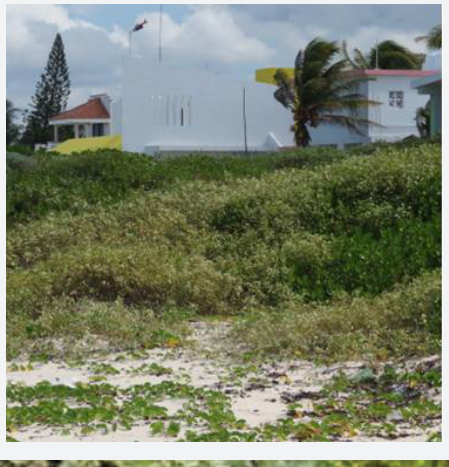


Manual de restauración para DUNAS COSTERAS de la Península de Yucatán







Gabriela Mendoza-González, Calina Zepeda-Centeno, Vanessa Francisco, Vanessa Hernández-Mendoza, Dalia Hoil, Fernando Secaira, Juan Carlos Aguirre-Fierro, Rodolfo Rioja-Nieto.

Manual para la restauración de **DUNAS COSTERAS** de la Península de Yucatán






The Nature Conservancy
CONACYT Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CIENCIAS
UNAM ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MÉRIDA
LANCIS
Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera
CEMIE-Océano
ECOSUR

Manual para la restauración de **DUNAS COSTERAS** de la Península de Yucatán.

Forma de citar
Mendoza-González G., Zepeda-Centeno C., Francisco V., Hernández-Mendoza V., Hoil D., Secaira F., Aguirre-Fierro J, C., Rioja-Nieto R. 2022. *Manual para la restauración de dunas costeras de la Península de Yucatán.* ENES-Mérida. p. 139.

Primera edición 2022.

D. R. © Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.
Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida.
Km 4.5 Carretera Mérida-Tetiz, Úcu, Yucatán, C. P. 97357.
www.enesmerida.unam.mx.

ISBN: 978-607-30-6149-0.

Hecho en México.

Coordinación: Gabriela Mendoza-González, Calina Zepeda-Centeno, Vanessa Francisco, Carolina Rosales-Juárez, Vanessa Hernández-Mendoza.

Autores: Gabriela Mendoza-González[1,2], Calina Zepeda-Centeno[3], Vanessa Francisco[4], Vanessa Hernández-Mendoza[5], Dalia Hoil[6], Fernando Secaira[3], J.C. Aguirre-Fierro[7], Rodolfo Rioja-Nieto[8,9].

Adscripciones:
1. Conacyt-Facultad de Ciencias, UMDI Sisal. UNAM. Campus Yucatán.
2. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS), Instituto de Ecología, ENES-Mérida, UNAM.
3. The Nature Conservancy.
4. Cooperación Alemana para el Desarrollo Sustentable en México (GIZ por sus siglas en Alemán). Caribe Mexicano.
5. Laboratorio Regional para el Estudio y Conservación de Germoplasma (Germolab-CICY).
6. Jardín Botánico Dr. Alfredo Barrera Marín. El Colegio de la Frontera Sur.
7. Posgrado de Ciencias del Mar y Luminología, UNAM. Sede UMDI-Sisal.
8. Laboratorio de Análisis Espacial de Zonas Costeras (COSTALAB), Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM.
9. Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida, UNAM.

Esta obra se sometió a una revisión por pares dobleciego.

Esta publicación se realizó con el apoyo y/o financiamiento de The Nature Conservancy y de los siguientes proyectos:

- Geomorfología Costera Verde: un enfoque transdisciplinario como línea base para la solución de problemas socio-ecológicos en el litoral, CONACYT en Atención a Problemas Nacionales (Número de beca otorgada a JCAF 28878/ proyecto: 4660);
- Centro Mexicano de Innovación en Energía Oceánica, CEMIE-Océano, CONACYT SENER Proyecto 249795;
- Estudio Integral de Restauración y Estabilización Costera del Estado de Yucatán. Fase 1: Tramo Chicxulub-Telchac y Zona Experimental en Sisal (LANRESC, SDS, gobierno del estado de Yucatán);
- Reciclando Dunas (Fundación Bepensa).

Fotos de Portada y Contraportada: Vanessa Hernández-Mendoza.
Fotos de Portada pequeñas en orden izquierda derecha: Carlos Cruz(1), Gabriela Mendoza(2), Vanessa Francisco(3 y 4).
Ilustraciones: Karla Vázquez (excepto donde se indica lo contrario).
Diseño y diagramación: Luis Enrique Vega Martínez.
Corrección de estilo: Lilia Carmina Villanueva Barrios.

Manual para la restauración de **DUNAS COSTERAS** de la Península de Yucatán

Autores

Gabriela Mendoza-González
Calina Zepeda-Centeno
Vanessa Francisco
Vanessa Hernández-Mendoza
Dalia Luz Hoil Villalobos
Fernando Secaira
Juan Carlos Fierro
Rodolfo Rioja-Nieto

CONTENIDO

Prólogo 10

Agradecimientos 13

Presentación 14

Capítulo 1. Introducción 17

1. Importancia de las dunas costeras en la Península de Yucatán 18

1.1 Las dunas costeras de la Península de Yucatán 19

1.2 Formación y dinámica de las dunas costeras 20

1.3 Tipos de dunas costeras en la Península de Yucatán 22

1.4 Vegetación en las dunas costeras 26

1.5 La función del viento y el oleaje en la dinámica de las dunas costeras 27

1.6 La situación crítica de las dunas costeras en la Península de Yucatán 30

1.6.1 Las dunas en Campeche 31

1.6.2 Las dunas en Yucatán 31

1.6.3 Las dunas en Quintana Roo 32

2. Conceptos básicos de restauración de dunas costeras 34

Capítulo 2. Diagnóstico, factibilidad y diseño de un proyecto de restauración de dunas costeras 37

1. Diagnóstico del área 38

2. Necesidad y factibilidad de un proyecto de restauración 43

3. Diseño de la propuesta de restauración 45

Capítulo 3. Restauración ecológica de las dunas costeras 49

1. Eliminación o control de las fuentes de degradación 50

1.1 Estabilidad de la línea de costa y el aporte sedimentario 50

1.2 Limpieza previa de la zona a restaurar 51

1.3 Remoción de especies exóticas, invasoras y/o parásitas 51

1.4 Modificación y/o remoción de estructuras sobre las dunas costeras 54

2. Recuperación topográfica y estabilización de la duna 55

2.1 Recuperación de la morfología de la duna con estrategias naturales 55

2.1.1 Captadores pasivos de arena 55

2.1.2 Tipos de captadores de arena 56

2.1.3 Ubicación e instalación de captadores de arena 58

2.2 Recuperación de la morfología de la duna con estrategias no naturales 59

2.2.1 Estrategias de recubrimiento 59

2.2.2 Estructuras artificiales y maquinaria 59

3. Restablecimiento de la vegetación nativa **63**
3.1 Verificación de la limpieza de la zona a restaurar **65**
3.2 Obtención o producción de plantas de dunas costeras **65**
3.2.1 Establecimiento del vivero **65**
3.2.2 Colecta y manejo de semillas y esquejes **67**
3.2.3 Producción de plantas **70**
3.3 Trasplante de vegetación en la zona de restauración **72**
3.4 Micorrizas **73**
3.5 Vegetación acorde al gradiente de zonificación tierra dentro **73**
3.6 Época de revegetación **75**
3.7 Especies recomendadas **75**
4. Protección y mantenimiento de un proyecto de restauración **76**
4.1 Medidas de protección **76**
4.1.1 Cercos **78**
4.1.2 Senderos **79**
4.1.3 Pasarelas **79**
4.2 Mantenimiento de la vegetación y de la infraestructura **83**
4.3 Señalización del área rehabilitada **86**
5. Monitoreo de un proyecto de restauración **87**
5.1 Metodología de muestreo y colecta de datos **87**
5.2 Metodología para la interpretación de los datos **90**
5.3 Manejo adaptativo **91**

Capítulo 4. Casos de estudio de rehabilitación de dunas 93

Caso de estudio 1.
Condominios Royal Beach I en Chicxulub, Yucatán **94**

Caso de estudio 2.
Hotel Haven Riviera Cancún en Benito Juárez, Quintana Roo **98**

Caso de estudio 3.
Hotel Moon Palace, Benito Juárez, Quintana Roo **102**

Caso de estudio 4.
Reciclando dunas en Sisal, Yucatán **106**

Glosario 111

Bibliografía 121

Anexo 135

Medidas de seguridad en las labores de restauración 136

1. Equipo de protección personal (EPP) **137**
2. Aplicación de herbicidas **139**

PRÓLOGO

Sin duda, una de las características de nuestro bello planeta es la presencia extensa y abundante de costas, las cuales suman poco más de un millón y medio de kilómetros. Es tal su extensión, que, si pudiéramos unir todas las costas en una larguísima cuerda y nos pusiéramos a dar vueltas alrededor del ecuador con esta enorme madeja, podríamos hacerlo cuarenta veces. Así son de abundantes.

Las costas ofrecen numerosos bienes y oportunidades a nuestra sociedad, por lo que no es de sorprender que la mitad de la población humana mundial se encuentre a menos de 100 km de la costa. Es decir, una gran proporción de los humanos vive en la estrecha franja de la zona costera, que representa menos del 10% de la superficie continental del planeta.

México no es la excepción de esta tendencia mundial. Nuestro litoral es extenso y, dependiendo del método utilizado para medir, se ha calculado que contamos con una extensión que puede estar entre los 9,000 y los 15,000 km de costa. Según el World Factbook, a nivel mundial, ocupamos el 15° lugar en longitud de costa, y en el continente somos el tercero, superados únicamente por Canadá y Estados Unidos.

La mitad de los estados en los que se divide el país políticamente cuenta con una zona costera. Nuestras costas son muy heterogéneas y diversas. Contamos con playas arenosas, rocosas, acantilados. Así mismo, la diversidad de ecosistemas es enorme, e incluye arrecifes de coral, pastos marinos, dunas costeras, marismas, manglares. Aunque las ciudades más grandes del país se encuentran tierra adentro, el proceso de urbanización en la costa ha sido intenso y en la actualidad alrededor del 30% de los mexicanos vive a menos de 100 km del litoral.

Entre todos los ecosistemas costeros con los que cuenta México, las dunas son las menos famosas, pero no por ello las menos relevantes. Están en todo el país. ¿Qué son? Las dunas costeras son acumulaciones de arena que se forman por la acción del viento. Se encuentran en el fondo de la playa pudiendo extenderse por varios kilómetros a lo largo del litoral y tierra adentro; pueden ser de diferentes tamaños, con

alturas desde menos de un metro hasta más de 40. Si carecen de vegetación, estas acumulaciones de arena pueden ser completamente móviles por lo que avanzan varios metros al año, cuando sopla el viento. También pueden estar cubiertas por vegetación, con lo cual la movilidad de la arena se detiene.

Además de los tamaños y formas contrastantes, la vegetación que se desarrolla sobre estos montículos de arena también es muy variada. Por ejemplo, las plantas de las dunas de la Península de Baja California son muy distintas de las del Pacífico. En el Atlántico, las dunas del Caribe contienen especies de plantas que se parecen muy poco a las del Golfo de México. Así, las dunas costeras mexicanas concentran alrededor de 2,000 especies de plantas, lo que representa cerca del 10% de la flora mexicana. Esto es particularmente interesante si consideramos que las dunas representan solamente el 0.04% de la superficie total del país.

