



Guía de soluciones naturales y basadas en la naturaleza para la restauración de costas en Puerto Rico

Abril 2024



FEMA

Preparado para:

FEMA, Oficina de Recuperación Conjunta (JRO, por sus siglas en inglés)
50 carretera PR-165, segundo piso, ala oeste
Guaynabo, Puerto Rico

Preparado por:

AECOM
19219 Katy Freeway, Suite 100
Houston, TX 77094
aecom.com

Advertencia:

Todo el contenido provisto en este documento es solo para fines educativos. FEMA no provee asesoramiento o datos técnicos o de ingeniería profesional a los solicitantes de subvenciones, y ninguna de la información o los ejemplos provistos en este documento se interpretará como tal. Los solicitantes deben desarrollar sus paquetes de solicitud con información, experiencia y datos obtenidos de forma independiente y específicos del proyecto. La información educativa provista en este documento se ofrece de forma general, hipotética y “tal cual”, sin garantías de exhaustividad, precisión, utilidad u oportunidad. Al tomar determinaciones de elegibilidad, FEMA considera solicitudes de subvención completas que contienen toda la información requerida, para garantizar que las actividades propuestas cumplan con todos los requisitos estatutarios, reglamentarios y programáticos aplicables.

Fotos de portada: AECOM

Todas las ilustraciones de este documento fueron creadas o son propiedad de AECOM, a menos que se indique lo contrario.

Cita recomendada:

FEMA. (2024). *Guía de soluciones naturales y basadas en la naturaleza para la restauración de costas en Puerto Rico.*

FEMA desea agradecer a The Nature Conservancy, Protectores de Cuencas, Inc. y a Vida Marina, Centro de Conservación y Restauración Ecológica en la Universidad de Puerto Rico en Aguadilla, por su colaboración y apoyo en el desarrollo de esta guía.



Información de calidad

Preparado por	Revisado por	Verificado por	Aprobado por
AECOM	AECOM The Nature Conservancy Protectores de Cuencas	AECOM The Nature Conservancy Protectores de Cuencas	Oficina de Recuperación Conjunta de FEMA

Historial de revisiones

Revisión	Fecha de Revisión	Detalles	Autorizador	Nombre	Título / Posición
1.0	Verificado por	Aprobado por			
2.0	3/8/2024	Final Draft			
3.0	5/1/2024	Revisión			

Nombre de la asociación / empresa

# Copias Físicas	Copia Digital	2.0

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos de esta guía	1
1.2. Contexto sobre la erosión costera	1
1.3. El papel de la infraestructura gris	2
1.4. SNBN en la estabilización de la línea de costa.....	3
2. Geografía de línea de costa	4
2.1. Playas de arena.....	5
2.2. Dunas	6
3. Metodologías y diseños conceptuales de las SNBN.....	6
3.1. Mejora del acceso público a la costa	8
3.1.1. Descripción de Soluciones y Objetivos	8
3.1.2. Entornos adecuados para una implementación exitosa	10
3.1.3. Materiales y equipos de construcción	10
3.1.4. Constructibilidad	10
3.1.5. Monitoreo y Manejo Adaptativo.....	15
3.1.6. Costos estimados.....	16
3.2. Restauración y creación de dunas	16
3.2.1. Descripción de Soluciones y Objetivos	17
3.2.2. Entornos adecuados para la restauración y creación de dunas.....	17
3.2.3. Materiales y equipos de construcción	18
3.2.4. Constructibilidad	19
3.2.5. Monitoreo y Manejo Adaptativo	21
3.2.6. Costo estimado	22
3.3. Selección de plantas.....	23
3.4. Señalización.....	24
3.5. Protección del sitio	25
3.6. Consideraciones regulatorias	25

4. Casos de estudio 27

4.1. Fortaleciendo la resiliencia de la costa de Puerto Rico ante el clima extremo y el cambio climático mediante la restauración ecológica de sus dunas costeras 27

4.2. Protectores de Cuencas: Mejorando la resiliencia costera en Puerto Rico mediante Soluciones Naturales y Basadas en la Naturaleza (SNBN) 30

Ilustraciones

Ilustración 00-1: Perfil típico de la playa	2
Ilustración 00-2: Arriba: antigua playa de arena en Punta Las Marías en San Juan, Puerto Rico. Abajo: mismo sitio después de la construcción de un mamparo de tablestacas de acero con una tapa de hormigón para controlar el oleaje y las inundaciones costeras. El mamparo agravó la pérdida de arena, una mayor erosión costera en la punta de la estructura, la reducción del acceso público y la pérdida de valores recreativos y ecológicos que antes se asociaban a esta zona de playa (N. Pérez, usado con permiso).....	3
Ilustración 00-3: Ejemplos de SNBN en la línea de costa	4
Ilustración 00-4: Perfil típico de la duna (Craig, 1984)	6
Ilustración 00-5: Paseo tablado construido por Protectores de Cuencas, Inc. (una organización no gubernamental), playa Tamarindo en la Reserva Natural del Bosque Estatal de Guánica. (Ríos, 2021, usado con su autorización)	9
Ilustración 00-6: Orientación del paseo tablado	11
Ilustración 00-7: Vista típica de la sección de paseo tablado por las dunas.....	12
Ilustración 00-8: Vista lateral típica del paseo por las dunas.....	13
Ilustración 00-9: Sección típica de estacionamiento de acceso	14
Ilustración 00-10: Tramo típico de carretera de acceso de dos carriles.....	14
Ilustración 0-11: Presa de control de drenaje natural típica.....	15
Ilustración 012: Sección típica de restauración dunar.....	20
Ilustración 0-13: Diseño típico de matrices de biomímica (R.J. Mayer, usado con permiso).....	21
Ilustración 0-14: Sección típica de la matriz de biomímica	21
Ilustración 0-15: Límites de ZMT.....	26
Ilustración 0-16: Dispositivos de captura de arena utilizados por Vida Marina (NOAA)	29
Ilustración 0-17: Arriba: prerrestauración, 2019; abajo: postrestauración, 2020. Fotos de antes y después que muestran el éxito del trabajo de Vida Marina, calle Pedro Albizu Campos, playa Bajuras, Isabela (Vida Marina).....	30
Ilustración 0-18: Construcción de montículos de arena en playa Tamarindo (Protectores de Cuencas, usado con permiso).....	31
Ilustración 0-19: Instalación de paseo tablado y restricción de acceso en playa La Jungla (Protectores de Cuencas, usado con permiso)	32

Tablas

Tabla 0-1: Acceso a la costa: primeros costos estimados de construcción (2024 dólares estadounidenses).....	16
Tabla 0-2: Primeros costos estimados de construcción para la restauración y creación de dunas (2024 dólares estadounidenses)	22
Tabla 0-3: Vida Marina estudio de caso de dunas: tipo de proyecto, costo y socios.....	27
Tabla 0-4: Protectores de Cuencas SNBN caso de estudio, tipo de proyecto y socios	31

1. Introducción

El cambio climático sigue exponiendo desafíos significativos en las zonas costeras. La necesidad de estrategias para el manejo sostenible y resiliente de las costas es cada vez más crítica.

Este documento tiene como objetivo proveer al personal de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) y a las partes interesadas una guía sobre el uso de Soluciones Naturales y Basadas en la Naturaleza (SNBN) para la estabilización de costas en Puerto Rico. La guía aborda temas relacionados a la protección, mejora o restauración, y la creación de dunas de arena, según las metas estratégicas de FEMA para la resiliencia climática.²

En consonancia con las SNBN, “una solución basada en la naturaleza (SNBN) es una acción que incorpora características y procesos naturales para proteger, conservar, restaurar, utilizar de forma sostenible y gestionar los ecosistemas naturales o modificados para enfrentar desafíos socioambientales y al mismo tiempo proveer beneficios colaterales cuantificables que benefician tanto a las personas como a la naturaleza”.¹

1.1. Objetivos de esta guía

Los objetivos de esta guía son:

- Aumentar el conocimiento y la comprensión de las SNBN y su rol en la estabilización de la línea costera.
- Proveer una guía técnica sobre la implementación de las SNBN para la protección de la costa en Puerto Rico.
- Ilustrar los beneficios y la eficacia de las SNBN en la mitigación de erosión costera y el aumento de la resiliencia costera.
- Facilitar la toma de decisiones informadas al seleccionar SNBN en varios contextos costeros de tal manera que puedan calificar para fondos relacionados con la mitigación de FEMA.

1.2. Contexto sobre la erosión costera

Un perfil de playa es el resultado acumulativo de varias fuerzas naturales que varían estacionalmente. La dirección y magnitud de las corrientes litorales o costeras, las mareas, las olas, el viento, las características de sedimentos y vegetación contribuyen al perfil de la playa. Los desequilibrios en estas variables pueden hacer que las costas se erosionen tierra adentro o se acrecienta hacia el mar. Durante eventos extremos como tormentas tropicales y huracanes, las alturas elevadas de las olas y las marejadas pueden hacer que los ecosistemas costeros y de playa se retiren más tierra adentro. Con el tiempo, las costas pueden acrecentar hacia el mar si hay

¹ Departamento del Interior de Estados Unidos, "Nature-Based Solutions" (sin fecha), <https://www.doi.gov/ppa/integrative/nature-based-solutions>.

² FEMA, *Plan estratégico de FEMA 2022-2026: construyendo el FEMA que nuestra nación necesita y merece* (sin fecha), https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_2022-2026-strategic-plan.pdf.

suficiente deposición de sedimentos y no hay estructuras artificiales que limiten u obstruyan el proceso. Un perfil típico de playa se muestra en la Ilustración 00-1 como referencia.

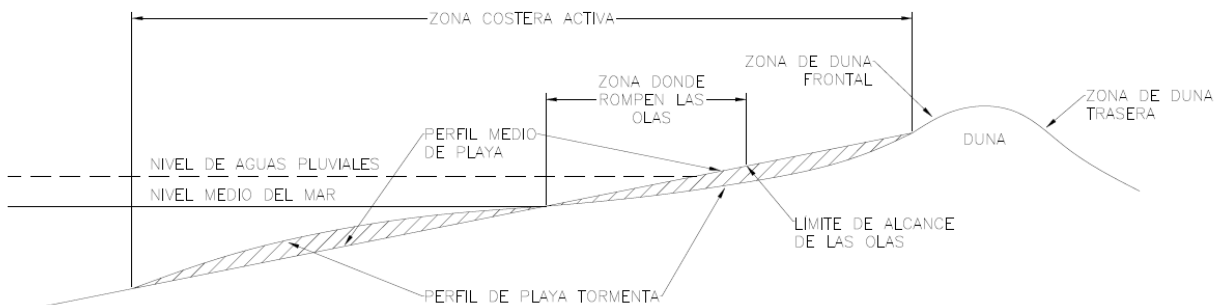


Ilustración 00-1: Perfil típico de la playa

La erosión costera puede provocar la pérdida de tierras, infraestructuras y hábitats a lo largo de la costa, y a su vez, amenaza a las comunidades y los ecosistemas aledaños. Más aún, la erosión puede ser exacerbada por factores como el aumento del nivel del mar, el aumento en la intensidad de las tormentas, y la construcción y el desarrollo que interrumpen o alteran las fuerzas naturales que contribuyen a una costa saludable y dinámica.

1.3. El papel de la infraestructura gris

La infraestructura costera gris tradicional es efectiva en algunos contextos. Sin embargo, puede generar impactos ambientales, económicos y sociales adversos, lo que podría hacerla insostenible a largo plazo. Por ejemplo, los mamparos, revestimientos y diques pueden involuntariamente acelerar las tasas de erosión en la base de una estructura, o adyacente a ella, donde se reflejan las olas, lo que conlleva a un aumento de la profundidad del agua en la base de la estructura y a una reducción de la deposición de sedimentos con el tiempo. Otras técnicas de infraestructura gris, como los espigones y los embarcaderos, atrapan los sedimentos en el lado de la deriva de las corrientes costeras y fomentan la acreción. Sin embargo, lo contrario sucede en el lado de la deriva descendente, donde los sedimentos no se depositan debido a la interrupción del transporte costero por parte de la estructura.

La infraestructura costera gris, como se muestra en la foto inferior de la Ilustración 00-2 puede tener impactos residuales en los que la protección temporal en un área lleva a un aumento de la erosión en áreas adyacentes no protegidas. Estos impactos residuales pueden llevar a la degradación de la costa. Entre ellos: la pérdida de valor para la recreación, el turismo y la vida silvestre (por ejemplo, anidación de tortugas marinas); obstrucción permanente del acceso a la costa; y la pérdida de atractivo visual.



Ilustración 00-2: Arriba: antigua playa de arena en Punta Las Marías en San Juan, Puerto Rico. Abajo: mismo sitio después de la construcción de un mamparo de tablestacas de acero con una tapa de hormigón para controlar el oleaje y las inundaciones costeras. El mamparo agravó la pérdida de arena, una mayor erosión costera en la punta de la estructura, la reducción del acceso público y la pérdida de valores recreativos y ecológicos que antes se asociaban a esta zona de playa (N. Pérez, usado con permiso).

