contra oleaje de alta frecuencia	Reducción de alturas de ola por reflexión y atenuación
Espigón de escollera	Estabilizar canales de navegación en desembocaduras y bocas	Confinar corrientes y flujos de marea. Proteger contra aguas pluviales y corrientes cruzadas
Muro de conducción	Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger atraques contra corrientes	Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras
Barreras para marea de tormenta	Proteger estuarios contra mareas de tormenta	Separación del estuario y el mar por medio de compuertas móviles
Protección contra socavación	Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente	Aumento de la resistencia contra erosión causada por oleaje y corrientes

vas, o una combinación de estas, existen otras alternativas para mitigar daños en zonas costeras, en particular la alternativa de *adaptación*, la alternativa de *retirada*, y la alternativa de “no hacer nada”.

La primera de estas alternativas, es decir la *adaptación*, consiste en modificar la infraestructura y manejo costeros para mitigar el impacto producido por el mar. Ejemplos de adaptación pueden ser la elevación de las edificaciones costeras, modificar la zonificación de la costa y permitir construcciones únicamente en zonas más alejadas de la playa, implementar y optimizar los sistemas de alertamiento y evacuación por fenómenos extremos, entre otros.

La segunda alternativa, *retirada*, es la evacuación permanente o abandono de la infraestructura costera, lo cual puede ser la mejor opción en zonas con elevadas tasas de erosión.

La tercera alternativa, la de *no hacer nada*, debe considerarse en varias situaciones. Primero, dicha

alternativa provee la base para medir la efectividad de reducir daños de las otras alternativas. Por otro lado, cuando todas las alternativas estructurales y no estructurales son muy caras, no existe una solución económicamente viable. Por último, cuando los procesos naturales de transporte de sedimentos, erosión o acreción, son el aspecto más importante (por motivos de equilibrio ecológico, estético, entre otras), la alternativa de no hacer nada puede ser la opción apropiada.

En México no se han implementado todas las estructuras que aparecen en la Tabla 2 o bien que se hayan mencionado anteriormente; en parte por que no ha sido necesario, o por motivos presupuestales o de planeación a nivel de autoridades gubernamentales, o bien por la falta de visión y motivación de probar técnicas nuevas. De hecho, como se verá más adelante, la selección de la estructura ideal para cada caso es un proceso delicado, ya que por lo general las estructuras afectan, en mayor o menor medida, las zonas aledañas al área que se quiere proteger.

PROCESO DE PLANEACIÓN Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

El proceso de planeación empieza con las preguntas “¿Cuál es el problema?” y “¿Qué es exactamente lo que el proyecto trata de lograr?”. Por más elementales que parezcan, esas son las dos preguntas más importantes, y las más difíciles de contestar con precisión. Al tener una respuesta adecuada a dichas preguntas, es posible empezar el proceso de planeación del proyecto, el cual consiste en (a) especificar el problema, (b) inventariar y predecir la situación si se toma o no alguna medida, (c) formular planes alternativos, (d) evaluar efectos, incluídas áreas adyacentes al proyecto, (e) comparar planes alternativos, y (f) seleccionar el plan definitivo.

Por otro lado, es recomendable que el enfoque a la solución del problema sea interdisciplinario para que intervengan expertos en aspectos físicos, del medio ambiente y sociales, incluyendo, entre otros y dependiendo del tipo y magnitud del problema y proyecto, ingenieros costeros, geotécnicos, estructurales e hidráulicos, meteorólogos, oceanógrafos, biólogos, geólogos, economistas, urbanistas y especialistas del transporte.

En cuanto al diseño, los pasos más relevantes a seguir incluyen (después que las etapas de planeación fueron completadas):

- (1) Desarrollar y probar el diseño funcional, es decir la efectividad de la obra a cumplir con los objetivos para los cuales fue diseñado.
- (2) Desarrollar y probar el diseño estructural, es decir lo referente a la habilidad de la estructura a existir en el clima donde se encuentre (oleaje marea, tormentas, etc.)
- (3) Verificar la factibilidad del proceso constructivo, la operatibilidad, el mantenimiento, y los costos durante la vida útil de la obra.
- (4) Realizar el proyecto ejecutivo.
- (5) Construir la obra.
- (6) Monitorear y evaluar el desempeño de la obra.

Finalmente es importante mencionar los aspectos que pueden influir en el desarrollo de un diseño adecuado. En efecto, una buena ingeniería es la que “diseña bajo limitantes y condicionantes”. Dichas limitantes y condicionantes se enumeran y describen a continuación:



1) Entendimiento científico e ingenieril de la naturaleza. A pesar de que se tienen identificados los aspectos y procesos que forman la compleja física costera (viento, oleaje, corrientes, niveles de la superficie libre del agua, batimetría, geomorfología, estratigrafía, características del sedimento, transporte de sedimentos, etc.), los modelos plenamente dinámicos, tridimensionales, para simular el cambio en la batimetría y la línea de costa están aún en desarrollo.