En adición a la impresionante diversidad vegetal que existe en las dunas costeras, es importante recalcar que muchas de las plantas que crecen en estos ambientes también son únicas por su capacidad de tolerar la salinidad que proviene del mar, la sequía y el movimiento de la arena.

Estas plantas se conocen como “psammofilas” que significa que aman la arena. Y sí, podría decirse que aman la arena, puesto que crecen mejor cuando están expuestas a arena en movimiento que las cubre y descubre regularmente.

La capacidad de tolerar el movimiento promueve la formación de dunas. Conforme la arena se acumula alrededor de las plantas, éstas crecen, promoviendo nuevamente la acumulación de arena. Así, poco a poco se forman dunas cada vez más grandes. Además de interesante, la habilidad de formar dunas y tolerar el movimiento de la arena resulta de utilidad para la sociedad humana, puesto que ofrece una protección contra el impacto de tormentas y huracanes.

¿Y qué hay de las dunas de la Península de Yucatán? Los tres estados de la Península de Yucatán contienen dunas en la parte más cercana a la costa. No se adentran tierra adentro. Sin embargo, a pesar de la limitada extensión, han sido estudiadas con detalle y se conoce relativamente bien las especies vegetales que se desarrollan en estos sistemas. A la fecha se han reconocido 784 especies de plantas para las dunas de los

tres estados de la península, lo cual representa entre el 14 y el 17% del total nacional en cuanto a vegetación de dunas costeras se refiere.

Debido a la belleza de los paisajes y la delicadeza y blancura de la arena, las dunas costeras de la Península de Yucatán han estado expuestas a una creciente explotación y degradación, sobre todo debido a la expansión de las manchas urbanas y de las actividades relacionadas con el turismo. De hecho, en los diagnósticos recientes sobre el estado de conservación de las dunas costeras mexicanas, el sureste mexicano es donde se detectaron las condiciones más degradadas. De ahí la relevancia de realizar actividades de restauración y recuperación de especies y ecosistemas.

La "Restauración de dunas costeras de la Península de Yucatán" es sin duda un manual que se produce de manera oportuna, dada la gran necesidad urgente de acciones de restauración de dunas costeras que existe en la zona. El contenido es de gran calidad académica y técnica, y además está ilustrado con hermosas fotografías y dibujos, que facilitan la comprensión del texto. Se trata de un trabajo atractivo tanto para académicos interesados en el tema, como para el público en general y tomadores de decisiones que tienen la intención de actuar y restaurar estos bellos y útiles ecosistemas. Adecuadamente, el manual da inicio con una introducción a las dunas costeras de la Península de Yucatán, describiendo sus formas y la vegetación que crece sobre ellas. Posteriormente, se hace un diagnóstico sobre la factibilidad y diseño de proyectos de restauración, para continuar con la extensa sección dedicada al tema central del trabajo, los procesos ecológicos en la restauración de dunas costeras. Concluye el trabajo con cuatro casos de restauración de dunas costeras que se han llevado a cabo en la zona. Por último, los autores fueron lo suficientemente cuidadosos como para ofrecer al lector un glosario de términos con el cual se facilita la comprensión de los conceptos técnicos utilizados en el texto. Es un trabajo único en el país, que innegablemente deberá servir de ejemplo para las otras costas mexicanas que también tienen la necesidad de restaurar sus dunas costeras. ¡Enhorabuena para los autores y para los lectores que disfrutarán y utilizarán el manual!

Ma. Luisa Martínez
Xalapa, Ver., 29 de abril de 2022

AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Carolina Rosales Juárez, por su apoyo para el seguimiento de la edición del presente manual.

A los técnicos académicos del Campus de la UNAM en Yucatán: M. en C. Carlos Cruz Vázquez; M. en C. Maribel Badillo Alemán; M. en C. Jesús Aragón González, Dra. Patricia Guadarrama y M. en C. Alfredo Gallardo Torres, por su apoyo en salidas al campo y trabajo en laboratorio.

Al M. en C. Irving Ricardo Vargas Solís, quien revisó y verificó las cantidades y la forma de aplicar los herbicidas.

Al M. I. José Luis Maya García, por su revisión y sus aportaciones al trabajo para la sección de seguridad de este manual.

A la D. G. Leticia Esmeralda López Badillo por las correcciones en los diagramas.

Al entusiasta grupo de restauradores, quienes apoyaron en el campo mediante la reproducción y siembra de plántulas para el proyecto de Chixculub.

A los estudiantes de la Licenciatura de Manejo Integrado de Zonas Costeras, por su innovación y compromiso con la conservación de las dunas de Sisal a través del proyecto Reciclando Dunas.

A los gerentes ambientales y personal de jardinería de los hoteles de la Riviera Maya que compartieron con entusiasmo sus experiencias en proyectos de rehabilitación.

A dos revisores anónimos que aportaron sus conocimientos para mejorar este manual.

PRESENTACIÓN

Las dunas costeras son formaciones arenosas de origen eólico que se desarrollan a lo largo de cualquier costa donde haya suficiente sustrato suelto y que sea susceptible de ser transportado por la acción del viento. Brindan importantes beneficios a las comunidades humanas, tales como protección contra tormentas y huracanes, reducción de la intrusión salina, amortiguamiento de la erosión, almacenamiento y filtración de agua, provisión de paisajes escénicos y recursos medicinales, entre otros. Los servicios más conocidos popularmente son recreación y paisajes escénicos, ya que son el sustento del turismo de sol y playa (MEA, 2005; Everard, Jones y Watts, 2010; Mendoza-González *et al*., 2012). Las dunas costeras son un ecosistema de gran valor ambiental y social, que debe ser conservado para mantener sus atributos y los servicios ecosistémicos que proporciona.

Estos ecosistemas arenosos constituyen la transición entre el continente y el océano, son sumamente frágiles y, por lo tanto, vulnerables a la acción humana (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007). Los pobladores, turistas y empresarios desarrollan actividades humanas que impactan y modifican las dunas costeras, lo que provoca la reducción de su capital natural, la alteración de su funcionamiento y la disminución del flujo de servicios ecosistémicos, los cuales sólo podrían ser rescatados si éstas son restauradas.

La restauración ecológica tiene el objetivo de recobrar los procesos ecológicos naturales a través de la recuperación de sus componentes bióticos (especies) y abióticos (geomorfología) (Martínez *et al.,* 2014). Entre las principales acciones para la restauración de dunas costeras estables se encuentran contar con la topografía original, estabilizar el sustrato móvil, revegetar con especies nativas del sitio y remover especies exóticas e invasoras (Lithgow, Martínez y Gallego-Fernández, 2013).

El presente manual explica la importancia de las playas y dunas de la Península de Yucatán (PY), su recuperación y las técnicas para lograrlo. El Capítulo I presenta sus principales características biofísicas, los servicios ecosistémicos que proveen y los principales impactos que amenazan su provisión. También se mencionan algunos conceptos básicos acerca de la restauración de dunas costeras. El Capítulo II muestra cómo elaborar un diagnóstico del área para determinar el tipo de restauración que se puede realizar de acuerdo con los sitios de interés, su factibilidad y los pasos para diseñar un proyecto al respecto. El Capítulo III describe los diferentes procesos ecológicos para restaurar las dunas, así como su mantenimiento y monitoreo. Finalmente, en el Capítulo IV se ejemplifican algunos estudios de caso en los que se muestran algunas experiencias durante un proyecto de este tipo. Se incluye también un glosario con los términos técnicos y clave que se presentan como parte del contenido, una sección con las referencias bibliográficas que nutrieron la revisión documental de este trabajo y un anexo con algunas medidas de seguridad a seguir durante las labores de restauración.



Fotografía: Vanessa Hernández

Capítulo

1

INTRODUCCIÓN

1. Importancia de las dunas costeras en la Península de Yucatán

Las dunas costeras de la Península de Yucatán proveen importantes beneficios a las comunidades humanas y a la economía de la región:

- Ofrecen paisaje escénico y zonas de recreación, toda vez que son el sustento del mayor destino turístico de México, el Caribe, y constituyen la fuente de sedimentos para que se lleve a cabo la contemplación y la recreación de los habitantes en todas las playas de la región.

- Reducen el impacto de las tormentas, contrarrestan el efecto del viento, del oleaje y de las inundaciones derivadas de los huracanes que afectan las costas periódicamente. También protegen las viviendas, la infraestructura urbana y turística.

- Forman parte de la filtración y recarga de acuíferos de agua dulce a través del fino espacio entre los granos de arena, de donde muchas comunidades humanas extraen el agua para su consumo.

La vegetación de dunas costeras provee beneficios adicionales:

- Sus raíces y tallos atrapan y retienen el sedimento, manteniéndolo estable y reduciendo la erosión eólica y marina de la duna.

- Atrapa la sal transportada por aspersión marina, lo que reduce la salinidad tierra adentro y evita que dañe infraestructura y sembradíos en el interior.

- Ofrece hábitat de alimentación, reproducción y crianza para la vida silvestre, en particular, abriga especies en etapas juveniles y sitios de anidación, como los de las tortugas marinas.

- Provee plantas ornamentales, tales como la uva de mar (*Coccoloba uvifera*), un árbol que es muy utilizado en desarrollos urbanos costeros de Yucatán. Otro ejemplo es el lirio de playa (*Hymenocallis littoralis*), una planta con flores y hojas muy llamativas que algunos hoteleros en Quintana Roo utilizan para adornar sus jardines.

- Brinda recursos medicinales, ya que algunas plantas son utilizadas tradicio-

nalmente para tratar enfermedades que afectan la salud de la población local, tales como riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), la cual es utilizada para tratar afecciones de riñón.

- Suministra alimentos, ya que algunas comunidades aprovechan sus flores y frutos para consumo humano, como la uva de mar (*Coccoloba uvifera*), cuyos frutos se consideran comestibles.

1.1 Las dunas costeras de la Península de Yucatán

Las dunas costeras son acumulaciones de arena transportadas por la acción del viento. La forma, el tamaño y la orientación de éstas son particulares de cada zona y dependen de factores como el tamaño y peso de los granos de arena, la fuerza y dirección de los vientos dominantes, y de la vegetación que en ellas se establece (Chapman, 1978; Moreno-Casasola *el al.*, 1982; Ranwell, 1972).

La PY presenta dunas con pendientes bajas que generalmente están estabilizadas por vegetación. La superficie y la longitud litoral de éstas varía por estados, las de Campeche son las que presentan una superficie más extensa y las de Quintana Roo, una mayor longitud litoral (Tabla 1). Se encuentran ubicadas sobre una placa de origen cárstico y principalmente están formadas por arena de origen biológico, resultado de la desintegración de arrecifes de coral y conchas de moluscos, aunque en el sur-suroeste de Campeche, los ríos, lagos, lagunas y esteros han aportado materiales de origen mineral (Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, 2010). La altura de las dunas está relacionada con la energía del viento y las olas a las que están expuestas, por lo tanto, la mayoría de ellas en la PY están formadas por planicies de playas bajas con acumulaciones de baja altura, varían de 3 a 6 m y presentan pendientes muy ligeras (Moreno-Casasola *et al.,* 2014a y 2014b). Existen tramos con mucha energía, donde históricamente han alcanzado más de 10 metros, como en Cancún, donde también la pendiente es mayor (Fonatur, 1982).