1.4. SNBN en la estabilización de la línea de costa

Las SNBN consisten en estrategias que utilizan procesos y ecosistemas naturales para mitigar la erosión costera, mejorar la resiliencia de la costa y ofrecer un enfoque holístico para el manejo de la costa. Estrategias como la restauración de dunas utilizan la naturaleza para amortiguar la energía de las olas, estabilizar los sedimentos y reducir el impacto de las marejadas ciclónicas.

Simultáneamente, la restauración de dunas mantiene o mejora los activos naturales que proveen la base para el turismo y las actividades recreativas relacionadas con la playa. Estas estrategias también suelen proveer múltiples beneficios colaterales, como la creación de hábitats, la mejora de la calidad del agua y las oportunidades de turismo recreativo. El uso de SNBN para estabilizar las costas no solo se alinea con los objetivos de resiliencia climática de FEMA, sino que también apoya una resiliencia ecológica y comunitaria en general. La

Ilustración 00-3 representa ejemplos de SNBN para costas arenosas, algunos de los cuales se profundizan con más detalle en esta guía.

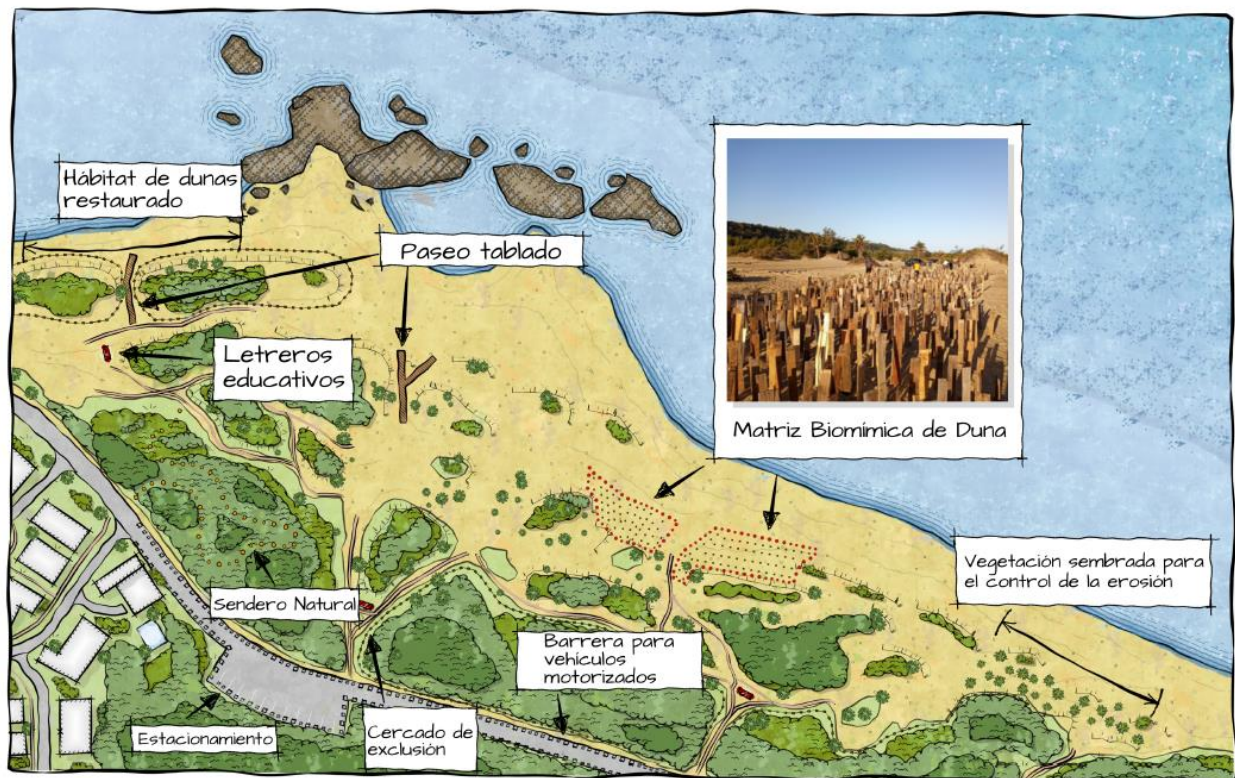


Ilustración 00-3: Ejemplos de SNBN en la línea de costa

2. Geografía de línea de costa

A lo largo de la línea de costa de Puerto Rico, los arrecifes de coral, el lecho de hierbas marinas, los bosques de manglares, los afloramientos rocosos y las dunas son hábitats importantes conocidos por su capacidad para amortiguar las olas y las corrientes que están asociadas con el retroceso de la costa y las inundaciones. Los ecosistemas sanos sustentan los hábitats adyacentes, que en conjunto proveen más protección que un ecosistema o hábitat individual tanto en condiciones de tormenta como cuando no hay una tormenta. Por lo tanto, es fundamental considerar las

interrelaciones entre los ecosistemas y cómo maximizar sus efectos combinados al evaluar las SNBN para costas específicas.³

Para simplificar, esta guía se centra en la protección, mejora/restauración y/o creación de dunas de arena como una SNBN clave para promover la estabilización de la costa.

2.1. Playas de arena

Las playas de Puerto Rico son diversas, desde amplias extensiones de arena hasta playas más pequeñas separadas por afloramientos rocosos. La mayoría de las playas incluyen una mezcla de cuarzo, arena de feldespato, fragmentos de conchas y escombros de coral. Las playas menos comunes son aquellas que incluyen costas limitadas por arena que consisten en lecho de roca volcánica o depósitos aluviales de ríos cercanos.

La costa norte de Puerto Rico cuenta con playas de arena dinámicas que están sujetas a la alta energía de las olas, lo que contribuye a un patrón de erosión más agresivo que en otras partes de la isla. Por el contrario, la costa sur experimenta menos acción de las olas, debido en parte a una plataforma más ancha y a profundidades de agua menores que se acercan a la costa. La costa sur de Puerto Rico también se caracteriza por playas más pequeñas que se entrelazan con manglares y marismas.

En Puerto Rico, las actividades humanas agravan la erosión costera. Por ejemplo, los proyectos turísticos, residenciales, de transporte y de servicios públicos con frecuencia intensifican los procesos de erosión natural. Igualmente, el tráfico peatonal regular y la construcción cerca de la línea de costa arenosa alteran el equilibrio natural de sedimentos, lo que lleva a tasas de erosión más rápidas.

El aumento del nivel del mar y la intensidad de las tormentas provocadas por el cambio climático continuarán agravando la erosión costera, los efectos de las tormentas y las inundaciones costeras, lo que plantea riesgos sustanciales para los hábitats, la infraestructura y la seguridad de las comunidades. La pérdida de área de playa puede llevar a un sin número de consecuencias ecológicamente negativas: entre ellas, la pérdida de zonas de anidación de tortugas marinas, al igual que el debilitamiento de las barreras naturales que protegen las áreas interiores de las marejadas ciclónicas y las inundaciones costeras. Por el contrario, las playas más anchas con dunas y vegetación son más estables y menos propensas a la pérdida de sedimentos con el tiempo y proveen diversos beneficios ecológicos a los ecosistemas inmediatos y circundantes.

³ G. Guannel, K. Arkema, P. Ruggiero y G. Verutes, "El poder de tres: los arrecifes de coral, las praderas marinas y los manglares protegen las regiones costeras y aumentan su resiliencia" (PLoS ONE 11(7), 2016), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>.

2.2. Dunas

Las dunas son una característica importante a lo largo de la costa norte de Puerto Rico, donde las condiciones naturales favorecen su formación. Las dunas a lo largo de la costa norte exhiben una variedad de formaciones, desde bermas o montículos de arena poco estructurados hasta estructuras de arena o eolianita más consolidadas. Las dunas poco estructuradas se encuentran típicamente en áreas con mayor movilidad de arena, donde la acción del viento y las olas da forma continuamente a los paisajes de dunas. Un perfil de duna típico se muestra en la Ilustración 00-4.

La estabilidad variable de las dunas en Puerto Rico presenta desafíos distintivos. Las dunas poco estructuradas y de baja elevación son particularmente susceptibles a una mayor erosión. Esto conlleva a la pérdida de estas barreras naturales y, a su vez, expone las áreas interiores a mayores peligros costeros. Las dunas de baja elevación, especialmente las que carecen de vegetación, ofrecen una protección limitada y se alteran o eliminan fácilmente por la marejada ciclónica o la acción de las olas de alta energía. La erosión de estas dunas puede resultar en una mayor vulnerabilidad de la costa, pérdida de hábitats para las especies que dependen de las dunas y posibles impactos negativos en la infraestructura aledaña a las playas.



Ilustración 00-4: Perfil típico de la duna (Craig, 1984)

3. Metodologías y diseños conceptuales de las SNBN

Esta sección discute dos estrategias de SNBN para mejorar la estabilización de la costa que son adecuadas para los ambientes típicos de la línea de costa arenosa en Puerto Rico. Ambas estrategias tienen como objetivo promover un ecosistema de playa más saludable y estable. Estas estrategias se logran mediante la implementación de proyectos que incorporan SNBN.

Las estrategias son las siguientes:

- Mejorar el acceso público a la costa para proteger las dunas existentes mediante el desarrollo de accesos formales a la playa, como carreteras mejoradas, áreas de estacionamiento, paseos tablados; véase Sección 3.1
- Restauración y creación de dunas; véase Sección 3.2

La Sección 3.3 discute especies de plantas que podrían usarse para cualquiera de las estrategias, la época de siembra y la disponibilidad de plantas.

Ambas estrategias deben incluir letreros para reafirmar o concienciar a los bañistas sobre la importancia de conservar los ecosistemas de la zona, así como las normas o mejores prácticas que deben seguirse para mantener las funciones y los valores de la zona.

La descripción de cada estrategia en las secciones 3.1 y 3.2 incluye soluciones, sitios de proyecto aplicables, construcción, planos de sección típicos, monitoreo y costos estimados. Los costos detallados (costo del equipo, el material y la mano de obra necesarios para cada tipo de proyecto) están disponibles para descargar en el sitio web de FEMA⁴ y se pueden usar para estimar el costo total del proyecto en función de la extensión o el área total del proyecto.

Los proyectos propuestos que se discuten en esta guía podrían desarrollarse en terrenos de dominio público que corresponden a la zona marítimo-terrestre (ZMT) y que incluyen las dos servidumbres colindantes que comprenden un ancho total de 65.6 pies (20 metros). Por lo tanto, es fundamental determinar la extensión y evaluar estas tierras. También es esencial reconocer la necesidad de un espacio abierto y sin desarrollar para cualquiera de los proyectos propuestos. La Sección 3.5 contiene más información sobre la ZMT. Es posible que algunos proyectos necesiten utilizar una parte de las tierras privadas adyacentes para que los proyectos sean más eficaces en la protección de las estructuras públicas y privadas cercanas de la erosión costera y las inundaciones por marejadas ciclónicas.

Ninguno de los proyectos que se mencionan en esta guía debe desarrollarse en la zona donde rompen las olas, ya que esas zonas son frecuentemente bañadas por mareas y las olas suben por la playa durante condiciones climáticas normales (véase Ilustración 00-1). El borde hacia tierra de la zona donde rompen las olas o límite de zona de rodaje varía a lo largo del año en respuesta a las mareas y oleajes. Para tener en cuenta la variabilidad, el límite existente de la vegetación frente al océano en un sitio dado puede utilizarse como punto de referencia para determinar el límite hacia tierra de la zona donde rompen las olas. Una vez identificada, la línea de vegetación se puede utilizar para establecer el límite de la extensión oceánica del proyecto. En las costas sin vegetación, el límite aproximado hacia tierra de la zona donde rompen las olas se puede determinar al identificar el área a la que se llega por el levantamiento de las olas de marejadas asociadas con los frentes fríos que llegan a Puerto Rico durante el invierno.

Las playas de arena en la costa noroeste, norte y noreste de la isla generalmente se estrechan o retroceden más en enero y febrero. Lo mismo puede suceder en la costa sur, pero a finales del verano y principios del otoño (agosto a septiembre), en respuesta a las marejadas asociadas con las ondas tropicales que se mueven en el Mar Caribe. En todo caso, se recomienda delimitar la zona de oleaje en una playa determinada antes de iniciar cualquiera de los proyectos discutidos en esta guía. La delineación debe ser realizada por un profesional (por ejemplo, agrimensor profesional registrado, oceanógrafo, geomorfológico, entre otros).

⁴ [4339 | FEMA.gov](https://www.fema.gov)

Cualquier estructura construida para guiar el acceso a la playa, lo que incluye las estructuras destinadas a mejorar o crear una duna de arena, tendrán más posibilidades de establecerse si evita la zona donde rompen las olas y, con ello, cualquier impacto frecuente relacionado con el oleaje. Evitar la zona donde rompen las olas también permite sembrar y utilizar cualquier vegetación para asistir a que las dunas se establezcan bien y sean resistentes. Siguiendo estas precauciones, se crean dunas resistentes a los efectos de oleaje extraordinario y eventos de inundación por marejada ciclónica.