2) Aspectos económicos. Los costos de un obra durante toda su vida útil son únicamente justificados cuando los beneficios económicos (valor de la propiedad, desarrollo económico, inversiones resultado de la solución del problema, etc) correspondientes son comparables, lo cual puede estudiarse formalmente a través del análisis costo-beneficio.

3) Aspectos de impacto ambiental. El análisis cauteloso del posible impacto ambiental por obras ingenieriles es algo de suma importancia, y afortunadamente en México los esfuerzos por concienciar y regular han ido en esa dirección, empezando por el requerimiento de presentar una manifestación de impacto ambiental (MIA) con cada proyecto que se quiera realizar. El impacto ambiental puede darse al modificar negativamente el hábitat terrestre y/o acuático, la calidad del agua, y el sistema natural de transporte de sedimentos (particularmente negativo en zonas adyacentes).

4) Aspectos institucionales, políticos, sociales y legales. Dichos aspectos tienen una gran influencia en el proceso de diseño, dados los conflictos de intereses que comúnmente generan las obras de protección costera.

5) Aspectos estéticos. Es importante considerar que por lo general la gente percibe las costas "vírgenes" y naturales como las que son estéticamente más agradables y placenteras que las costas artificialmente protegidas y estabilizadas con estructuras. Por lo tanto, en la actualidad estos aspectos son cada vez más tomados en cuenta para la optimización de los diseños de protección costera.

La situación en México en cuanto a planeación y diseño de infraestructura de protección costera es muy irregular, con una marcada predominancia a la falta de planeación para un manejo integral del litoral nacional. Existen varios ejemplos de planeación y diseño deficientes, desde bocas en lagunas costeras (e.g., Chacahua, Oaxaca; Panteones, Tabasco; Juluapan, Colima), a erosión playera (e.g., Cancún, Q. Roo; playas de Yucatán y de varios estados costeros). Sin embargo, no existe una base de datos de infraestructura de protección costera en México, por lo que es imposible hacer un recuento del estado y efectividad de dichas estructuras en el litoral nacional.

Hoy en día, los esfuerzos gubernamentales han tendido a mejorar la organización de las acciones y planeación tendiente a uniformizar el manejo costero en el país, pero es evidente que los actores y autoridades no han logrado todavía conjuntar eficientemente los planes, sinergias, esfuerzos, potencialidades de las diversas dependencias y organismos responsables de resolver los problemas de la costa y de monitorear el litoral Mexicano. Nuevamente, existen varios ejemplos de acciones emprendidas para lograr un manejo integral de las costas (como por ejemplo retiro de espigones por SEMARNAT, monitoreo de calidad del agua por SEMAR, zonificación y regulación de usos por ZOFEMATAC, etc), pero aún resta mucho por hacer, en particular coordinar dichos esfuerzos con una visión de conjunto.

CONCLUSIONES

México es uno de los países continentales con mayor extensión de litoral en el mundo, relativo a su superficie. Por ende, el litoral es una de sus mayores riquezas, pero desafortunadamente no se ha sabido aprovechar y mantener adecuadamente y de una manera sustentable.

La protección costera en México es un aspecto complejo de nuestra interacción con la naturaleza, y los factores que intervienen en la planeación y diseño de soluciones no son únicamente de índole ingenieril. La protección costera debe tomar en

cuenta aspectos de medio ambiente, sociales, económicos y políticos, que por lo general rebasan espacial y temporalmente el dominio que aparente abarca el problema en sí. Las soluciones a problemas de protección costera deben indudablemente ser de largo alcance, e incluirse en un marco planificado de manejo integral, en donde intervenga tanto el gobierno, como la sociedad, los particulares. Para tal efecto es necesario que los esfuerzos se coordinen primero a nivel local, pero también a nivel estatal y federal, en lo que podría llamarse un Plan Nacional de Manejo Costero.

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente trabajo ha sido posible gracias a la generosa colaboración de la Ing. Megu- mi Mantilla Tempaku y de la Ing. Dulce María Pérez Romero.

LITERATURA CITADA

CIA, 2002. The World Factbook 2002. 720 p.

Hinrichsen, D., 1998. Coastal Waters of the World: Trends, Threats, and Strategies. Washington D.C. Island Press. 298 p.

INEGI, 2001. XII Censo General de Población y Vivienda 2000. Síntesis de Resultados. INEGI. 164 p.

Losada, M.A., 1998. Estabilidad de Playas. Morfodinámica de los procesos litorales. Universidad de Cantabria 230 p.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (en 6 volumes).

Wright L.D., y A.D. Short, 1984. Morphodynamics variability of surf zones and beaches, a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.