Varios sitios presentan un tramo frontal separado del continente denominado islas de barrera (Moreno-Casasola *et al.,* 2014a y 2014b; López-Rosas *et al.,* 2014). Estos sistemas se caracterizan por ser altamente dinámicos debido a las interacciones que ocurren entre el clima, su geología y la vegetación que se distribuye en ellos, lo que genera una alta heterogeneidad microambiental (Miller, Gornish y Buckley, 2010). También se distinguen por tener condiciones ambientales estresantes, como alta salinidad, movilidad de sustrato, baja cantidad de nutrientes y escasez de agua dulce.

Tabla 1. Superficie (en ha y porcentaje) y longitud litoral de dunas costeras (en km y porcentaje) de la Península de Yucatán

	Campeche	Yucatán	Quintana Roo	Península de Yucatán
Superficie (ha)	43 534	11 484	12 278	67 296
Superficie (%)	65	17	18	100%
Longitud litoral (km)	532	342	865	1 739
Longitud itoral (%)	30	20	50	100

Fuente: elaboración propia con base en Martínez et al. (2014).

1.2 Formación y dinámica de las dunas costeras

Los factores determinantes en la formación de las dunas son la cantidad y el tipo de sedimentos, la velocidad y dirección del viento, la energía de las olas, la presencia de obstáculos, la tasa de incremento o el descenso del nivel del mar y la orientación de la playa (Jiménez-Orocio *et al.,* 2014; Martínez *et al.,* 2014).

Las dunas se forman a partir de una acumulación de sedimentos en la parte trasera de la playa depositados por las olas; el transporte de éstos ocurre principalmente por la corriente paralela a la costa y la deriva litoral (Goda, 2000; Secaira y Acevedo, 2017). Posteriormente, el viento mueve la arena tierra adentro y ésta se acumula alrededor de elementos que lo interrumpen, como accidentes topográficos de la costa, o por raíces y tallos de plantas. Los obstáculos más eficientes para disminuir la velocidad del viento y depósito de arena son los tallos, ramas y raíces de hierbas postradas o rastreras, y arbustos de baja altura presentes en la duna (Moreno-Casasola y Espejel, 1986); esta acumulación permite el desarrollo de plantas nuevas, lo cual reúne más arena, tal proceso crea cordones de dunas tierra adentro de manera paralela al primer cúmulo de arena (Moreno-Casasola *et al.,* 2010) (Figura 1). Una vez formadas las dunas, las móviles tienden a migrar, en gran medida, en dirección a los vientos dominantes (Dean, 2005). La forma de la duna no sólo depende de su cobertura vegetal, de las características del crecimiento y de la densidad de especies vegetales, sino de su ubicación con respecto al viento y el impacto de éste sobre ella (Packham y Willis, 1997; Hesp, 2002).



Figura 1. *Esquema de la formación de dunas costeras progradante o creciente, en las que la vegetación funciona como obstáculo. A) Interrupción del movimiento de arena por raíces y tallos de plantas; B) Acumulación de arena a causa de las raíces y los tallos enterrados de plantas pioneras; C) Aumento en acumulación de arena formando una elevación; estabilización del sedimento por aumento de cobertura y altura de vegetación; D) Desarrollo de cordones de dunas tierra adentro de manera paralela a la primera acumulación de arena.*

Según la dinámica sedimentaria, la costa puede ser dividida en:

Progradante

Ocurre una deposición de materiales (arena, sedimentos) en la línea costera, que genera un crecimiento, ganando terreno al mar.

Estable

La dinámica sedimentaria conlleva procesos naturales de acreción (deposición de materiales y arena) y erosión (pérdida de arena), pero, en términos generales, a lo largo de los años la costa se mantiene en posición estable.

Erosiva

Existe una mayor pérdida de materiales y arena que genera que el litoral se erosione a lo largo del año y retroceda.

1.3 Tipos de dunas costeras en la Península de Yucatán

Las dunas costeras adquieren diferentes formas como resultado de los procesos de deposición por acción del oleaje, del transporte eólico, del tipo de material, de la posición o distancia a la playa, de la movilidad del sustrato y de la presencia y tipo de cobertura vegetal (Jiménez-Orocio *et al.,* 2014). Las dunas en la PY se pueden clasificar:

- **Por su posición o distancia a la playa:**

Dunas primarias

Son los primeros montículos de arena más cercanos al mar; el ambiente marino es el que predomina como factor modelador.

Dunas secundarias

Son el segundo cordón de montículos de arena, con poca vegetación y fuerte influencia eólica.

Dunas terciarias

Son las acumulaciones de arena más distantes de la línea de costa, con una abundante cobertura vegetal e influencia terrestre (Cooper, 1967).

- **Por sus características topográficas** (Figura 2):

Dunas embrionarias

Son montículos de arena relativamente pequeños y aislados, de formación reciente, y generalmente cercanos al mar.

Dunas frontales

Son el resultado de la coalescencia de las dunas embrionarias fijadas por vegetación pionera tolerante a altos niveles de salinidad. Éstas se convierten en múltiples cordones paralelos de dunas frontales con vegetación de mayor tamaño y tolerante al enterramiento (Silva *et al.,* 2017).

La mayor parte de la costa de la PY está formada por dunas frontales y la planicies de estas (Moreno-Casasola *et al.*, 2014a)

Hondonadas

Son el canal inundable a manera de semicírculo, que delimita el inicio y el término de cada cordón de dunas ubicadas en las partes más bajas del sistema dunar. Se originan por una disminución de la cubierta vegetal del terreno y la erosión causada por los vientos o por oleajes intensos; estos últimos pueden formar zonas inundadas temporales (Jiménez-Orocio *et al.,* 2014; Hesp, 2000).

Dunas fósiles

Son dunas antiguas petrificadas (o litificadas) con presencia de areniscas; las más antiguas en la región corresponden al Holoceno (Aguayo-Camargo, 2005).

en Quintana roo se presentan también amplios cordones de playa consolidados y dunas fósiles, que en muchos casos están cubiertas por arena, dando la impresión de playas arenosas intercaladas con playas rocosas (Moreno-Casasola et al., 2014a)

Por su cobertura vegetal y movilidad (Figura 2):

Dunas móviles

La arena está en constante movimiento; no presentan vegetación o es muy escasa.

Dunas semimóviles

Presentan una cubierta vegetal moderada y, por tanto, su sedimento está en menor movimiento.

Dunas estabilizadas o fijas

Están cubiertas casi en su totalidad por vegetación, sin movimiento de arena importante (Cooper, 1967). La mayoría en la PY se encuentra estabilizada.

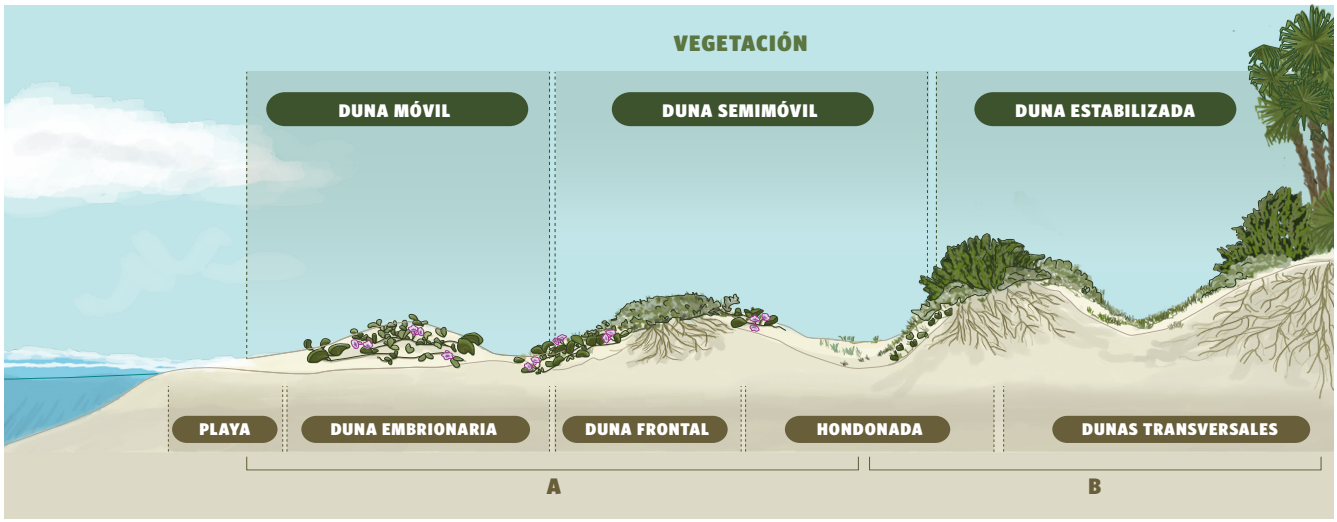


Figura 2. *Se observa una zonificación del perfil de dunas, de acuerdo con un criterio topográfico (playa, duna embrionaria, duna frontal, hondonada y dunas transversales) y de vegetación (zona móvil, zona semimóvil, duna estabilizada). A) Indica la vegetación pionera; B) Indica la vegetación de matorral arbustivo.*

- **Por el aparente color de la arena:**

Dunas amarillas

No tienen materia orgánica, con falta de vegetación y gran movimiento de arena.

Dunas cafés

Tienen materia orgánica, escasa vegetación y arena semimóvil.

Dunas grises

Tienen vegetación bien establecida, con complejos procesos entre la raíz y el suelo, que genera un mantillo orgánico (Jiménez-Orocio *et al.*, 2014).

Por otra parte, las playas pueden clasificarse:

- **Por su pendiente:**

Playas reflectivas

Se forman bajo condiciones de oleaje poco energético, en zonas protegidas y con sedimentos gruesos. Generalmente son uniformes y de pendiente pronunciada.

Playas disipativas

Son amplias en anchura, presentan una pendiente poco pronunciada, con arena más fina. En la costa yucateca conforman playas de barrera y dunas costeras donde los cambios se aprecian con mayor facilidad, ya que son erosionadas por la acción del viento y del mar (Semarnat, 2013).

- **Por el origen del aporte de sedimento:**

Sedimento biogénico

Proveniente de corales, conchas de moluscos, como es el caso de la PY.

Sedimento mineral

Proviene de la erosión de montañas y rocas, como sucede en el sur de Campeche.

1.4 Vegetación en las dunas costeras

La vegetación es clave en la formación, el tamaño y la forma de la duna, e interviene en los procesos de acumulación y estabilización de la arena (Martínez, Valverde y Moreno-Casasola, 1992; Secaira y Acevedo, 2017). Además, genera nuevas condiciones ambientales al proporcionar materia orgánica y sombra, lo cual facilita la llegada y el establecimiento de otras especies (Luna *et al.,* 2011; Rodrigues, Mascarenhas y Jagtap, 2011).

La vegetación de las dunas costeras es altamente especializada, ya que tiene la capacidad de adaptarse al constante cambio del ambiente marino-terrestre. Generalmente, es rala y crece en forma rastrera o arbustiva, tolera el enterramiento y el estrés hídrico, y se caracteriza por presentar hojas gruesas y cerosas (Flores y Espejel, 1994; Castillo *et al.,* 2000). Esta vegetación en la PY comparte especies de plantas que se encuentran entre el golfo de México y el Caribe; además, varía a lo largo del gradiente de mar hacia tierra adentro en respuesta al cambio medioambiental causado por la distancia hacia el océano (Jiménez-Orocio *et al.,* 2014) y se clasifica en:

Vegetación pionera

Plantas herbáceas postradas y arbustivas de poca altura, ubicadas sobre arena móvil cerca de la playa y del mar, donde las condiciones de salinidad, temperatura y nutrientes son adversas. Es tolerante a niveles extremos de salinidad, vientos fuertes e inundación. Las especies más comunes de la zona de pioneras en la región son *Sesuvium portulacastrum, Ipomoea pes-caprae, Cakile lanceolata, Euphorbia buxifolia, Canavalia rosea, Suriana maritima, Tournefortia gnaphalodes, Ernodea littoralis* y *Scaevola plumieri* (Durán, Torres y Espejel, 2010).