La planificación del proyecto debe incluir la determinación de la posible presencia de especies amenazadas o en peligro de extinción en las dunas o a lo largo de la costa donde se llevarán a cabo los trabajos, lo que incluye las especies que pueden utilizar el área para la reproducción. Más aún, el cronograma de construcción de un proyecto debe incluir una consideración de la temporada de anidación de especies costeras como tortugas marinas y aves migratorias que ponen sus huevos detrás de la marca de agua de la marea alta (por ejemplo, el tinglar, chorlos y playeros) o más arriba en la duna donde puede haber vegetación leñosa (por ejemplo, tortugas carey). Se debe contratar a un profesional cualificado, como un biólogo o ecólogo, para que inspeccione y monitoree el sitio de construcción y sus alrededores. Realizar estas tareas durante las primeras horas de la mañana antes de que comiencen los trabajos de construcción sirve para identificar la presencia de nidos y evitar posibles impactos sobre estas especies.

3.1. Mejora del acceso público a la costa

En esta sección se detallan los proyectos que abordan el acceso público a través de SNBN.

3.1.1. DESCRIPCIÓN DE SOLUCIONES Y OBJETIVOS

Establecer caminos despejados para facilitar el acceso a la playa es clave para evitar que el tráfico peatonal y vehicular dañen o destruyan la vegetación; también evita que se creen depresiones en las dunas. Los paseos tablados que atraviesan los sistemas de dunas y las partes sensibles del entorno de la playa pueden reducir o eliminar el tráfico peatonal en o entre secciones de dunas (Ilustración 00-5) manteniendo el acceso público directo a las costas. Impedir que el tráfico peatonal atraviese las dunas y otros ecosistemas sensibles evita que la vegetación autóctona sea pisoteada, aumentando así su capacidad de prosperar y expandirse. Las soluciones de acceso sencillas y de bajo costo son fundamentales para reducir la erosión y aumentar la resiliencia de los ecosistemas de playas y dunas.



Ilustración 00-5: Paseo tablado construido por Protectores de Cuencas, Inc. (una organización no gubernamental), playa Tamarindo en la Reserva Natural del Bosque Estatal de Guánica. (Ríos, 2021, usado con su autorización)

Prohibir el tráfico vehicular en las zonas costeras naturales es igualmente esencial para la salud de los ecosistemas. Además del tráfico peatonal, el tráfico vehicular en los sistemas de dunas o hacia playas degrada severamente la vegetación, afecta los flujos naturales de agua y aumenta la erosión. Consecuentemente, las carreteras cuidadosamente construidas o mejoradas y la infraestructura de estacionamiento claramente designada que facilite el acceso público a las costas pueden tener impactos positivos significativos en el ecosistema. El uso de bolardos, cercas o rocas son formas simples pero efectivas de confinar el tráfico vehicular a la carretera. Además, un camino de grava bien construido y mantenido puede proporcionar acceso y alentar al público a usar el estacionamiento designado que está idealmente emparejado con un acceso cercano y directo a la costa. Las áreas construidas adecuadamente pueden manejar la escorrentía superficial para proteger la integridad de la infraestructura de acceso, al mismo tiempo mejoran la calidad del agua y evitan la erosión causada por los flujos de escorrentía. Estructuras de calidad con accesos directos fomentarán que el público tome el camino de menor resistencia a la costa y pueden diseñarse para proteger y promover la resiliencia costera.

Mejoras al acceso de las playas pueden proveer beneficios sociales y económicos a las comunidades locales. Los beneficios se pueden cuantificar para alinearse con los requisitos de las subvenciones de FEMA, incluyendo los análisis de costo-beneficio. Al mismo tiempo proporcionan medidas de justicia ambiental y equidad.

3.1.2. ENTORNOS ADECUADOS PARA UNA IMPLEMENTACIÓN EXITOSA

Las mejoras de acceso que se discuten aquí son ideales tanto para las áreas urbanas como para las rurales, pero las candidatas más adecuadas para la mejora son las playas, las dunas y las costas que han sido degradadas por las actividades humanas. La necesidad de estas mejoras es evidente en lugares remotos donde la infraestructura de acceso es limitada resultando en un tráfico peatonal y de vehículos no regulado en áreas ambientalmente sensibles. Las áreas urbanas pueden requerir mejoras de acceso donde el espacio es limitado (por ejemplo, para estacionamiento) o donde el acceso sin restricciones es a través de terrenos adyacentes no urbanizados para evitar la infraestructura urbana.

3.1.3. MATERIALES Y EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN

La base de grava y otros materiales de superficie son generalmente los principales agregados de construcción utilizados en proyectos de mejora de carreteras y estacionamientos. Es imperativo para la compactación, durabilidad y vida útil de la infraestructura que los materiales estén bien clasificados y compactados adecuadamente. Las motoniveladoras y los compactadores de rodadura vibratoria normalmente son utilizados para dar forma, nivelar y compactar material de carreteras. Las excavadoras y los camiones volquete se utilizan comúnmente para excavar material *in situ* si es necesario, dependiendo de las condiciones del lugar. La tela geotextil se coloca debajo de la capa base y consiste en una tela termoadhesiva o tejida. El equipo de hidrosiembra que se utiliza normalmente para el restablecimiento del césped sobre el grado excavado y las áreas perturbadas por el movimiento de equipos pesados consta de bombas, tanques de lodos, mangueras y una boquilla de pulverización. El pedazo de tierra cubierto de hierba puede utilizarse para restablecer el césped y requiere menos equipo, pero no suele ser tan económico para proyectos a gran escala.

Las estructuras peatonales de las dunas comúnmente se construyen con madera y herramientas fácilmente disponibles por proveedores de madera o tiendas de mejoras para el hogar. Para proteger las estructuras de madera de la podredumbre, los insectos y la intemperie, es necesario utilizar madera tratada a presión. Los materiales de construcción compuestos mezclados con partículas de madera, plásticos y otros aditivos también están disponibles y se usan comúnmente para terrazas. Los materiales de construcción compuestos ofrecen más resistencia a la intemperie y mayor longevidad que la madera, pero a un precio mayor. Las estructuras peatonales de las dunas pueden ser construidas por trabajadores cualificados con herramientas manuales comunes, como taladros y destornilladores de impacto. Los taladros de gasolina portátiles y los perforadores de suelo manuales son ideales para colocar pilotes de paso por las dunas. Sin embargo, no se recomienda el uso de equipos grandes, como tractores y accesorios de barrena para minicargadoras, debido al impacto del equipo en el sistema de dunas.

3.1.4. CONSTRUCTIBILIDAD

Los paseos tablados, las pasarelas y las escaleras que atraviesan las dunas deben estar orientados adecuadamente para evitar la creación de túneles dañinos por el viento y las olas. Generalmente se recomienda construir el último segmento de 15 a 20 pies de la estructura en un ángulo alejado de la dirección dominante del viento y las olas, como se muestra en la Ilustración 00-6, Ejemplo B. El

cambio de alineación se puede construir en un área más protegida tierra adentro para reducir la longitud de la pasarela y, con ello, la huella resultante y el impacto asociado en el costo de la vegetación y la construcción.

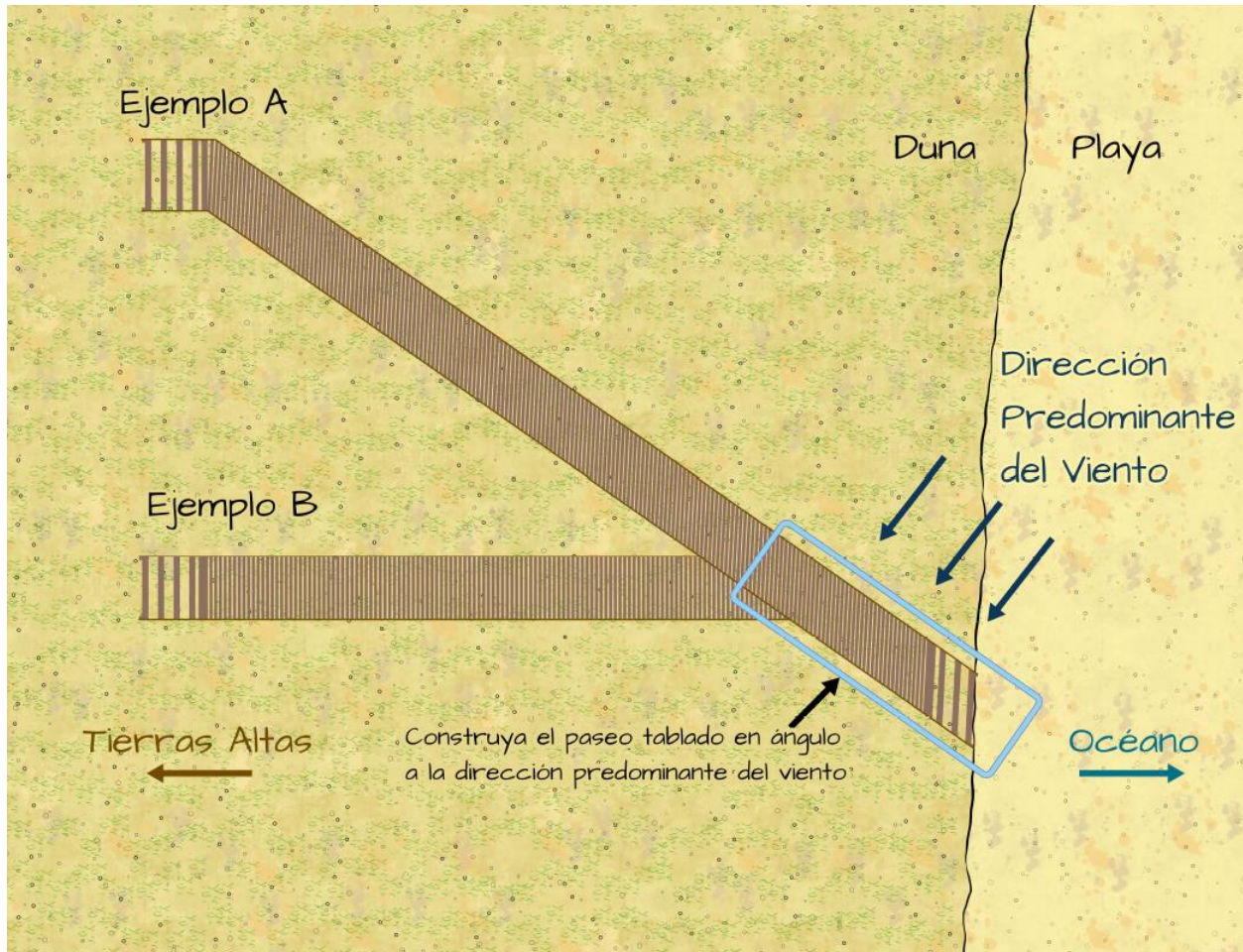


Ilustración 00-6: Orientación del paseo tablado

Entre la Ilustración 00-7 a la Ilustración 0-11 se representan secciones típicas de las soluciones propuestas en esta guía para las mejoras de acceso (pasos de dunas e infraestructura de estacionamiento y carreteras). Las cifras son solo para fines informativos; las condiciones para el diseño de cada proyecto pueden variar, por ende, las estructuras y soluciones deben diseñarse para servir las condiciones particulares del lugar del proyecto de manera efectiva y segura.

Paseo tablado por las dunas

Una sección típica de un paseo tablado por dunas de 8 pies de largo se detalla en la Ilustración 00-7 y la Ilustración 00-8. Los postes de soporte deben clavarse un mínimo de 3 pies en la pendiente existente para un soporte adecuado utilizando una barrena de gasolina de mano. Además, la estructura debe estar 3 pies por encima del nivel existente para: (a) permitir la penetración

adecuada de la luz solar en la vegetación que se encuentra debajo, (b) permitir que la arena se mueva y (c) evitar posibles impactos en la estructura por el aumento de las olas durante los eventos extremos de marejada ciclónica u oleaje. Las secciones de entrada y salida pueden consistir en rampas o escaleras, dependiendo de la elevación y la distancia disponible para atar al paso de las dunas.

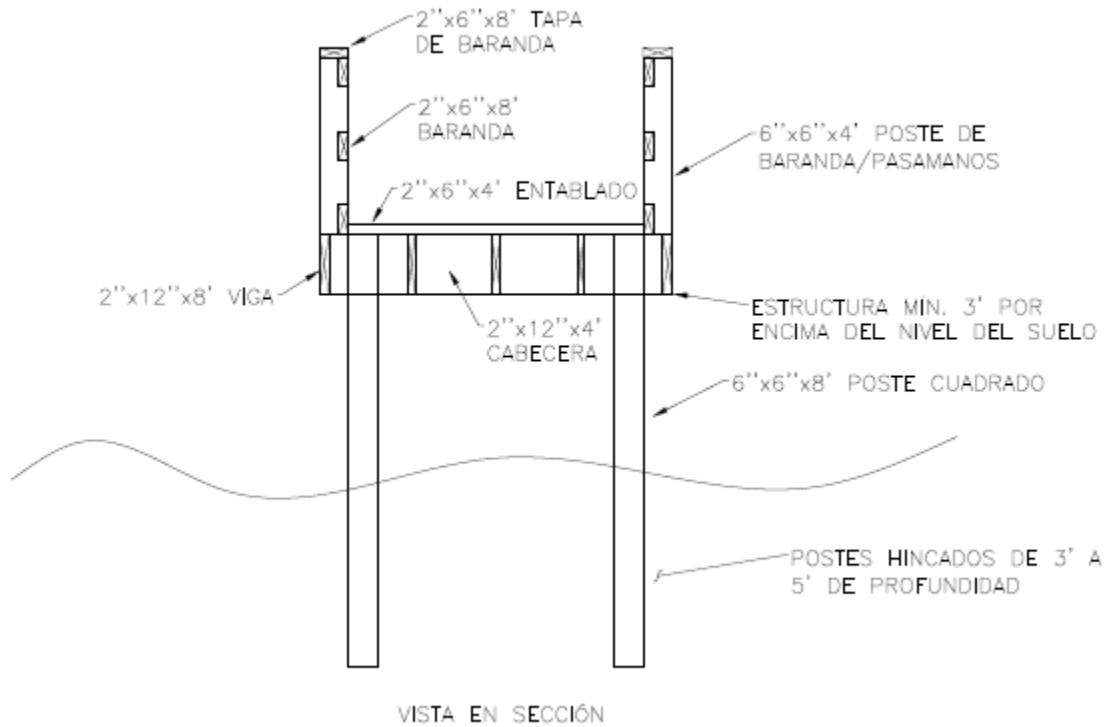


Ilustración 00-7: Vista típica de la sección de paseo tablado por las dunas

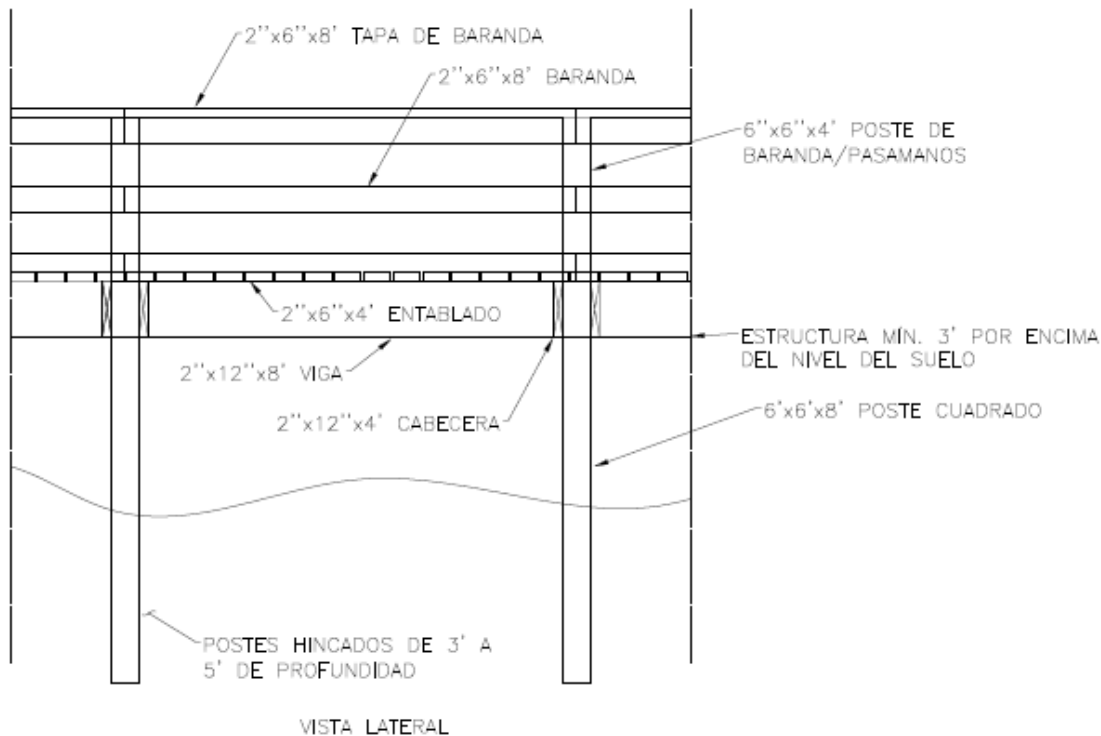


Ilustración 00-8: Vista lateral típica del paseo por las dunas

Estacionamiento e infraestructura vial

La infraestructura típica de estacionamiento y carreteras para acceder a una costa se muestra en la Ilustración 00-9 y la Ilustración 00-10. Las secciones de estacionamiento y carreteras consisten en una superficie compactada de 6 y 12 pulgadas y material base bien graduado, respectivamente. Las áreas de estacionamiento y las carreteras están confinadas por bolardos espaciados cada 6 pies para restringir el acceso vehicular e incluyen zanjas de drenaje laterales dimensionadas para el transporte adecuado de la escorrentía para evitar la erosión y mejorar la calidad del agua. La pendiente transversal de la carretera es de 24:1 desde la corona hasta el borde del pavimento. También la pendiente transversal del área de estacionamiento puede variar según las características del lugar y las dimensiones del área de estacionamiento. Es recomendado nivelar adecuadamente el área de estacionamiento para drenar la escorrentía hacia cada franja de drenaje y a su vez no debe ser más empinada que la pendiente transversal de la carretera de 24:1. La implementación de otras técnicas de drenaje de SNBN, como jardines de lluvia, puede mitigar aún más la calidad del agua de escorrentía, así como también manejar el exceso de flujos de escorrentía. Esta guía presenta dimensiones típicas como referencia, sin embargo, se deben utilizar las guías y reglamentos locales tales como manuales de diseño de carreteras, los estándares y los criterios para verificar la conformidad con los requisitos locales.

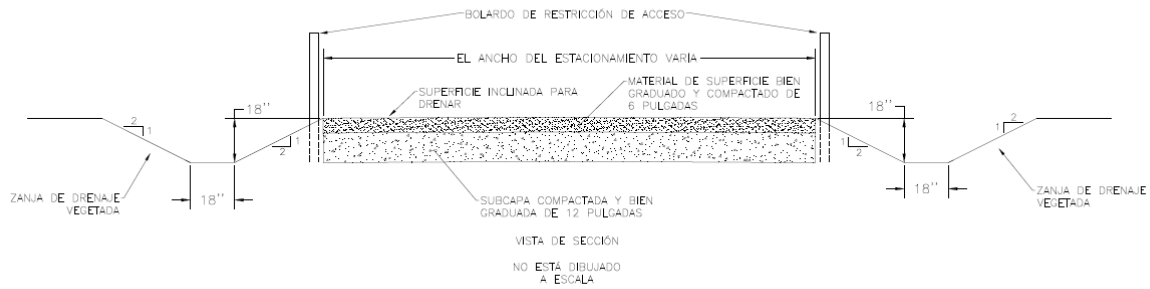


Ilustración 00-9: Sección típica de estacionamiento de acceso

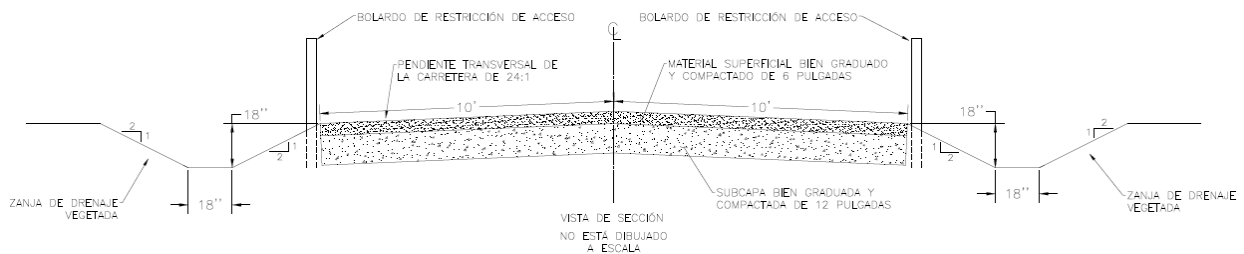


Ilustración 00-10: Tramo típico de carretera de acceso de dos carriles

Presa de control natural de la zanja de drenaje con vegetación. Ampliando la Ilustración 00-9 y la Ilustración 00-10, una vista típica de la zanja con vegetación, también conocida como presa de control natural, se muestra en la Ilustración 0-11. Dentro de los bancos revestidos de hierba de las zanjas de drenaje se debe plantar un segmento denso de hierbas nativas de raíces más profundas o arbustos, rodeados por una fina capa de escollera de 6 pulgadas alrededor de la vegetación. La punta de la escollera de la presa de control ayudará a prevenir la erosión alrededor de la base de las plantas en eventos extremos. El espaciamiento de la presa de control debe determinarse por la pendiente a lo largo de la zanja donde la altura efectiva de retención de agua de cada presa de retención de contención sucesiva (la altura del agua que se acumula frente a la presa de contención

durante una tormenta) se alinea con la parte inferior de la elevación de la hilera (línea de flujo) de la presa de contención aguas arriba.

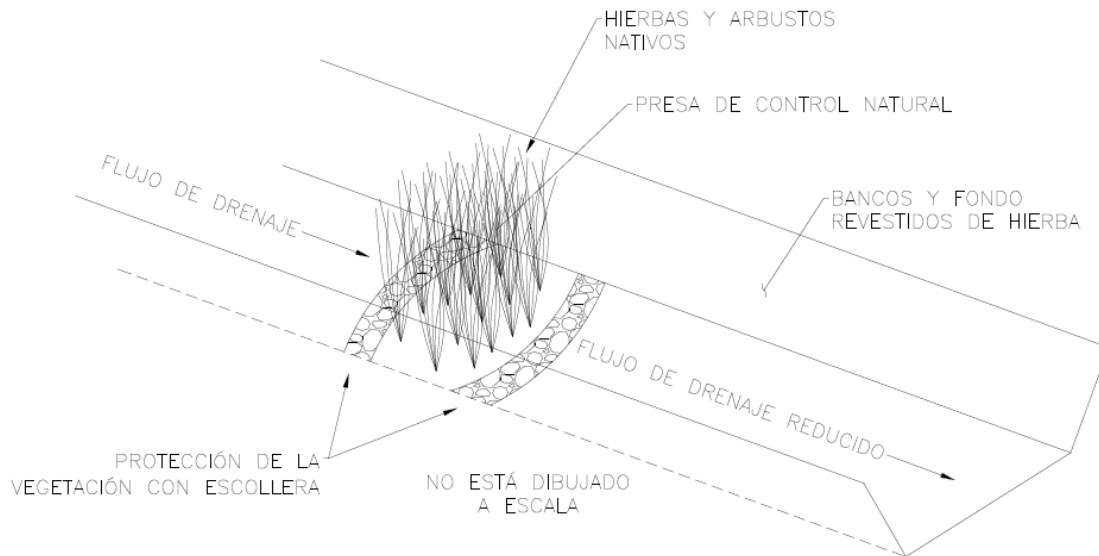


Ilustración 0-11: Presa de control de drenaje natural típica

3.1.5. MONITOREO Y MANEJO ADAPTATIVO

El crecimiento de las dunas, al igual que la supervivencia de la vegetación debajo de las estructuras peatonales de las dunas, deben ser monitoreados a medida que las elevaciones de las dunas cambian. El suelo debajo del paso de las dunas puede acumular arena o erosionarse con el tiempo debido a la arena transportada por el viento o a las olas elevadas y los eventos de inundación. El monitoreo del cambio a lo largo del tiempo es importante para la supervivencia de la vegetación debajo de la estructura y la estabilidad estructural de los pilotes que soportan el paso de dunas. La cobertura de vegetación y luz solar directamente debajo de las estructuras peatonales de las dunas también debe monitorearse para garantizar que la cantidad de luz solar debajo de la estructura sea suficiente. El espacio de la plataforma se puede aumentar para permitir más luz solar a través de la estructura hacia la vegetación que se encuentra debajo, pero no tanto como para convertirse en un tropiezo u otro peligro para el público.

La estructura del paso de la duna debe inspeccionarse visualmente de forma regular para detectar problemas estructurales, como tablas rotas, pilotes desplazados, tonillos corroídos y cualquier otro material de conexión. Toda estructura o material que se haya roto o dañado debe reemplazarse de inmediato. También, para proteger la seguridad pública, se pueden usar conos o cintas de tráfico para acordonar el acceso a un paso peatonal de dunas hasta que se repare.