Vegetación de matorral costero

Se ubica al interior de la duna, en arena estabilizada y suelo con mayor cantidad de materia orgánica y menor salinidad. Las especies de plantas de matorral costero son menos tolerantes a cambios medioambientales; generalmente dominan los arbustos y árboles. Las especies más comunes de la zona en la región son *Agave angustifolia, Bravaisia berlandieriana, Acanthocereus tetragonus, Metopium brownei, Pithecellobium keyense, Gossypium hirsutum, Coccothrinax readii, Bonellia macrocarpa, Coccoloba uvifera*, entre otras (Durán, Torres y Espejel, 2010).

1.5 La función del viento y el oleaje en la dinámica de las dunas costeras

La interacción entre la playa y el oleaje se divide en tres zonas:

1. **Infraplaya.** Zona cubierta permanente por el océano, delimitada por una barra sumergida mar adentro y por la base del oleaje en la dirección de la costa.

2. **Mesoplaya.** Zona donde rompe el oleaje en condiciones normales y queda expuesta temporalmente a la atmósfera; delimitada por la infraplaya y el nivel superior que alcanza el oleaje sobre la playa, denominada berma. La berma de tormenta es generada por el oleaje de este fenómeno.

3. **Supraplaya.** Zona expuesta permanente a la atmósfera en condiciones normales, delimitada por la berma extendiéndose hasta la primera duna costera (Bird, 2008) (Figura 3).

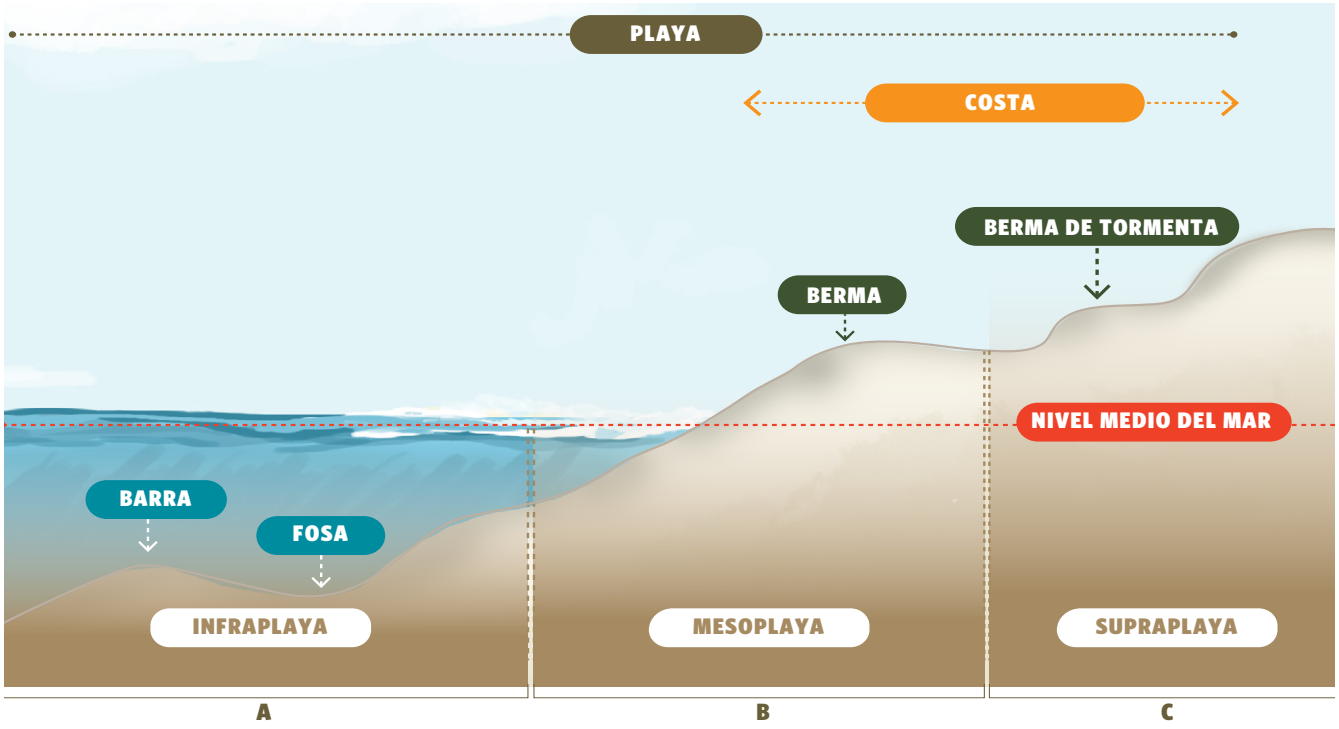


Figura 3. *Se observa la zonificación general de playas de acuerdo con el movimiento e intensidad del oleaje y fenómenos naturales. A) Infraplaya (playa sumergida); B) Mesoplaya (zona de rompiente); C) Supraplaya (zona seca de la playa).*

En la supraplaya existe una acumulación de sedimento transportado por el viento. El movimiento de arena requiere vientos mayores a 4.5 m/s (Camacho *et al.,* 2011), los cuales transportan partículas de arena de grano grueso (2 a 5 mm) por arrastre, de grano medio (0.5 a 2mm) por saltación y de grano fino (0.02 a 0.5 mm) por suspensión (Carr, 1982) (Figura 4). Esta dinámica depende de cada región; como ejemplo, en las costas del estado de Yucatán, durante primavera-verano, el viento en las mañanas es suave en dirección sureste; cambia por la tarde con brisas marinas en dirección noreste. En temporada invernal, este régimen de brisas marinas se combina con vientos intensos del noroeste o *nortes* causados por frentes fríos provenientes de Norteamérica hacia el sur (González y Sandoval, 2017).

El oleaje y las mareas generados por tormentas alteran la dinámica y la estabilidad de las dunas; se distinguen cuatro diferentes niveles de impacto (Figura 5):

1. **Rebalaje o *swash*.** Tiene lugar cuando el nivel del agua llega a la parte frontal de la playa erosionándola, sin alcanzar la duna; posteriormente, la playa puede recuperarse sin pérdida de sedimento.

2. **Colisión.** Sucede cuando el nivel de agua rebasa la playa e impacta la parte frontal de la duna, arrastrando sedimento hacia el mar, que es transportado por la corriente paralela a la costa.

3. **Deslave.** Ocurre cuando la marea alcanza la altura de la duna.

4. **Inundación.** Se presenta cuando la duna entera es sumergida (Sallenger, 2000; Silva *et al.,* 2016).



Figura 4. *Transporte de granos de arena movidos por el viento proveniente de sotavento. Éstos son obstruidos por las raíces y estructuras de las plantas, lo que genera un vortex de arena (que cambia la dirección del viento), depositándolos y reteniéndolos en dirección barlovento, lo que aumenta la altura y longitud de la duna.*

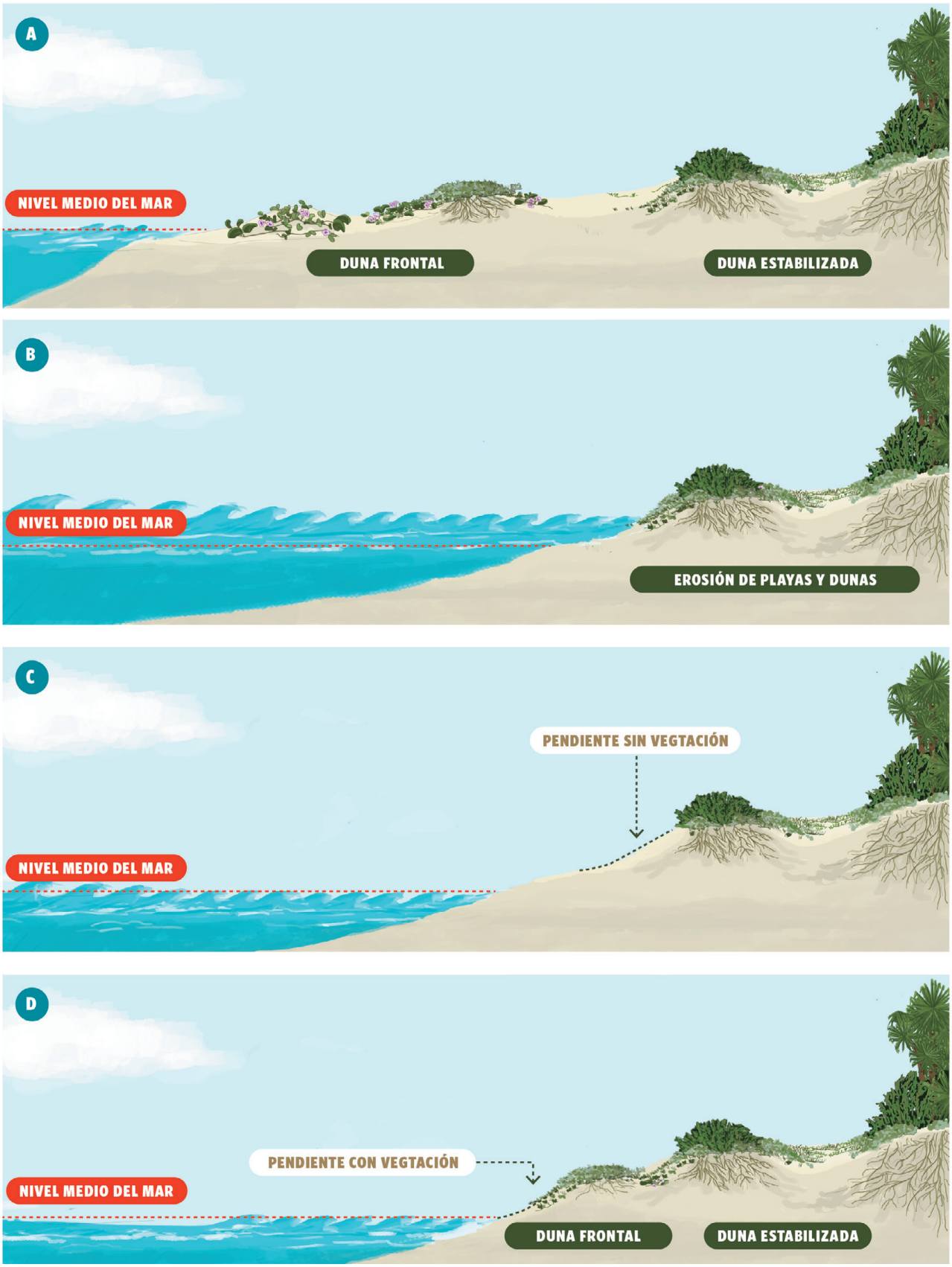


Figura 5. *Dinámica y estabilidad de las dunas costeras a lo largo del año. A) Olas moderadas que depositan arena en la playa para formar dunas frontales; B) Aumento del nivel medio del mar durante tormentas que erosionan playas y dunas frontales; C) Temporada de brisas, cuando las olas nuevamente depositan sedimentos en las playas; D) Se generan una vez más espacios ecológicos que permiten el crecimiento de plantas nuevas y la conformación de una duna frontal. Fuente: elaboración propia con base en Hesp (2000).*

Las dunas funcionan como reservas de sedimento, ya que reciben, proveen y almacenan arena transportada desde y hacia playas adyacentes (Ranwell y Boar, 1986), las cuales presentan distintos procesos y ciclos de acreción (deposición de arena), y erosión (remoción de arena). Ambos están relacionados principalmente con la energía proveniente de las olas y la fuente de sedimentos; éstas simultáneamente depositan y remueven arena de la playa, lo que causa que el ancho aumente y disminuya en respuesta a distintos ciclos, como los que suceden a diario provocados por los cambios en las mareas, los anuales originados por vientos estacionales como *nortes* y *suradas*, y aquellos multianuales, o bien que son resultado de procesos episódicos como ciclones tropicales y *nortes* (Secaira y Acevedo, 2017). El suministro periódico de arena de la duna a la playa es necesario para mantener la dinámica de la costa; la interrupción o disminución del balance en el suministro de arena provoca su erosión (Nordstrom, Psuty y Carter, 1990).

1.6 La situación crítica de las dunas costeras en la Península de Yucatán

Las dunas de la PY han sido y son seriamente afectadas por el desarrollo de infraestructura turística y urbana mal planificada, prácticas inadecuadas de turismo recreativo, carreteras costeras y actividades agropecuarias. Las actividades recreativas se dividen en dos: a) Recreación activa, relativa a los mayores impactos en el sistema, que modifica el ambiente biofísico y lo degrada con actividades de manera directa (p. ej., uso de vehículos todo terreno, voleibol de playa, campos de golf). El uso de vehículos sobre las dunas costeras, además de destruir la vegetación, los nidos de tortugas marinas y otras especies, compacta la arena, lo que dificulta el restablecimiento del sistema. b) Recreación pasiva, relativa a actividades que tienen un impacto indirecto en los sistemas. Éstas requieren de infraestructura para poder desarrollarse (p. ej., palapas, camastros para tomar sol, bares y restaurantes de playa), y de esta manera es como se modifica principalmente el ambiente; algunas son caminatas, *sand surf*, paseo en bicicletas y contemplación (Martínez *et al.*, 2014). La construcción masiva de infraestructura sobre las dunas costeras ha causado modificaciones en la dinámica del sistema, ya que funciona como obstáculo que interrumpe o desvía el flujo de agua y los sedimentos (Guido-Aldana *et al.,* 2009; Martínez *et al.*, 2014). Esto ha resultado en la disminución de sedimento disponible, ya que detiene el transporte natural que ocurre a lo largo del litoral, favoreciendo procesos de erosión y retroceso de la línea de costa del estado (Semarnat, 2013).

Asimismo, el cambio climático incrementa las tormentas tropicales y aumenta el nivel del mar. En este sentido, los daños ocasionados por fenómenos climatológicos extremos son mayores en zonas donde la duna ha sido invadida, eliminada o modificada. En muchos casos, las construcciones promueven la concentración de energía del oleaje sobre la playa, lo que aumenta la erosión al pie de muros, casas, hoteles y vías de comunicación (Guido-Aldana *et al.,* 2009; Semarnat, 2013).

Debido a la llegada masiva de sargazo de los últimos años, en algunas playas de la PY, principalmente en zonas turísticas de Quintana Roo, se realiza una remoción mecanizada de éste con maquinaria pesada, la cual afecta negativamente las dunas embrionarias debido a la compactación del suelo, la pérdida de arena que se queda atrapada entre el sargazo removido y la reducción de la pendiente en las playas, lo que favorece el avance del oleaje tierra adentro. Estas prácticas afectan la estabilización natural del sedimento y los procesos naturales del litoral, ya que cuando este tipo de alga llega en cantidades normales, proporciona fertilizantes naturales y protege el suelo de la erosión.

1.6.1 Las dunas en Campeche

La mayoría de las dunas del estado de Campeche se encuentran en mal estado de conservación debido a que han sido transformadas por actividades agropecuarias y relacionadas con la actividad petrolera (derrames de petróleo han impactado frecuentemente estos ambientes). Éstas se hallan en alto riesgo de erosión y deterioro, principalmente por la construcción de carreteras costeras, la instalación de infraestructura de gran calado y los derrames de petróleo que afectan el litoral. Al sur del estado, donde se encuentran las dunas más amplias, la vegetación ha sido sustituida por cocoteros, principalmente para usos agropecuarios. Asimismo, la costa de Campeche sufre un retroceso considerable del que se ha calculado una tasa media de erosión anual que va de los 8 m hasta los 15 m (López-Rosas *et al.,* 2014).

1.6.2 Las dunas en Yucatán

A pesar de que el estado cuenta con Áreas Naturales Protegidas que favorecen la conservación de las dunas costeras, éstas se encuentran bajo presión y vulnerabilidad debido a desarrollos de vivienda de veraneo y crecimiento urbano a lo largo de la costa (como Sisal, Progreso y Telchac). Muchas de estas construcciones han destruido la duna embrionaria y la vegetación. La edificación de los puertos de abrigo para la pesca, la instalación de estructuras de protección (como espigones y escolleras) y el puerto de altura de Progreso interrumpen el transporte litoral en la costa del estado, lo que ha generado una erosión crónica y de grandes dimensiones en las playas de Yucatán. Asimismo, las dunas se encuentran impactadas por una carretera costera que las cruza y por la generación de caminos de terracería que comunica los poblados costeros y

las viviendas de veraneo. De igual forma, los *nortes* y los huracanes generan pérdidas de arena en periodos rápidos sobre las islas de barrera (Moreno-Casasola *et al*., 2014b).

1.6.3 Las dunas en Quintana Roo

Las dunas costeras del estado de Quintana Roo están ocupadas por grandes y medianos desarrollos turísticos, hoteles, casas vacacionales y vías de comunicación. Se estima que el litoral de Quintana Roo es una de las zonas de México que más vegetación de dunas costeras ha perdido (Molina, Rubinoff y Carranza, 1998). En gran parte del litoral del estado, éstas han sido modificadas a tal grado que ya no presentan remanentes del ecosistema original y son prácticamente imposibles de restaurar. Adicionalmente, una porción importante de la Zona Federal Marítimo Terrestre (Zofemat), que actualmente es la franja de 10 metros de ancho de tierra firme (Figura 6), transitable y contigua al mar que incluye playa y parte de la duna, ha sido concesionada a usuarios que han desarrollado infraestructura turística y residencial.

En las playas del estado se realizan diversas actividades de recreación activa que impactan el ecosistema por aplanamiento y compactación, lo que ha causado estragos en la vegetación y en las zonas de anidación de pequeños mamíferos y reptiles, como tortugas marinas; a su vez, ha causado erosión (Amador y Moreno-Casasola, 2006). Por otro lado, el desarrollo de campos de golf representa la destrucción total de la topografía y vegetación del ecosistema para dar lugar a una pradera verde en continuo mantenimiento que generalmente incluye gran cantidad de agua de riego y agroquímicos. Asimismo, en muchas zonas, las playas y dunas han sido aplanadas y la vegetación removida, con el fin de adaptarlas al turismo de sol y playa, lo que ha generado erosión y pérdida de arena.

Sumado a esto, Quintana Roo se ubica en una de las regiones de mayor impacto de huracanes, los cuales reducen o ensanchan las playas, forman bajos arenosos y en ocasiones abren o cierran bocas de tormenta que comunican el mar y los humedales. Esto pone al litoral del estado en un grado de vulnerabilidad significativo.

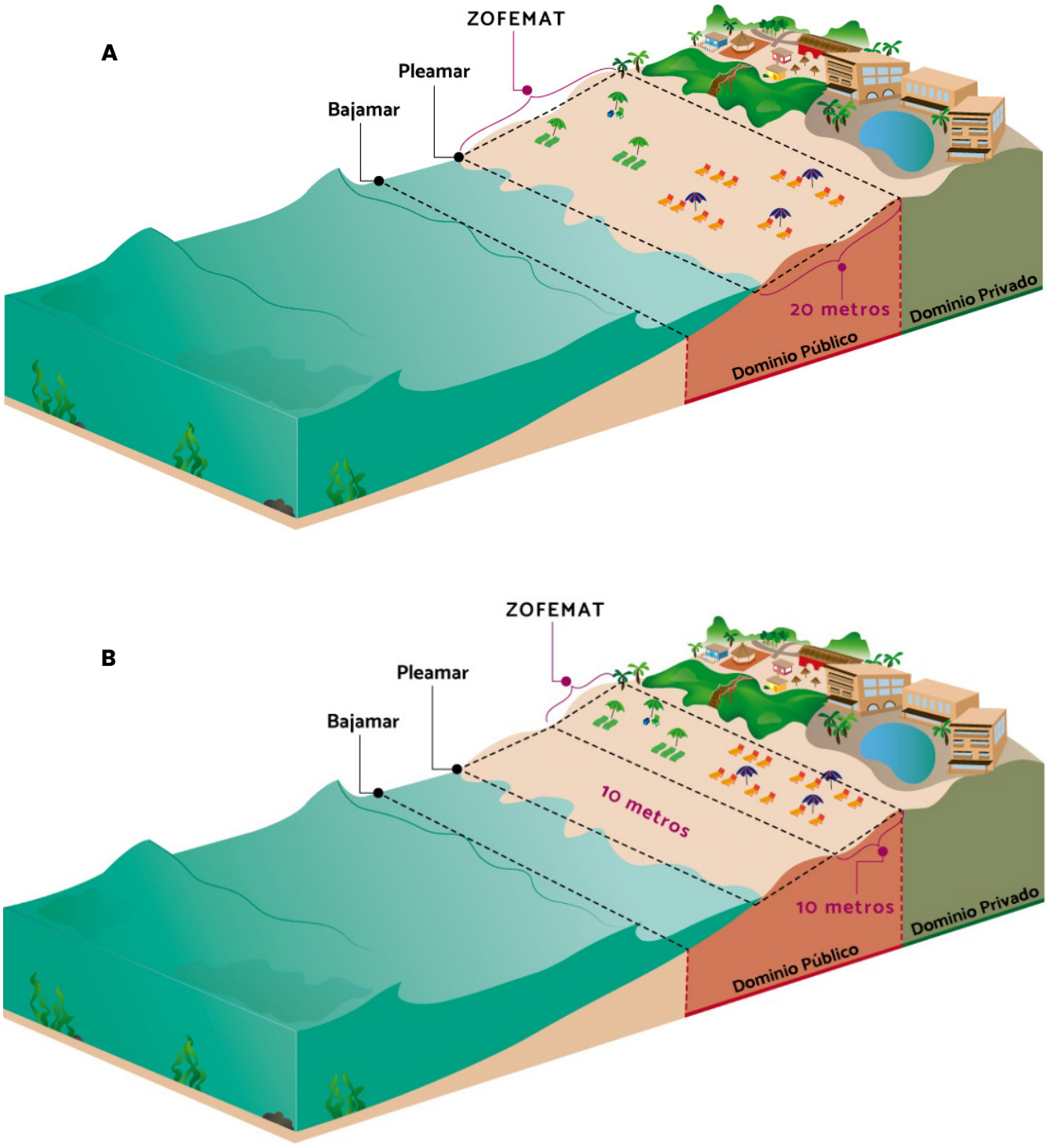


Figura 6. *Dimensiones y delimitaciones de la Zona Federal Marítimo Terrestre. A) Antes de la reforma de los artículos 7 y 119 de la Ley General de Bienes Nacionales (LGBM), el 29 de abril de 2021; B) después de la reforma de los artículos 7 y 119 de la Ley General de Bienes Nacionales (LGBM), el 29 de abril de 2021. La reforma no es retroactiva, de modo que las concesiones previas a abril de 2021 se mantienen dentro de las delimitaciones de la Zofemat de 20 metros. Fuente: elaboración propia. Diseño Gráfico: Nadya Monroy.*

2. Conceptos básicos de restauración de dunas costeras

La restauración ecológica se enfoca en una serie de acciones dirigidas a reducir, mitigar y revertir el deterioro de la naturaleza. Su objetivo es reconstruir, recuperar y mantener la integridad, la salud y la sostenibilidad ecológica a través de la "reparación" de los ecosistemas degradados como consecuencia de perturbaciones naturales o humanas que debilitan su funcionamiento y capacidad de autoregeneración (Lithgow *et al.,* 2014; Sánchez, 2005; Clewell, Rieger y Munro, 2005). De acuerdo con la intensidad de la degradación y las acciones que se llevan a cabo para su recuperación, los ecosistemas pueden restaurarse total o parcialmente. La degradación se relaciona con los cambios graduales que reducen la integridad y la salud ecológica del ecosistema, que generalmente suceden luego de un daño o una transformación ante perturbaciones naturales o alteraciones producidas por actividades humanas (Sánchez, 2005). Un ecosistema degradado reduce su diversidad y productividad, y se caracteriza por la pérdida de vegetación y suelo (SER, 2004; Vargas, 2007; 2011a; Vargas y Velasco-Linares, 2011).