La infraestructura vial y de estacionamiento debe ser monitoreada para detectar hoyos, baches, erosión vial, infraestructura de drenaje degradada y estructuras de restricción de acceso de vehículos dañadas, como bolardos, cercas y rocas. Según la Administración Federal de Carreteras, el costo estimado de los ciclos anuales de mantenimiento de 6 años para las carreteras de grava fue de aproximadamente \$18,000 por milla en 2015.⁵ Tomando en cuenta la inflación, el costo de mantenimiento estimado actual (2024) de 6 años es de aproximadamente \$23,750 por milla.⁶ El monitoreo frecuente al igual que el mantenimiento o reparación oportunos de los problemas identificados pueden ayudar a prevenir el empeoramiento de los impactos y reducir los costos generales. Por último, la infraestructura vial y de estacionamiento debe inspeccionarse después de eventos climáticos significativos para identificar cualquier necesidad de reparación o mantenimiento.

3.1.6. COSTOS ESTIMADOS

Los costos de las soluciones de acceso se compilaron a partir de los costos de materiales, equipos y mano de obra que representan la construcción de las secciones típicas discutidas en la Sección 3.1. Los costos se enumeran en la Tabla 0-1: Costos estimados de construcción por primera vez en el acceso a la costa (dólares estadounidenses de 2024) . Los costos unitarios utilizados para desarrollar los costos estimados pretenden ser representativos de los costos en Puerto Rico (dólares estadounidenses de 2024).

Tabla 0-1: Costos estimados de construcción por primera vez en el acceso a la costa (dólares estadounidenses de 2024)

Sección típica	Costo estimado de construcción por unidad
Paseo sobre dunas	\$80 a \$98 / pie lineal \$750 barrena de gasolina (precio fijo)
Mejoras a las carreteras y caminos	\$712,000 a \$871,000 / milla
Mejoras a estacionamientos	\$56 a \$69 por yarda cuadrada

3.2. Restauración y creación de dunas

En esta sección se detallan los proyectos que abordan la restauración y creación de dunas a través de SNBN.

⁵ FHWA (Administración Federal de Carreteras), Guía de Construcción y Mantenimiento de Caminos de Grava (2015), <https://www.fhwa.dot.gov/construction/pubs/ots15002.pdf>.

⁶ Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU., "Calculadora de inflación del IPC" (sin fecha), https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm.

3.2.1. DESCRIPCIÓN DE SOLUCIONES Y OBJETIVOS

La restauración de dunas, lo cual incluye, su protección, reconstrucción y mejora, así como la creación de dunas, son métodos importantes para aumentar la resiliencia y la estabilización a largo plazo de los ecosistemas costeros arenosos. La restauración de dunas degradadas y erosionadas puede incluir la interceptación de arena de sedimentos transportados por el viento o el transporte de arena a la costa. Se ha demostrado que las vallas o estacas reducen el viento a una velocidad a la que el sedimento cae fuera de suspensión, se acumula y acaba estableciendo dunas alrededor de la estacada.⁷

Las cercas y otras técnicas de acumulación de arena han llevado al desarrollo de las matrices de biomímica como una solución SNBN en donde tablas se esparcen uniformemente de centro a centro a lo largo de la huella del proyecto. La altura de las tablas puede variar para dar forma a la acumulación de sedimentos atrapados. Además de construir matrices de biomímica, es importante sembrar vegetación para reducir aún más la erosión y capturar sedimentos adicionales. La infraestructura de matriz de biomímica que captura arena también ayuda a proteger la nueva vegetación. El proyecto del Centro de Conservación y Restauración Ecológica Vida Marina de la Universidad de Puerto Rico en Aguadilla, discutido en la Sección 4.1, demuestra la viabilidad de implementar matrices de biomímica y su efectividad en un corto período de tiempo.

En áreas que necesitan restauración inmediata, puede ser necesario nutrir las dunas transportando arena a la costa y moldeándola con maquinaria. Para aumentar la probabilidad de que se retengan los sedimentos de las dunas nuevas o reconstruidas se necesita una vegetación costera y dunar. La inclusión de una mezcla de especies para las plantas de la zona de dunas frontal y posterior, como pastos, plantas herbáceas, enredaderas, arbustos y árboles, ayudará a retener los sedimentos en una variedad de eventos ambientales. La Sección 3.2.3 discute las especies y zonas de siembra que son aplicables a Puerto Rico.

3.2.2. ENTORNOS ADECUADOS PARA LA RESTAURACIÓN Y CREACIÓN DE DUNAS

La restauración de dunas es ideal para costas con exposición a oleaje e inundaciones. Los lugares con reducida energía de las olas por los arrecifes en alta mar, distancia de alcance limitado, o zonas con protección contra oleajes del océano abierto debido a la geografía circundante son preferibles para proyectos de menor escala o menor presupuesto. Estos entornos tienden a requerir elevaciones de dunas más bajas, lo que reduce el costo de los materiales y acorta el cronograma de construcción. Las cercas de arena pueden ser utilizadas en estos lugares si tanto los sedimentos como los vientos correspondientes para transportar la arena son suficientes. Se recomienda la construcción de dunas con material nuevo para lugares donde las estacas no son tan efectivas.

Las matrices de biomímica son ideales para proyectos con presupuestos más bajos o cuando no es factible restaurar dunas utilizando rellenos importados y moldeados. Los materiales simples y un

⁷ L. Bailliang y D.J. Sherman, "Aerodinámica y morfodinámica de las cercas de arena: una revisión" (Aeolian Research, 2015), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875963714001025>.

proceso de construcción sencillo hacen que esta técnica sea fácil de implementar y a su vez adaptable a diversas condiciones del lugar. Las matrices de biomímica también son adecuadas para entornos con sistemas de dunas más grandes. Debido a las alturas más altas de las dunas naturales en algunas áreas de Puerto Rico, puede que no sea económico construir o reconstruir dunas de 12 a 14 pies de altura transportando material en camiones. El uso de cercas o matrices de biomímica puede ser una solución económica que permite la acumulación gradual de arena y la creación de dunas. Los tableros de madera de las matrices de biomímica pueden reajustarse a medida que se monitorea el desarrollo de las dunas para así garantizar que progrese el crecimiento. Para todos los proyectos de matriz de biomímica, es importante seleccionar una zona con playas que se extiendan a lo largo de la costa y velocidades de viento suficientes que permitan que la matriz sea efectiva en la captura de sedimentos transportados por el viento. Si los sedimentos son escasos y/o las velocidades del viento son consistentemente bajas en el sitio, la solución de la matriz de biomímica puede no ser efectiva para la restauración.

3.2.3. MATERIALES Y EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN

Los proyectos de dunas construidos con material nuevo requieren sedimentos apropiados que sean similares al sedimento existente en tamaño de grano, angulosidad, color y composición y que estén libres de contaminantes. Los métodos de construcción suelen utilizar un buldócer y minicargadoras para mover los materiales después de llevarlos al sitio del proyecto a través de un camión volquete.

Se pueden utilizar materiales alternativos en lugar de, o preferiblemente mezclados con arena *in situ*, especialmente arena compuesta principalmente de cuarzo. Por ejemplo, el vidrio triturado o reciclado se puede usar solo o en combinación con cantos rodados para reforzar el núcleo al crear una duna de arena artificial. Las investigaciones indican que el vidrio reciclado es un material de relleno viable y compatible que se puede utilizar de forma segura para la regeneración de la playa.⁸ Además, los análisis geotécnicos del calcín muestran que el tamaño del grano, el color y la angulosidad son similares a la arena de playa nativa, y las pruebas biológicas y abióticas demuestran que el vidrio reciclado es un material biológicamente benigno que no afectará negativamente a la microfauna o macrofauna ni interferirá con el desarrollo embrionario de tortugas marinas.⁹ Los costos relacionados con la recolección (por ejemplo, botellas de vidrio) y el procesamiento de vidrio triturado, lo que incluye la identificación de inventarios fácilmente disponibles, deben evaluarse para determinar la viabilidad de usar este material para la restauración o creación de dunas de arena en Puerto Rico.

Las matrices de biomímica se pueden construir con tablas de madera anchas y delgadas. Las tablas pueden obtenerse de proveedores de madera, tiendas de mejoras para el hogar o madera reutilizada de paletas u otras fuentes recicladas. Muchas empresas de logística y distribución regalan o venden a bajo costo paletas usadas. El uso de paletas, por ende, puede ser una opción

⁸ Consejo de Investigación Costera de Georgia, "Uso de vidrio reciclado pulverizado para la nutrición de playas: una revisión" (2018), https://www.gcrc.uga.edu/wp-content/uploads/2019/10/Review-Use-of-Pulverized-Recycled-Glass-for-Beach-Nourishment_v1.pdf.

⁹ Consejo de Investigación Costera de Georgia, "Uso de vidrio reciclado pulverizado para la nutrición de playas: una revisión".

atractiva para proyectos a pequeña escala o de bajo presupuesto. Al igual que con los paseos tablados sobre las dunas, la madera tratada es preferible por su durabilidad en entornos exteriores/marinos. Sin embargo, no toda la madera de las paletas está tratada, y si no, se puede tratar con diversos procesos o productos químicos. Por lo tanto, la longevidad del material en un ambiente húmedo puede diferir. Se ha demostrado el uso efectivo de la madera de paletas en las matrices de biomímica en Puerto Rico, lo que puede ser un componente clave para reducir el costo de construcción de los proyectos de restauración costera.

3.2.4. CONSTRUCTIBILIDAD

Las matrices de biomímica son mucho más sencillas y rápidas de construir que los proyectos de restauración de dunas que requieren relleno importado. La restauración de dunas con relleno importado suele implicar más material y coordinación de logística, pruebas de materiales, topografía y diseño de ingeniería inicial. Sin embargo, las matrices de biomímica no requieren pruebas de materiales de relleno, estudios previos y posteriores a la construcción ni movilización y desmovilización de equipos pesados del sitio. Las tablas para las matrices se pueden instalar fácilmente con una barrena manual de gasolina. La tabla debe estar orientada de manera que el lado plano mire hacia el viento predominante para una eficiencia de acreción adecuada.

La Ilustración 0-12 a la Ilustración 0-14 muestran secciones típicas de las soluciones para la restauración y creación de dunas que se han discutido en las secciones anteriores (creación de dunas utilizando el relleno importado y matrices de madera). Las ilustraciones son solo para fines informativos ya que las condiciones de diseño de cada proyecto pueden variar, y las estructuras y soluciones deben diseñarse para servir al lugar del proyecto de manera efectiva y segura.

Creación de dunas mediante la importación de relleno (realimentación de dunas)

La sección de dunas en la Ilustración 0-12 representa una duna de una sola fila de 4 pies de altura creada a partir de relleno importado con pendientes laterales de 3:1 y una cresta de 1 pie de ancho. Las plantas deben estar espaciadas a intervalos de centro a centro de 18 pulgadas a lo largo de las áreas de pendiente para una retención suficiente de sedimentos, a menos que el proveedor especifique lo contrario.

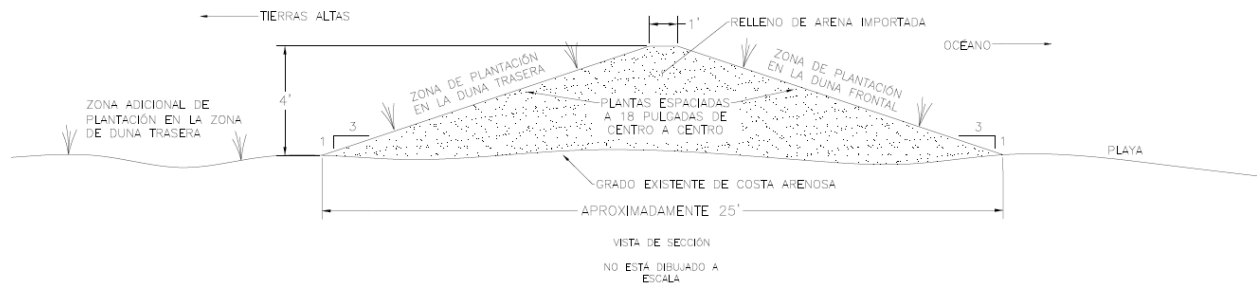


Ilustración 0-12: Sección típica de restauración dunar

Matrices de biomímica/arena

La Ilustración 0-13 a la Ilustración 0-14 muestran, respectivamente, un diseño y una sección típicos de matrices de biomímica. Los tabloncillos se instalan a una profundidad mínima de 1.5 pies por debajo del nivel existente y están espaciados aproximadamente a 1 pie de distancia en el centro. Las elevaciones superiores de las tablas se pueden ajustar según sea necesario para optimizar la topografía de acreción a un perfil deseado. Tanto las especies de vegetación de las dunas delanteras como las dunas traseras se pueden sembrar entre los espacios de los tabloncillos dentro de la matriz de arena, mientras que las especies de vegetación de las dunas traseras también pueden sembrarse detrás de la estructura de la matriz para fomentar la retención de arena y proveer oportunidades para el rebrote voluntario natural de la vegetación una vez que se acumula la arena.