La recuperación del ecosistema puede presentarse en diferentes niveles de profundidad (Lithgow *et al.,* 2014), y generalmente depende de los recursos disponibles y las propiedades de las áreas en que se pretende trabajar:

- **Restauración del ecosistema en etapas originales.** Pretende la recuperación de los procesos y funciones ambientales originales que permiten su sostenibilidad, y con ello se reactiva la provisión de los bienes y servicios ambientales que se da de manera natural. Este tipo es complicado cuando el ecosistema ha sufrido cambios profundos en sus características físicas y biológicas originales.

- **Rehabilitación.** Consiste en realizar acciones periódicas de mantenimiento para lograr la recuperación de algunas funciones del ecosistema cuando es muy difícil que regrese a su condición original. Durante ésta es deseable que se incorporen las especies que se distribuyen en el sitio de manera natural a través de la integración de elementos bióticos y abióticos.

- **Revegetación.** Se trata de la introducción de especies vegetales de dunas costeras (de preferencia, nativas) que cubren el suelo para detener la degradación por erosión de algún sitio donde la cobertura vegetal ha sido removida.

- **Reemplazo.** Se refiere a la transformación de un ecosistema degradado, sin llegar al estado original, y se reemplaza por otro, p. ej., a uno productivo.

En las técnicas anteriores es deseable la reconstrucción de topografía, así como condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas nativas después de una perturbación, permitiendo que los elementos degradados funcionen adecuadamente en el ecosistema (Vargas, 2011b).

La restauración de un sistema puede ser pasiva o activa (Vargas, 2011b), y ambas comparten la meta de recuperar el ecosistema de referencia.

- **Restauración pasiva (sucesión natural).** Es la capacidad que tiene un ecosistema degradado de recuperarse cuando se han eliminado los factores que causan tensión o las perturbaciones que impiden su regeneración, y ésta requiere poca o nula intervención humana. Se basa en permitir que el sistema dunar se recupere por medio de sus procesos naturales una vez que la fuente de la perturbación fue eliminada. P. ej., muchas veces, después de un huracán, las dunas y su vegetación quedan destruidas, sin embargo, esto es parte de su dinámica natural y con el tiempo se recobra, sin necesidad de intervención (Martínez *et al.,* 2014).

- **Restauración activa (sucesión dirigida o asistida).** Es aquella que requiere de diversas acciones impulsadas y controladas por el ser humano, lo que la hace más compleja y costosa que la restauración pasiva. Cuando los ecosistemas están muy degradados y no pueden recuperarse por sí mismos, su regeneración es muy lenta, se desvía o detiene su dinámica natural, entonces es necesario implementar diferentes estrategias para lograr su rescate (Vargas, 2011b).



Fotografía: Vanessa Francisco

Capítulo

2

DIAGNÓSTICO, FACTIBILIDAD Y DISEÑO DE UN PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE DUNAS COSTERAS

1. Diagnóstico del área

Antes de iniciar un proyecto de restauración de duna, es necesario realizar un diagnóstico que ayude a determinar si el sistema de dunas requiere y puede ser recuperado. Para ello, se deben considerar aspectos geomorfológicos, ecológicos, socioeconómicos (Lithgow *et al.,* 2015), climáticos e influencias antrópicas que puedan estar afectando el sistema, tanto en el área que se pretende restaurar como en las zonas aledañas y de influencia. En este sentido, es de mucha utilidad tener de referencia un sistema dunar del área en buen estado de conservación para determinar el nivel de degradación de la zona de interés a restaurar.

A continuación se proponen los aspectos biofísicos que se deben analizar al realizar un diagnóstico de dunas costeras, una breve descripción de ellos y los métodos sugeridos para colectar y analizar la información. Tal valoración puede abarcar todos o algunos de los aspectos propuestos dependiendo del tamaño del proyecto y los recursos e información disponibles.

Tabla 2. Aspectos que pueden ser considerados en el diagnóstico del área de interés y zonas aledañas. Fuente: elaboración propia

Aspecto	Descripción	Metodología sugerida
Geomorfología de la duna	Determinar la topografía, el ancho, la altura, la pendiente y el tipo de sedimento de la duna. Esas características varían de acuerdo con la ubicación y orientación de la duna; por lo tanto, la duna de referencia debe tener ubicación cercana y orienación y tipología similares al sitio de interés. La modificación de la forma natural de la duna es un indicador de su degradación, lo que ocasiona un desequilibrio en su estabilidad que dificulta el regreso a su estado natural.	Literatura o levantamiento topográfico de perfiles perpendiculares a la línea de costa del área de interés y de dunas cercanas en buen estado de conservación. Se pueden usar estadales, GPS diferencial y sobrevuelo de vehículos aéreos no tripulados, dependiendo de los recursos disponibles. Se recomienda realizar los perfiles en varios periodos del año, ya que la duna puede cambiar estacionalmente por el impacto de los *nortes* y *suradas*. Para estudios comparativos en diferentes años, se recomienda hacer los perfiles en los mismos periodos dentro del año, ya que la forma de la duna puede cambiar por efecto de los vientos estacionales.

Aspecto	Descripción	Metodología sugerida
Composición de la comunidad vegetal y banco de semillas	Determinar las comunidades y especies vegetales que hay en la duna de referencia y en el área de interés a restaurar. Identificar especies nativas, exóticas, invasoras y/o parásitas, presencia de plagas y enfermedades, y áreas que estén desprovistas de vegetación. Esta caracterización sirve para determinar la composición de la comunidad vegetal, su nivel de degradación y el esfuerzo que requiere la restauración.	Revisión de literatura, fotografías y bases de datos. Análisis de una duna costera en buen estado de conservación cercana al área de intervención. Transectos perpendiculares a la costa que de preferencia coincidan con los topográficos para identificar: ■ Comunidades vegetales ■ Banco de semillas ■ Cobertura ■ Distribución zonal de las plantas en el gradiente ambiental (del mar hacia tierra adentro) ■ Presencia de enfermedades o plagas ■ Presencia de especies exóticas, invasoras y/o parásitas
Dinámica costera de referencia	Determinar cómo era el sedimento y los aportes sedimentarios en el área a restaurar, así como las corrientes marinas y el oleaje que inciden sobre la playa.	Revisión de literatura publicada y acervo fotográfico (p. ej., imágenes aéreas). También se pueden realizar entrevistas a personas conocedoras del área.
Estabilidad de la línea de costa	Determinar las variaciones de la línea de costa a lo largo de los años (en crecimiento y erosión) de la zona de interés. Determinar si la duna a rehabilitar es creciente, estable o erosiva. El proyecto puede incidir sobre la erosión o adaptarse al fenómeno.	Revisión de literatura, acervo fotográfico, imágenes satelitales y de Google Earth, p. ej., estudio de cambios históricos de la línea de costa para Yucatán (Meyer-Arendt, 2001).
Aportes sedimentarios	Determinar si hay aportes sedimentarios que nutran las playas y las dunas. Una playa estable indica que tal aporte está balanceado con el transporte.	Cálculo de los modelos digitales de elevación para varias fechas y con álgebra de mapas en SIG. Obtención de las tasas de erosión o depositación en una malla altimétrica. A partir de las tasas, se calcula si el balance es positivo o negativo.

Aspecto	Descripción	Metodología sugerida
Diversidad faunística (si el proyecto requiere mayor detalle)	Identificar las especies de fauna presentes en la duna, y algunas interacciones entre éstas y las comunidades vegetales.	Revisión de literatura y proyectos realizados en el área, p. ej., proyectos de conservación y protección de tortuga marina. Recorridos por la duna (diurnos y nocturnos) para identificación de fauna (p. ej., aves, mamíferos, reptiles, insectos, crustáceos, etc.).
Condición del suelo	Determinar la compactación del suelo, la presencia de materia orgánica y la contaminación por basura o sustancias nocivas (p. ej., hidrocarburos).	Revisión de literatura. Revisión visual siguiendo transectos de diagnóstico de aspectos anteriores. Realizar muestras de suelo y enviarlas a análisis de laboratorio para presencia de contaminantes.
Presencia de construcciones y estructuras en el área y zonas adyacentes	Identificar las estructuras existentes sobre la duna, su ubicación, material, función y permanencia. La infraestructura generalmente incluye senderos, palapas, muros de contención, piscinas, postes de luz, etc. El estudio debe abarcar las zonas aledañas, tanto en la tierra como en el mar, para identificar estructuras que puedan causar impacto en la restauración. Incluir escolleras, gaviones, muelles, caminos de acceso, viviendas y hoteles cercanos.	Análisis del terreno, que puede requerir vehículos no tripulados u otro medio de acuerdo con el tamaño del área.
Condiciones climáticas		
Vientos	Dirección e intensidad de los vientos, ya que condiciona la dinámica sedimentaria y la geomorfología de la duna.	Revisión de literatura.
Oleaje sobre la duna	Sirve para determinar la línea de oleaje máximo (pleamar máxima) a partir de la cual se puede restaurar la vegetación.	Revisión de literatura. Entrevistas con conocedores del área.

Aspecto	Descripción	Metodología sugerida
Caracterizar la degradación		
Identificación de las causas de la degradación, p. ej., pérdida de cobertura vegetal, disminución de fauna, presencia de especies invasoras	Es necesario identificar las causas de la degradación de la duna y determinar si ya no existen o pueden manejarse para que la restauración sea viable a corto y largo plazos.	Proponer posibles causas de la degradación (hipótesis) y confirmar con la información compilada en el diagnóstico las estructuras existentes, los cambios en la dinámica costera, el uso de la duna, las especies invasoras, etc.

El monitoreo de vegetación se puede realizar en diferentes puntos naturales cercanos al área de interés que se desee restaurar, obteniendo un análisis de la presencia y densidad de especies en el gradiente ambiental de mar hacia tierra adentro. En el siguiente diagrama (Figura 7) se ilustra el intervalo de distribución de las especies en este gradiente. Los datos se obtuvieron de muestreos de vegetación en las dunas costeras de Puerto Morelos en octubre de 2019.