Ilustración 0-13: Diseño típico de matrices de biomímica (R.J. Mayer, usado con permiso)

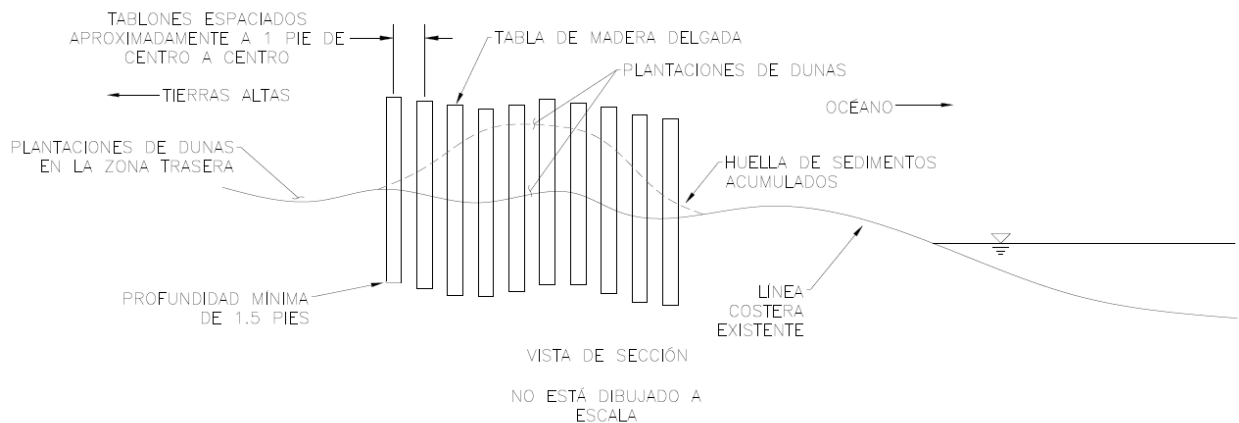


Ilustración 0-14: Sección típica de la matriz de biomímica

3.2.5. MONITOREO Y MANEJO ADAPTATIVO

Los proyectos de construcción de dunas deben ser monitoreados después de su implementación para documentar el crecimiento de la vegetación, cualquier acreción o erosión en el sitio, así como la efectividad del proyecto como sistema de protección de la costa. En las zonas degradadas se puede sembrar aún más para reducir la erosión, por otro lado, se pueden instalar matrices de arena para mejorar la captura de sedimentos y así combatir la erosión, si es apropiado. Si el tráfico

peatonal o vehicular está afectando la nueva estructura, se pueden agregar cercas y letreros adicionales.

La restauración con matrices de biomímica debe ser monitoreada para documentar la acumulación anual de dunas y la vegetación presente. Los datos ayudarán a informar dónde y qué tan efectivas pueden ser estas estructuras, así como cuáles son los plazos esperados para alcanzar los perfiles de dunas deseados para un sitio. La medición de la altura de las dunas mediante el uso de los tableros como una herramienta de medición relativa para el cambio en la elevación de las dunas es una forma simple y efectiva de estimar la acumulación volumétrica de material en el sitio para matrices mientras los tableros aún están emergentes. Encontrar un objeto fijo cercano para usarlo como punto de referencia de elevación puede ser más adecuado para el monitoreo a largo plazo en ausencia de estudios formales de elevación.

La fotografía aérea del sitio puede ser una forma efectiva de comparar el crecimiento de la vegetación anual o estacionalmente y se puede realizar según sea necesario con drones o utilizar los datos de imágenes satelitales disponibles. Los drones con GPS cinemático en tiempo real (RTK) tienen un conocimiento posicional y de navegación altamente preciso que también se pueden utilizar para evaluar los cambios volumétricos en el sitio. Por ende, se recomienda que se utilice un operador con licencia que tenga experiencia en fotografía de orto mosaico de alta precisión y modelado digital de superficies para estas aplicaciones. La fotografía con drones u otros eventos de monitoreo deben completarse durante la misma temporada/período de tiempo de un año a otro para proporcionar la mejor base de comparación.

3.2.6. COSTO ESTIMADO

El costo estimado de las soluciones de restauración de dunas se compiló a partir de los costos de materiales, equipos y mano de obra asociados con la construcción de las secciones típicas discutidas en la Sección 3.2 y se enumeran en la Tabla 0-2. Los costos estimados enumerados en 0-2 están destinados a ser representativos de los costos en Puerto Rico (dólares estadounidenses de 2024). Los costos no incluyen un costo fijo único de \$750 para una barrena de gasolina.

Tabla 0-2: Primeros costos estimados de construcción para la restauración y creación de dunas (dólares estadounidenses de 2024)

Sección típica	Costo estimado de construcción por unidad
Restauración de dunas de arena (relleno importado y modelado)	\$144 a \$176 pies lineales
Matriz de arena (material nuevo)	\$103 a \$126 yardas cuadradas
Matriz de arena (material recuperado)	\$83 a \$101 yardas cuadradas

Fuente: Adaptado de R.J. Mayer, “*Ecological Restoration of Dunes in Puerto Rico – Cost Estimates*” (2024)

3.3. Selección de plantas

La siembra de plantas en las dunas debe consistir en una mezcla de diversas especies comunes que priorice las especies nativas de Puerto Rico. Las combinaciones de pastos, enredaderas, arbustos y árboles pueden convertirse en un ecosistema resistente a la erosión.

Las especies de plantas son las mismas para la estabilización en proyectos de dunas para mejorar el acceso público a la costa (por ejemplo, paseos tablados) y para la restauración o creación de dunas (por ejemplo, matrices de arena). Las diferentes especies de plantas se clasifican según las zonas de crecimiento de dunas observadas en el terreno para proporcionar una distribución natural de las especies para los proyectos de restauración y creación de dunas.

Para la parte baja de la duna frontal, donde se encuentran especies pioneras y más tolerantes a la salinidad, las especies que podrían seleccionarse son las siguientes:

- matojo de burro (*Sporobolus virginicus*)
- bejuco de playa (*Ipomoea pes-caprae brasiliensis*)
- haba de playa (*Canavalia rosea*)
- uva playera (*Coccoloba uvifera*)
- yerba de sal (*Spartina patens*)
- Emajagüilla (*Thespesia populnea*)

Para la parte superior de la duna frontal, las especies que se podrían seleccionar son las siguientes:

- bermuda común (*Cynodon dactylon*)
- vid de coinela (*Dalbergia ecastaphyllum*)
- Icaco (*Chrysobalanus icaco*)
- bayoneta española (*Yucca aloifolia*)
- champú (*Blutaparon vermiculare*)
- Guitarán (*Suriana maritima*)
- Coral (*Crossopelatum rhacoma*)
- canela silvestre (*Canella winterana*)
- mangle botón (*Conocarpus erectus*)
- Azúcares (*Jacquinia arborea*)
- heliotropo marino (*Heliotropium curassavicum*)
- Cariaquillo (*Lantana involucrata*)
- Borbón (*Scaevola plumieri*)
- ojo de buey rastrero de Bay Biscayne (*Sphagneticola trilobata*)

Para la sección de dunas traseras, las especies que podrían seleccionarse son las siguientes:

- Eustachys de hoja rígida (*Eustachys petraea*)
- *Cenchrus* sp.
- higo chumbo (*Opuntia dillenii*)
- roble blanco (*Tabebuia heterophylla*)

- pinguin (*Bromelia pinguin*)
- Corcho (*Guapira fragans*)
- Jagüey (*Ficus citrifolia*)
- Ceiba (*Ceiba pentandra*)
- Almácigo (*Bursera simaruba*)
- Ucar (*Bucida buceras*)
- Péndula (*Citharexylum spinosum*)
- Palo de vaca (*Bourreria succulenta*)
- María (*Calophyllum antillanum*)

Las plantas de los viveros que están en tiestos se pueden sembrar rápidamente en lugares apropiados de la duna con una pala. La disponibilidad de especies vegetales seleccionadas para su siembra en la duna puede ser un factor limitante importante, ya que es posible que no se disponga fácilmente de grandes cantidades o de determinadas especies para la venta en los viveros locales. Por lo tanto, es importante separar las reservas existentes o cosechar y desarrollar semillas y/o árboles jóvenes de sitios costeros similares cercanos, y aprovechar el acervo genético de plantas existentes que se adapta a las condiciones del área para que la vegetación esté disponible cuando sea necesario. También es fundamental coordinarse con los proveedores locales para comprender qué vegetación se puede proporcionar, su disponibilidad anual o si hay un plazo de entrega prolongado en la adquisición. Garantizar que las plantas estén disponibles cuando el proyecto está en construcción es crucial para acelerar el cronograma y reducir los costos.

Se recomienda lo siguiente para pastos, enredaderas, arbustos y árboles:

- Riegue las nuevas plantaciones para aumentar las posibilidades de que sobrevivan durante las primeras semanas.
- Siembre durante la temporada de lluvias (agosto a noviembre) para reducir el costo del riego.
- Coloque viruta alrededor de las plantas para ayudar a que el suelo retenga la humedad.

Es normal que se produzca cierta mortalidad por deshidratación, choque térmico, viento, desecación por niebla salina, depredación o asfixia por enredaderas trepadoras. Es importante tener en cuenta las pérdidas, planificar la logística y el costo de reemplazar las plantas muertas.

3.4. Señalización

Los letreros de información pública pueden ser una forma simple pero importante de mostrar los esfuerzos locales de restauración, los beneficios de los ecosistemas costeros saludables, las especies amenazadas o en peligro de extinción que se encuentran en el área y las reglas para el uso adecuado del área. Los letreros suelen incluir contenido gráfico y escrito en una tabla o pedazo de metal y se fijan al suelo por medio de un poste.

3.5. Protección del sitio

Las cercas excluyentes para reducir el tráfico peatonal pueden proteger entornos sensibles como las dunas recién plantadas, las costas restauradas y las dunas existentes. Las cercas simples pueden bloquear el tráfico peatonal en áreas sensibles adicionales, como áreas de dunas recién plantadas o restauradas. Las cercas de madera o alambre a pequeña escala pueden ser rentables y una solución fácil de instalar para proteger áreas vulnerables.

3.6. Consideraciones regulatorias

Las estructuras peatonales de dunas y los proyectos de construcción, restauración y creación de dunas necesitan lo siguiente:

- Permisos de la Oficina de Gerencia de Permisos (OGPE).
- Cumplimiento de los requisitos de zonificación establecidos por la Junta de Planificación de Puerto Rico.
- Aval o aprobación del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA) y del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS, por sus siglas en inglés) sobre la selección de plantas y cualquier efecto que el proyecto pueda tener en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico y en las especies amenazadas o en peligro de extinción incluidas en la lista federal.
- Determinación por parte del DRNA si el lugar del proyecto se encuentra dentro de tierras de dominio público o de la ZMT

También se recomienda encarecidamente obtener respaldo de las autoridades municipales, ya que estas poseen un gran interés en los esfuerzos que puedan afectar o mejorar los medios de vida cotidianos en las comunidades adyacentes. Las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales (ONG), ambientales y de conservación pueden convertirse en socios importantes para el desarrollo, monitoreo y mantenimiento de proyectos.

La ZMT fue creada por la Ley de Puertos española de 1880, con aplicabilidad a Puerto Rico desde 1886 (Ilustración 0-15). Incluye todas las áreas influenciadas por las marejadas en la costa de Puerto Rico, las orillas de los ríos donde las aguas están influenciadas por las marejadas y las áreas donde el agua llega tierra adentro durante los eventos de olas más altas (es decir, la marca de agua alta de las olas durante los eventos de tormenta). La ZMT también incluye las tierras que han sido ganadas al mar por la acción humana (por ejemplo, el relleno de arena) o por la acción de la naturaleza (por ejemplo, la acreción natural); las áreas portuarias están exentas según lo designado por la Junta de Planificación de Puerto Rico.

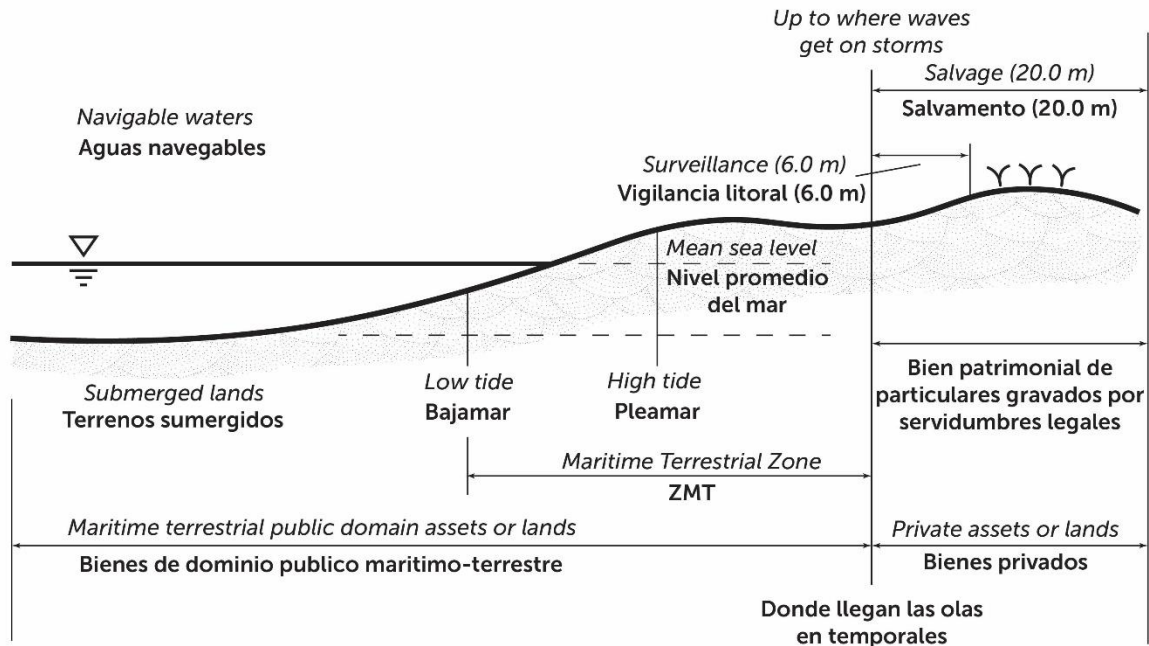


Ilustración 0-15: Límites de ZMT

Todas las tierras dentro de la ZMT son de dominio público, lo que significa que las tierras pertenecen a todos los ciudadanos que viven en Puerto Rico y a ningún individuo en particular. El DRNA no es propietario de estas tierras, pero está a cargo o tiene la autoridad principal sobre su administración, lo que incluye permitir o rechazar cualquier uso propuesto, que debe ser actividades vinculadas al océano (por ejemplo, muelle, rampa para botes, instalación portuaria).

El DRNA también se encarga de delimitar y certificar el límite interior de la ZMT. Un área con un ancho de 65.5 pies (20 metros) que es paralela al límite interior de la ZMT debe permanecer libre de estructuras permanentes (por ejemplo, edificios) sirviendo de servidumbre para garantizar el acceso público a la costa, aunque el área sea propiedad privada.

Se recomienda encarecidamente una solicitud de delimitación formal u oficial de la ZMT y su servidumbre para determinar la extensión exacta de las tierras de dominio público donde podría llevarse a cabo un proyecto antes de iniciar cualquier trabajo. Es posible que se necesiten tierras adicionales o retranqueos para que el proyecto sea eficaz, dependiendo de la magnitud de la erosión costera en un sitio determinado.

En función de los permisos y el diseño, todas las actividades de construcción deben realizarse por encima de la línea media de pleamar, fuera de las aguas de Estados Unidos y de los humedales para evitar el impacto en los ecosistemas colindantes. Los ecosistemas adyacentes también pueden requerir permisos en virtud de estatutos federales como la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia de EE. UU. de 1972 (33 U.S.C. § 1344) y la Sección 10 de la Ley de Ríos y Puertos de 1899 (33 U.S.C.

403). Cualquier proyecto que pueda causar impactos o la captura de especies incluidas en la Ley de Especies en Peligro de Extinción y hábitat crítico designado podría requerir una Opinión Biológica aprobada por el USFWS.

Las solicitudes de permisos deben presentarse lo antes posible, ya que su obtención puede llevar varios meses. Los aspectos importantes de la concesión de permisos son que los impactos de la construcción sean los mínimos posibles, que la estructura permita una exposición suficiente a la luz solar para el crecimiento de la vegetación y que las actividades de construcción se realicen dentro de las ventanas estacionales apropiadas. Supervisar el éxito de los proyectos terminados puede ayudar en la obtención de permisos para futuros proyectos al documentar su éxito y los beneficios que aportan al ecosistema.

4. Casos de estudio

Esta sección destaca los proyectos de SNBN que se han implementado con éxito en Puerto Rico para la estabilización de la costa, utilizando los métodos antes mencionados.

4.1. Fortaleciendo la resiliencia de la costa de Puerto Rico ante el clima extremo y el cambio climático mediante la restauración ecológica de sus dunas costeras

El primer caso de estudio, *Fortaleciendo la resiliencia de la costa de Puerto Rico ante el clima extremo y el cambio climático mediante la restauración ecológica de sus dunas*, fue dirigido por el Centro de Conservación y Restauración Ecológica Vida Marina de la Universidad de Puerto Rico en Aguadilla a partir de 2018.¹⁰ El tipo de proyecto, el costo y los socios se enumeran en Tabla 0-3: Financiamiento de la subvención de Resiliencia Costera de la Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre (2018 y 2019), ONA, 1.

Tabla 0-3: Financiamiento de la subvención de Resiliencia Costera de la Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre (2018 y 2019), ONA, 1, Servicio Forestal de EE. UU. por medio del DRNA.

Tipo de proyecto	Costo	Socios
Restauración de dunas	\$1,116,539	<ul style="list-style-type: none">Subvención de Resiliencia Costera de la Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre (2018 y 2019)Fondos de financiamiento de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, en inglés) por medio del DRNAJetBlue for GoodServicio Forestal de Estados Unidos por medio del DRNADiversified and Special Services, Inc.

¹⁰ R.J. Mayer, "Uso de enfoques novedosos para crear sistemas de dunas resilientes después del huracán María" (NOAA, Oficina de Gestión Costera, 2024), <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/training/puerto-rico.html>.

Las dunas de la isla grande, particularmente a lo largo de la costa norte en la región de Isabela y los municipios de Dorado y Loíza, son vulnerables a la erosión debido a actividades humanas como el desarrollo. La destrucción de la vegetación y la compactación de la arena por los vehículos, la extracción ilegal de arena y el intenso tráfico peatonal han dejado a las dunas vulnerables a la erosión y al desplazamiento durante las tormentas. Los huracanes Irma y María en 2017, seguidos de la tormenta invernal Riley en 2018, exacerbaron estos problemas y causaron una erosión severa de las dunas ya dañadas.

El Dr. Robert J. Mayer y su equipo de Vida Marina, que forman parte del Centro para la Conservación y Restauración Ecológica de la Universidad de Puerto Rico en Aguadilla, fueron pioneros en un enfoque de SNBN para abordar estos desafíos, reconociendo las limitaciones de las estructuras duras tradicionales. El equipo se centró en técnicas de restauración ecológica que mejoran la resiliencia de los sistemas de dunas. El proceso de restauración constó de cinco pasos:

1. Seleccionar sitios de dunas en función de la vulnerabilidad a las tormentas y la densidad de población.
2. Utilizar drones para capturar imágenes aéreas para evaluaciones previas y posteriores a la tormenta.
3. Aplicar programas de fotogrametría para evaluar la eficacia de los sistemas de dunas en la reducción de los daños causados por las tormentas.
4. Desarrollar planes específicos de restauración ecológica en áreas de alta prioridad.
5. Realizar acciones de restauración para fortalecer la resiliencia dunar.

La clave del éxito del proyecto fue el uso de técnicas de biomímica: la instalación de matrices de madera para crear turbulencias en la columna de viento, reducir la velocidad del viento y facilitar la acumulación uniforme de arena. El uso de matrices de biomímica resultó ser eficaz para proteger la vegetación recién sembrada y mejorar la estabilidad de las dunas contra las marejadas ciclónicas. La iniciativa también implicó la instalación de pasarelas de madera, señalización educativa, la siembra de vegetación en las dunas y la instalación de estacas de madera como dispositivos de captura de arena (Ilustración 0-16). Estas medidas tienen como objetivo redirigir el tráfico peatonal sobre hábitats dunares sensibles, aumentar la concienciación pública sobre la importancia de los sistemas de dunas, y mejorar la altura y estabilidad de estas.



Ilustración 0-16: Dispositivos de captura de arena utilizados por Vida Marina (NOAA)

El proyecto ha despertado el interés de estudiantes de diversos niveles educativos que trabajan para integrar el aprendizaje práctico *in situ* con la conservación ecológica. La participación de estudiantes voluntarios en los esfuerzos de restauración no solo contribuye a sus requisitos educativos, sino también a fomentar un sentido de administración y participación comunitaria en los esfuerzos de conservación ambiental de Puerto Rico.

El trabajo de Vida Marina ilustra la eficacia de las SNBN en la restauración de las dunas, ofreciendo un enfoque sostenible y rentable para mejorar la resiliencia costera (Ilustración 0-17). El éxito de estos métodos demuestra el potencial para una aplicación más amplia de las SNBN en todo Puerto Rico, lo que podría contribuir significativamente a los esfuerzos de manejo costero y protección ambiental de Puerto Rico dirigidos a trabajar con la naturaleza en lugar de contra ella.

Tras el éxito de este proyecto, en 2023, FEMA asignó \$650,000 en fondos para un esfuerzo similar a lo largo de los segmentos de Middles Beach y Poza de Teodoro en Isabela, Finca Nolla en Hatillo y Maranto Beach en Arecibo. El proyecto incluyó la construcción de 310 pies lineales de paseos tablados, 5,035 pies lineales de cercas de exclusión, la instalación de 21,830 unidades de matriz biomímica y 12 letreros educativos.



Ilustración 0-17: Arriba: prerrestauración, 2019; abajo: postrestauración, 2020. Fotos de antes y después que muestran el éxito del trabajo de Vida Marina, calle Pedro Albizu Campos, playa Bajuras, Isabela (Vida Marina)

4.2. Protectores de Cuencas: Mejorando la resiliencia costera en Puerto Rico mediante Soluciones Naturales y Basadas en la Naturaleza (SNBN)

El segundo caso de estudio corresponde a Protectores de Cuencas: *Mejorando la resiliencia costera en Puerto Rico mediante Soluciones Naturales y Basadas en la Naturaleza*, que se llevó a cabo de 2012 a 2017.¹¹ Protectores de Cuencas (PDC) es una organización no gubernamental (ONG) que restaura y protege cuencas hidrográficas en todo Puerto Rico. El tipo de proyecto y sus socios se enumeran en la Tabla 0-4.

¹¹ Protectores de Cuencas, "Implementación del Plan de Manejo de la Cuenca de la Bahía de Guánica" (2018), https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/NOS/OCM/Projects/397/ViqueiraRios2018_Guanica_Watershed_Management_Implementation.pdf.

Tabla 0-4 Estudio de caso: Protectores de Cuencas SNBN Tipo de proyecto y socios

Tipo de proyecto	Socios
Restauración de costas y humedales	<ul style="list-style-type: none">▪ Programa de Desechos Marinos de la NOAA▪ DRNA Puerto Rico▪ Líderes y voluntarios locales de la comunidad

PDC ha encabezado esfuerzos fundamentales de restauración ambiental dentro del Bosque Estatal y Reserva de la Biosfera de Guánica, particularmente en playa La Jungla y playa Tamarindo. Estas áreas son conocidas por su rica biodiversidad, incluidas las tortugas marinas protegidas por el gobierno federal y el sapo concho puertorriqueño en peligro de extinción. No obstante, han enfrentado desafíos significativos debido al alto tráfico de visitantes, la erosión costera, la degradación del hábitat y el impacto de los eventos climáticos extremos. En respuesta, PDC inició una serie de proyectos de SNBN destinados a mejorar la resiliencia costera y restaurar los hábitats naturales.

Las estrategias de restauración implementadas por PDC incluyen la creación de montículos de arena y la siembra de vegetación nativa para estabilizar las dunas y las costas, reforzando efectivamente la defensa del área contra la erosión y las marejadas ciclónicas (Ilustración 0-18). Para minimizar el impacto humano en estos ecosistemas sensibles, se instalaron medidas de restricción de acceso (como bolardos) y se construyeron paseos tablados para proporcionar un acceso a los visitantes que sea respetuoso con el medio ambiente natural (Ilustración 0-19). El acceso a una laguna estacional y zona de desove para el sapo concho puertorriqueño en peligro de extinción (*Peltophryne lemur*) fue acordonado permanentemente con bolardos para evitar su uso como estacionamiento cuando se encuentra seco.



Ilustración 0-18: Construcción de montículos de arena en playa Tamarindo (Protectores de Cuencas, usado con permiso)



Ilustración 0-19: Instalación de paseo tablado y restricción de acceso en playa La Jungla (Protectores de Cuencas, usado con permiso)

Las técnicas empleadas en los esfuerzos de restauración son las siguientes:

- Creación de dunas de arena artificiales y siembra de vegetación para la estabilización de dunas y costas.
- Instalación de bolardos de restricción de acceso para proteger los hábitats naturales.
- Construcción de un paseo tablado para minimizar el impacto de los visitantes en el paisaje.
- Reparación de la carretera con el uso de rocas y siembras nativas para la resiliencia costera.
- Reclasificación de zonas afectadas en “hábitats críticos”, como lagunas de agua dulce.