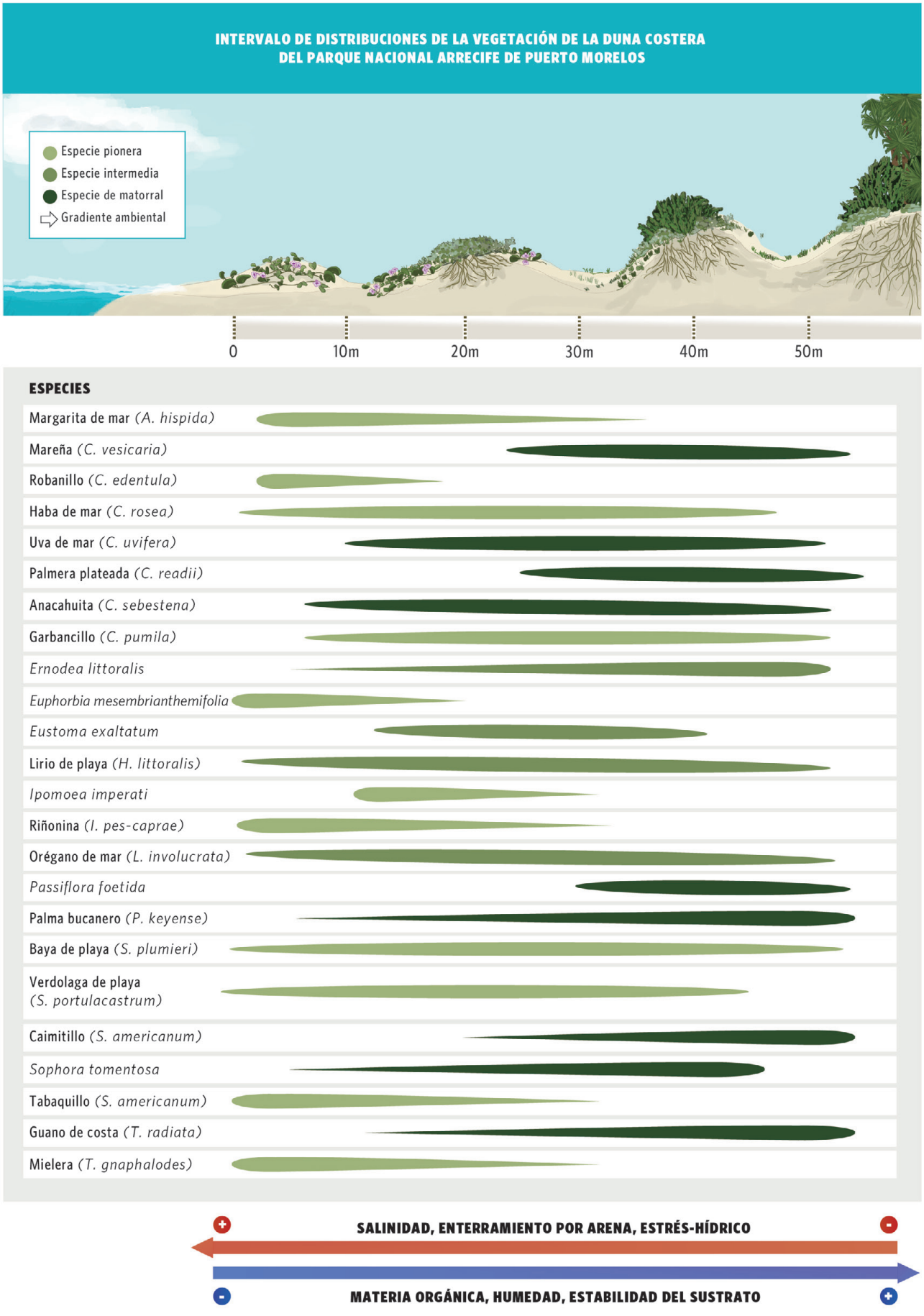


Figura 7. *Diagrama de distribución de plantas en 50 m de las dunas costeras frontales en Puerto Morelos, Quintana Roo. Fuente: Hernández-Mendoza et al. (2020).*

2. Necesidad y factibilidad de un proyecto de restauración

Con base en la información recabada o generada durante el diagnóstico, se aplican los siguientes criterios para **determinar si la restauración es necesaria y factible**, y el nivel de intervención que debe realizarse durante la restauración (Figura 8).

- **El área está degradada y necesita restauración**. El estado del área abarca cuatro factores, los cuales están altamente modificados o degradados:
  - Morfología de la duna
  - Dinámica de la duna
  - Cobertura vegetal
  - Diversidad de especies

- **Causas de la degradación no impiden el éxito de la restauración**. Deben ser manejables para que no sigan perturbando el área y la regeneración sea posible.

- **Condiciones climáticas adecuadas**. La precipitación, los vientos y el oleaje están en un rango aceptable para que la restauración tenga éxito; además, se debe tener la capacidad para responder ante ellas en cualquier evento que pueda perturbar el área, como, por ejemplo, durante una sequía.

- **Condiciones físicas adecuadas**. La línea de costa es estable o tiene las características para estabilizarla. La pendiente y altura de la duna son adecuadas para evitar el daño del oleaje en condiciones normales o es posible recuperar dichas características, o reducir el daño.

- **Material vegetal disponible**. Aquel que es posible colectar para reforestar la cobertura vegetal o reproducirlo legal y técnicamente.

- **Capacidad y recursos disponibles**. Las capacidades técnicas y los recursos humanos y financieros para ejecutar la restauración están disponibles o se pueden conseguir.

- **Interés o apoyo social.** Las comunidades, los visitantes, los propietarios del y alrededor del sitio están interesados y apoyan la realización del proyecto de restauración.

Estos criterios se revisan en orden según el flujo indicado:

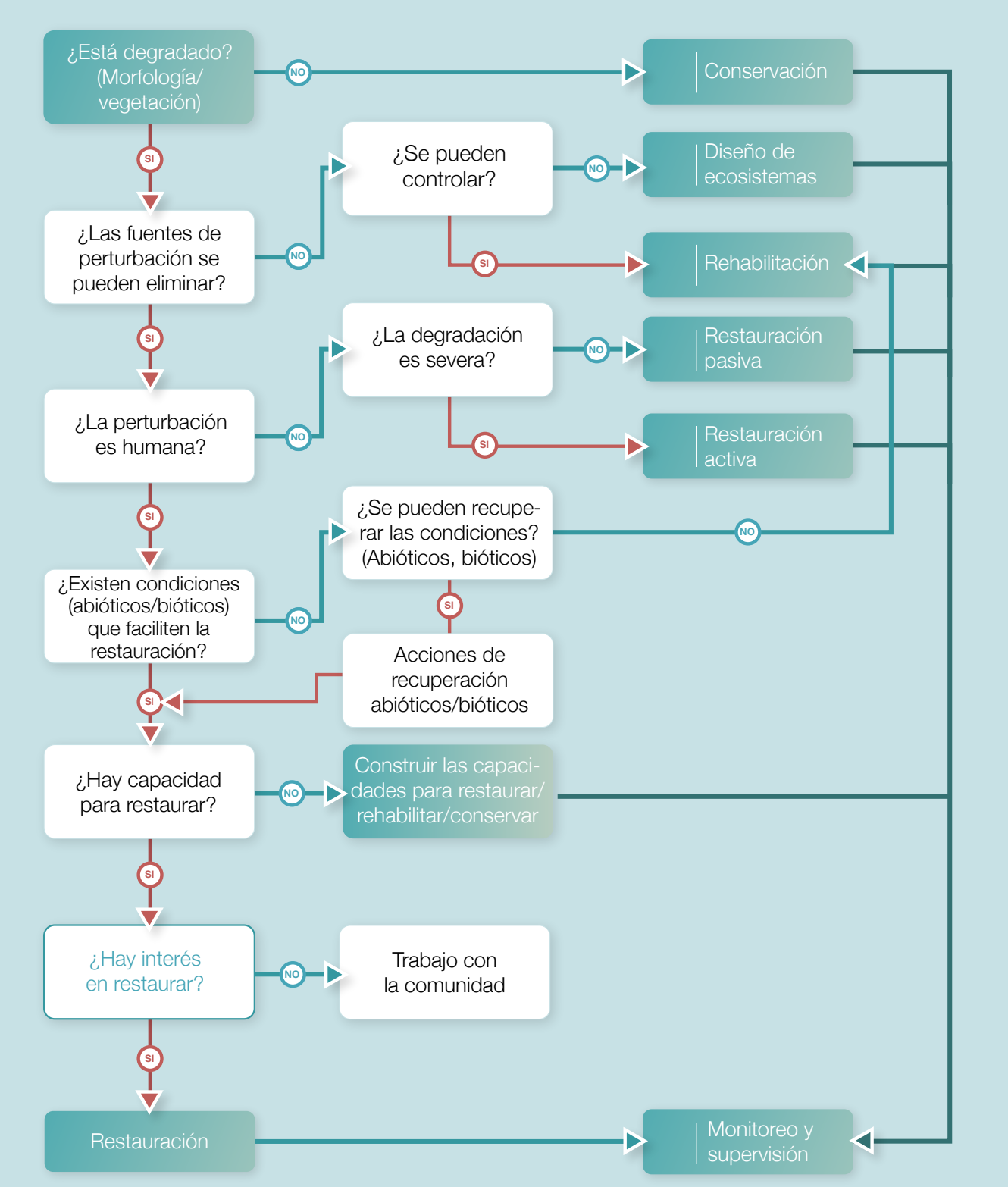


Figura 8. *Elementos a tomar en cuenta antes de iniciar un proceso de restauración de dunas costeras. Fuente: elaboración propia con base en Martínez* et al. *(2016) y Lithgow* et al. *(2013).*

3. Diseño de la propuesta de restauración

Un proyecto de restauración debe ser diseñado cuidadosamente para tener buenas posibilidades de éxito y asegurar el uso eficiente de los recursos. Una vez que se realiza el diagnóstico y se determina que es factible y necesario llevar a cabo la restauración, se procede a elaborar una propuesta de intervención. Ésta contempla una descripción de los objetivos, técnicas, acciones, ubicación espacial y tiempos de ejecución; también se deben especificar las especies vegetales que se emplearán, la forma en que se obtendrán, la infraestructura de apoyo que se requiere y cómo se monitorearán el progreso y el éxito del proyecto. Estos aspectos se enumeran brevemente a manera de resumen y se detallan en el Capítulo III:

1. **Objetivos de restauración**. Es necesario establecerlos con base en lo que se desea alcanzar, el tiempo, el presupuesto disponible y la capacidad técnica del equipo que ejecutará la obra. Éstos determinan las actividades a realizar y pueden variar de acuerdo con el propietario del terreno, lo permitido por la ley y los recursos disponibles. Ejemplos de objetivos son los siguientes: recuperar la morfología de la duna para proteger la costa, la cobertura vegetal del suelo para proteger la duna y la diversidad de especies vegetales en las dunas costeras, así como probar enfoques y técnicas de restauración para aprender de la experiencia.

2. **Procesos de restauración.** Dependen de los objetivos planteados. En algunos casos será necesario implementar procedimientos para la eliminación y el control de especies exóticas, invasivas y/o parásitas, y de infraestructura que afecta las dunas costeras, por ser parte de las fuentes de degradación. También es importante seleccionar los procedimientos adecuados para estabilizar la duna (p. ej., recuperación morfológica de la duna y la vegetación), y las de revegetación.