El éxito de estos esfuerzos se puede atribuir en gran medida al enfoque integral de PDC para la restauración ecológica, que incluye metodologías científicas con conocimientos de la comunidad, y se centra en la preservación de los hábitats naturales. Al adaptar las estrategias a las condiciones ambientales y geográficas de la zona, PDC ha demostrado la eficacia de las SNBN en la restauración costera. El trabajo de la organización no solo contribuye a la salud ecológica de La Jungla y playa Tamarindo, sino que también sirve como una plataforma educativa, promoviendo la conciencia y protección ambiental entre la comunidad local y los voluntarios involucrados en el proceso de restauración.

También, PDC, junto con el Programa de Desechos Marinos de la NOAA, lanzó la campaña *Piense antes de dejarlo caer*, una iniciativa de mercadeo social basada en la investigación destinada a reducir la basura en las playas por medio de limpiezas comunitarias, talleres educativos y estrategias de divulgación como concursos de fotografía. La campaña destaca el enfoque innovador de PDC para involucrar a la comunidad en los esfuerzos de conservación y fomentar una cultura de protección ambiental.

Referencias

- Bailliang, L. y D.J. Sherman. (2015). *Aerodinámica y morfodinámica de las vallas de arena: una revisión*. Investigación eólica. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875963714001025>.
- Craig, R.M. (1984). *Plantas para Dunas Costeras de las Costas del Golfo y Atlántico Sur y Puerto Rico*. Departamento de Agricultura de Estados Unidos. <https://caribbeanclimatehub.org/wp-content/uploads/2019/08/PlantsofCoastalDunes.pdf>.
- FEMA (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias). (s.f.), *Plan Estratégico de FEMA 2022-2026: Construyendo el FEMA que Nuestra Nación Necesita y Merece*. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_2022-2026-strategic-plan.pdf.
- FHWA (Administración Federal de Carreteras). (2015). *Guía de Construcción y Mantenimiento de Caminos de Grava*. <https://www.fhwa.dot.gov/construction/pubs/ots15002.pdf>.
- Consejo de Investigación Costera de Georgia. (2018). *Uso de vidrio reciclado pulverizado para la nutrición de la playa: una revisión*. https://www.gcrc.uga.edu/wp-content/uploads/2019/10/Review-Use-of-Pulverized-Recycled-Glass-for-Beach-Nourishment_v1.pdf.
- Guannel, G., K. Arkema, P. Ruggiero y G. Verutes. (2016), *El poder de tres: los arrecifes de coral, las praderas marinas y los manglares protegen las regiones costeras y aumentan su resiliencia* (PLoS ONE 11(7) <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>).
- Lotze, A. (2021). *Reconstruir mejor: integrar la reducción de riesgos en la recuperación con soluciones basadas en la naturaleza*. NOAA, Oficina de Respuesta y Restauración Programa de Preparación para Desastres. <https://blog.response.restoration.noaa.gov/building-back-better-integrating-risk-reduction-recovery-nature-based-solutions>.
- Lugo, A.E. (ed.). (2004). *Acta Científica*. Asociación de Maestros de Ciencia de Puerto Rico. https://data.fs.usda.gov/research/pubs/iitf/act_v18_1thru3.pdf.
- Mayer, R.J. (2024). *Uso de enfoques novedosos para crear sistemas de dunas resilientes después del huracán María*. NOAA, Oficina de Gestión Costera. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/training/puerto-rico.html>.
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). (2015). *Programa de Manejo Costero de Puerto Rico*. Oficina de Gestión Costera. <https://coast.noaa.gov/data/czm/media/puertorico-cmp.pdf>.
- Protectores de Cuencas. (s.f.). *Restaurando y protegiendo las cuencas hidrográficas de Puerto Rico*. <https://www.protectoresdecuencas.org/>.
- Rios, R.V. (2021). *Implementation of the Guánica Bay Watershed Management Plan*. Protectores de Cuencas. <https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/del-monte-al-mar-learning-network/guanica/Introducci%C3%B3n-y-discusi%C3%B3n-del-Plan-de-Manejo-de-la-Cuenca-de-la-Bah%C3%ADa-de-Gu%C3%A1nica-Roberto-Viqueira-PDC.pdf>.
- Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU. (s.f.). *Calculadora de inflación del IPC*. https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm.
- Departamento del Interior de Estados Unidos. (s.f.). *Soluciones basadas en la naturaleza*. <https://www.doi.gov/ppa/integrative/nature-based-solutions>.

Vida Marina. (2018). *Fortaleciendo la resiliencia de la costa de Puerto Rico ante el clima extremo y el cambio climático a través de la restauración ecológica de sus dunas costeras*. Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre. https://www.nfwf.org/sites/default/files/2022-04/case-study-UPR-031622_0.pdf.

Recursos

- Bush, D., Neal, W., y Jackson, C. Jr. (2009). *Resumen de la vulnerabilidad de Puerto Rico a los peligros costeros: riesgo, mitigación y manejo con ejemplos*. Documento especial de la Sociedad Geológica de América. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/236175160_Summary_of_Puerto_Rico's_Vulnerability_to_Coastal_Hazards_Risk_Mitigation_and_Management_with_Examples.
- Bush, D. M., Webb, R. M. T., González Liboy, J., Hyman, L., y Neal, W. J. (1995). *Viviendo con la costa de Puerto Rico*. National Audubon Society, Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, Duke University Press y Editorial de la Universidad de Puerto Rico.
- Carlson, R., Evans, L., Foo, S., Grady, B., Li, J., Seeley, M., Xu, Y., y Asner, G. (2021). *Beneficios sinérgicos de la conservación de los ecosistemas tierra-mar*. *Ecología Global y Conservación*. 28. E01684. 10.1016/j.gecco.2021.e01684. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989421002341>.
- Chávez, V., Lithgow, D., Losada, M. et al. (2021). *Infraestructura verde costera para mitigar la compresión costera*. *J Infrastruct Preserv Resil* 2, 7. <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00026-1> Disponible en: <https://jipr.springeropen.com/articles/10.1186/s43065-021-00026-1#citeas>.
- Department of Natural and Environmental Resources. (1992). *Reglamento para el aprovechamiento, la vigilancia, la conservación y la administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo estas y la zona marítimo terrestre*. Reglamento Núm. 4860. <https://www.drna.pr.gov/documentos/reglamento-4860-aprovechamiento-vigilancia-conservacion-y-administracion-de-aguas-territoriales-los-terrenos-sumergidos-y-zona-maritimo-terrestre/>.
- FEMA. (2018). *Ayuda de trabajo: estabilización de la costa por bioingeniería*. <https://www.mass.gov/doc/bioengineered-shoreline-stabilization-job-aid/download>.
- FEMA. (2021). *Construyendo resiliencia de las comunidades con soluciones basadas en la naturaleza – una guía para las comunidades locales*: https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_riskmap-nature-based-solutions-guide_2021.pdf.
- FEMA. (2023). *Desarrollar la resiliencia de la comunidad con soluciones basadas en la naturaleza: estrategias para el éxito*: https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_nature-based-solutions-guide-2-strategies-success_2023.pdf.
- García-Ríos, C. I. (2005). *Playas de arena*. In: Joglar, R. L. (Ed.) *Biodiversidad de Puerto Rico: Vertebrados Terrestres y Ecosistemas – Serie de Historia Natural*. Capítulo 6. Editorial del Instituto de Cultura Puertorriqueña.
- Grafals-Soto, R. (2018). *Dunas y procesos costeros en una isla tropical caribeña amenazada por erosión, actividades humanas y aumento del nivel del mar*. En: *Caribbean Studies*. Vol. 46, No. 2 (July - December 2018), 57-77. <https://revistas.upr.edu/index.php/csj/article/view/21028>.

- Guannel G., Arkema K., Ruggiero P., Verutes G. (2016) *El poder de tres: los arrecifes de coral, las praderas marinas y los manglares protegen las regiones costeras y aumentan su resiliencia*. PLOS ONE 11(7): e0158094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0158094>.
- Henderson, R.E., Heslin, J.L., Himmelstoss, E.A., y Barreto-Orta, M. (2024). *Cambio en la línea costera nacional: estadísticas resumidas para las costas vectoriales desde principios de 1900 hasta la década de 2010 para Puerto Rico: Informe de datos del Servicio Geológico de EE. UU. 1191*. <https://doi.org/10.3133/dr1191>.
- Hermans, T.H.J., Malagón-Santos, V., Katsman, C.A., y Jane, R. *El momento de la disminución de la protección contra las inundaciones costeras debido al aumento del nivel del mar*. Nat. Clim. Chang. **13**, 359–366 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01616-5>
<https://www.researchgate.net/publication/369477674> *The timing of decreasing coastal flood protection due to sea-level rise*.
- Jackson Jr., C., Bush, D., y Neal, W. (2006). *Gaviones, un mal diseño para el endurecimiento de la costa: la experiencia de Puerto Rico*. Revista de Investigación Costera. SI v. 39. 852-857. <https://www.researchgate.net/publication/236175218> *Gabions a poor design for shore hardening The Puerto Rico experience*.
- Jackson Jr., C., Bush, D., y W. Neal. (2012). *Documentando la pérdida de playas frente a los malecones en Puerto Rico: Peligros de la ingeniería de la costa de una pequeña nación insular*. 10.1007/978-94-007-4123-2_4. <https://www.researchgate.net/publication/236324107> *Documenting Beach Loss in Front of Seawalls in Puerto Rico Pitfalls of Engineering a Small Island Nation Shore*.
- Lakshmi, A. (2021). Servicios Ecosistémicos Costeros y Bienestar Humano. Indio J Med Res. Mar; 153(3):382-387. DOI: 10.4103/ijmr. IJMR_695_21. PMID: 33907002; PMCID: PMC8204820. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8204820/>.
- Miller, G. y Lugo, A.E. (2008). Guía de los Sistemas Ecológicos de Puerto Rico. Informe Técnico General IITF-GTR-35. Río Piedras, PR: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Instituto Internacional de Silvicultura Tropical. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/35382>.
- Nellis, D. W. (1994). *Plantas costeras del sur de Florida y el Caribe: una guía para la identificación y propagación de plantas de xerojardinería*. Pineapple Press, Inc. 1er. Ed.
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). (2024). *Curso de formación en línea Soluciones Basadas en la Naturaleza para Riesgos Costeros – Conceptos básicos*. Oficina de Gestión Costera. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/training/green.html>.
- NOAA. (2024). *Soluciones basadas en la naturaleza: beneficios, costos y evaluaciones económicas: tres referencias rápidas para obtener información sobre soluciones basadas en la naturaleza, servicios ecosistémicos, costos de instalación y mantenimiento, y consejos para evaluar los costos y beneficios de reducir los impactos de los peligros costeros*. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/training/gi-practices-and-benefits.html>.
- Oficina de la Presidencia. (2023). *Guía de Recursos de Soluciones Basadas en la Naturaleza 2.0 (Compendio de Ejemplos Federales, Orientación, Documentos de Recursos, Herramientas y Asistencia Técnica)*. 70 págs. <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/09/nature-based-solutions-resource-guide-2-0/>.

- The Nature Conservancy y AECOM. (2021). *Promoción de la mitigación de riesgos basada en la naturaleza a través de subvenciones de mitigación de FEMA*. 57 págs.
<https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/climate-resilience/nature-based-solutions>.
- Tiggeloven, T., de Moel, H., van Zelst, V. T. M., van Wesenbeeck, B. K., Winsemius, H. C., Eilander, D., & Ward, P. J. (2022). *Los beneficios de la adaptación costera a través de la conservación de la vegetación costera*. *Revista de Gestión del Riesgo de Inundación*, 15(3), e12790.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12790><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jfr3.12790>.
- Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. Ingeniería con Naturaleza y FEMA. (2022). Simposio: Soluciones Basadas en la Naturaleza para Puerto Rico. Simposio celebrado en San Juan, Puerto Rico los días 4 y 5 de mayo de 2022. Presentaciones en formato pdf disponibles en:
<https://ewn.erdcdren.mil/?p=8054>.
- Sitio web del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Ingeniería con Naturaleza:
<https://ewn.erdcdren.mil/>.
- Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos. (2022). *Medidas de conservación para tortugas marinas en Puerto Rico y las Islas Vírgenes de Estados Unidos*. Oficina de Campo de Servicios Ecológicos del Caribe.
<https://www.fws.gov/sites/default/files/documents/Conservation%20Measures%20for%20sea%20turtles%20in%20Puerto%20Rico%20and%20the%20U.S.%20Virgin%20Islands.pdf>.
- Servicio de Conservación de Suelos del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). (1984). *Plantas para Dunas Costeras del Golfo y Costas del Atlántico Sur y Puerto Rico*.
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CZIC-qk125-c72-1984/html/CZIC-qk125-c72-1984.htm>.
- Van Zelst, V.T.M., Dijkstra, J.T., van Wesenbeeck, B.K., Eilander, D., Morris, E.P. Winsemius, H.C., Ward, P.J., y Mindert, B. de V. (2021). *Reducir los costos de la protección costera mediante la integración de la vegetación en las defensas contra inundaciones*. *Nat Commun* 12, 6533 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26887-4>
<https://www.nature.com/articles/s41467-021-26887-4>.