3. **Propuesta de comunidades vegetales y especies.** Indicar la lista de especies que se emplearán para revegetar la duna. Elaborar un diagrama o diseño paisajístico con la ubicación de la comunidad vegetal propuesta que se pretende restaurar, con referencia al listado de especies correspondiente. Al seleccionar las plantas, se debe considerar que las especies cubren las funciones que se quieren restaurar y tener en cuenta los requerimientos hídricos, lumínicos, de nutrientes, etc.

4. **Revegetación.** Establecimiento de la cobertura vegetal del suelo arenoso para controlar la erosión de la playa considerando los siguientes puntos:

- **Disponibilidad de plantas.** Éstas se pueden producir en un vivero, pero su disponibilidad está sujeta a la presencia de semillas, esquejes y/o plántulas en el área. También se pueden comprar en un vivero o UMA (Unidades para la Conservación, Manejo y Aprovechamiento Sustentable de la Vida Silvestre) que produzca especies de dunas costeras.

- **Actividades de limpieza y preparación del terreno.** Se deben describir las actividades y elaborar un mapa en el que se indique el área específica donde se realizará la revegetación.

- **Técnicas de trasplante.** Indicar la densidad de plantación, la ubicación de las plantas dentro de la duna, la frecuencia e intensidad de riego, etc.

- **Época de plantación.** Indicar el periodo del año en el cual se realizará la plantación. Es importante considerar las épocas de mayor precipitación, los horarios de menor radiación solar y la temporada de tormentas y huracanes.

- Considerar el uso de materiales que fomenten el crecimiento de plantas como micorrizas o hidrogel en el sitio de trasplante, etc.

5. **Infraestructura.** Necesaria para la protección y mantenimiento de la revegetación.

- **Riego.** Indicar la infraestructura necesaria para obtener el agua de riego (pozo, cisterna o sistema existente), almacenamiento y modalidad.

- **Diseño y ubicación de senderos.** Indicar el área donde se realizarán. Estos permiten dirigir el paso de las personas sobre un mismo camino para evitar pisotear la plantas y compactar la arena.

- **Medidas de protección del área restaurada.** Indicar si es necesario diseñar y construir cercos, pasarelas u otro tipo de sistema de protección, y especificar su ubicación.

- **Señalización del proyecto.** Indicar la ubicación y el objetivo de los rótulos y otros señalamientos (p. ej., objetivo del proyecto, especies de plantas, etc.).

- **Propuesta espacial de la infraestructura.** Elaborar un diagrama con la ubicación de toda la infraestructura necesaria, existente y a construir.

6. **Gestión de permisos.** Llevarla a cabo de acuerdo con las actividades a realizarse y la ubicación del lugar. En la actualidad se cuenta con un documento en el que se analiza el marco normativo y regulatorio federal, estatal y municipal aplicable en Quintana Roo relacionado con la imple-

mentación de proyectos de rehabilitación de dunas costeras (Funes-Izaguirre, 2021), que toma en cuenta su ubicación (Zofemat o propiedad privada), así como las acciones a realizar (permisos de colecta, propagación de plantas nativas, revegetación, uso de especies listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010, colocación de estructuras, reubicación de arena, entre otros). Aunque el análisis es para el estado de Quintana Roo, puede ser útil para identificar los tipos de permisos requeridos en otros estados de la PY.

En general, las siguientes actividades requieren la obtención de permisos:

- Acciones dentro de la Zofemat. Autorización de la Semarnat.

- Colecta ética de semillas, esquejes no mayor al 20 % de la planta madre y rescate de plantas en zonas desmontadas para la producción en viveros y revegetación. Tramitar la autorización con la Semarnat.

- Construcción de infraestructura, como senderos, almacenamiento de agua y cercos pueden requerir permisos municipales o del área protegida.

- Colocación de letreros. Existe el *Manual de Señalización de las Áreas Naturales Protegidas* (Conanp, 2020), el cual contempla los lineamientos para la construcción e instalación de rótulos y otros señalamientos dentro de un Área Natural Protegida.

7. **Plan de mantenimiento de la zona restaurada.** Se deben definir los tiempos y necesidades de mantenimiento del proyecto. Esto puede incluir riego, control de especies invasoras y/o parásitas, así como reparaciones preventivas a los sistemas de protección e información, ya que el paso del tiempo provoca deterioro en la madera y otros materiales utilizados en la restauración.

8. **Protocolo de monitoreo.** Se debe elaborar un protocolo de monitoreo para medir los indicadores de éxito del proyecto.



Fotografía: Vanessa Francisco

Capítulo

3

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LAS DUNAS COSTERAS

La restauración de los sistemas de dunas costeras se consigue a través de seis pasos básicos, que pueden ser utilizados de acuerdo con las características y necesidades particulares de las zonas a restaurar:

1. Eliminación o control de las fuentes de la degradación.
2. Recuperación topográfica y estabilización de la duna.
3. Obtención o producción de plantas de duna.
4. Restablecimiento de la vegetación nativa.
5. Mantenimiento y protección del sitio restaurado.
6. Monitoreo del sitio restaurado.

1. Eliminación o control de las fuentes de degradación

Para la restauración de las dunas costeras es necesario, en primer lugar, eliminar las fuentes de degradación; se requiere conocer si éstas son de origen natural o antrópicas. Los fenómenos naturales determinan la geomorfología de la duna y los esfuerzos de restauración deben considerar y coincidir con esta dinámica natural. Las causas de la degradación más frecuentes son la construcción de infraestructura sobre las dunas, la compactación de la arena, la construcción de caminos y la apertura de brechas por pisoteo, la circulación de vehículos automotores, la extracción de arena y la introducción de especies exóticas (las cuales se vuelven invasoras en muchos casos). Una vez identificadas las causas, se debe analizar si las modificaciones antrópicas pueden eliminarse o controlarse (Lithgow *et al.*, 2014).

1.1 Estabilidad de la línea de costa y el aporte sedimentario

Es necesario verificar que la línea de costa no sea erosiva y que exista aporte de arena a la playa por medio del oleaje y las mareas. Este aporte por corrientes paralelas no debe estar interrumpido por espigones o escolleras, que alteran la dinámica del movimiento de sedimentos y causan erosión. Lo ideal es eliminar la causa

de obstrucción, de lo contrario, las dunas construidas tendrán un periodo de vida sumamente corto y será necesario importar sedimentos de fuentes externas para poder mantener el balance sedimentario (Semarnat, 2013). En zonas circunvecinas a la infraestructura de puertos o marinas se recomienda la reconstrucción y fijación de dunas para evitar en lo posible el azolvamiento (Moreno-Casasola, Martínez y Castillo-Campos, 2008). Una vez que se han eliminado o controlado los factores de perturbación, se pueden iniciar las acciones de restauración (Vargas, 2011a).

1.2 Limpieza previa de la zona a restaurar

Antes de comenzar cualquier actividad de restauración, es necesario cerciorarse de que el área donde se sembrarán las plantas y sus alrededores se encuentren libres de basura como envases plásticos, vidrio, cartón, aluminio y cualquier otro residuo inorgánico. Los restos de sargazo y pastos marinos que llegan a la playa no deben considerarse desechos, ya que constituyen un aporte de materia orgánica, nutrientes y sedimentos que se pueden aprovechar en cantidades manejables para facilitar el establecimiento de diversas especies vegetales. Sin embargo, para que esto sea posible, los residuos orgánicos deben pasar por un proceso de secado colocándolos lejos de la zona con influencia húmeda e integrarlos paulatinamente en las dunas costeras.

1.3 Remoción de especies exóticas, invasoras y/o parásitas

Es importante erradicar progresivamente la vegetación exótica, en especial, la invasora, tanto a nivel de planta como semillas, hasta su desaparición total. Las especies parásitas, aunque en algunos casos sean nativas, también requieren ser erradicadas, lo que puede realizarse mediante métodos físicos como la extracción directa y total de la planta de forma manual y selectiva. Los residuos generados por tal remoción deben ser manejados con extremo cuidado; se recomienda triturar ese material y posteriormente someterlo a solarización por varios días hasta asegurar la muerte de todas las estructuras o propágulos que puedan invadir el área.

También es necesario dar mantenimiento constante al área para retirar especies invasoras (principalmente pastos) que pueden llegar a establecerse nuevamente, con el fin de evitar la competencia por recursos como agua, nutrientes y espacio. En ocasiones, antes de removerlas, es necesario rescatar especies nativas mediante actividades de recuperación. Esto se debe hacer

en el periodo del día en que hay menor intensidad de los rayos del sol. Durante el rescate de plantas nativas, éstas se deben hidratar colocándolas preferentemente en una hielera con agua dulce, limpia y fresca, a la sombra. Posteriormente, deben ser trasplantadas y cuidadas en el vivero hasta la etapa de revegetación.

Para eliminar las especies invasoras, se puede considerar su tipo de crecimiento y realizar las siguientes acciones:

- **Herbáceas invasoras.** Posterior al rescate de las plantas nativas, se deben remover las herbáceas invasoras. En áreas muy invadidas (superior a 50% de cobertura) se recomienda utilizar la técnica de barrido, la cual consiste en el deshierbe manual y selectivo, en combinación con la poda de las hierbas con la ayuda de una desbrozadora, para posteriormente rastrillar y limpiar las estructuras restantes.

- **Arbustos invasores.** Para retirar arbustos con un tamaño entre 1 m y 2 m, se deben realizar cavados de mínimo 30 cm a 50 cm de profundidad utilizando pico y pala redonda para la remoción del sustrato a pie del tallo y, con la ayuda de una barreta, retirar todas las raíces principales y secundarias de las plantas.

- **Árboles invasores.** Para eliminar árboles por arriba de los 3 m de altura, se requiere el uso de equipo de uso rudo como moto-sierras para cortar la parte aérea, y pico, pala y barreta para el retiro de las raíces.

Sólo en casos excepcionales en donde la erradicación manual no sea exitosa, podría considerarse la aplicación de *herbicidas autorizados por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris)* (p. ej., Saflufenacil, Cletodim, Garlon), aunque eso podría aumentar los costos del proyecto, los riesgos a la salud y la contaminación de suelos o manto freático si no se manejan con responsabilidad (véase la sección "Anexo" sobre medidas de seguridad durante las labores de restauración).

Existen cuatro especies exóticas, invasoras y/o parásitas encontradas frecuentemente en las dunas costeras de Yucatán y Quintana Roo, las cuales deben ser erradicadas con el fin de recuperar estos ambientes naturales (Tabla 3).

Tabla 3. Especies exóticas, invasoras y/o parásitas comunes en la costa de Yucatán y Quintana Roo

Nombre científico: *Cocos nucifera*
Nombre común: cocotero
Especie exótica e invasora



Fotografía: Vanessa Francisco

Cocos nucifera es una especie nativa de Melanesia y el sudeste asiático (Chan y Elevitch, 2006; USDA-ARS, 2014), por tanto, es considerada una especie exótica para el Caribe. Debido a su exitosa capacidad de colonización, ha invadido muchos ecosistemas insulares y costas tropicales y subtropicales de todo el mundo (Chan y Elevitch, 2006; Orwa *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2010). Al ser una especie naturalizada, de importancia económica y fuente de alimento para la población, su remoción puede ser reconsiderada. Sin embargo, no se recomienda promover su siembra o reproducción como especie de restauración, ya que, cuando es dominante, puede tener impactos negativos al reducir la biodiversidad nativa, modificar el régimen de nutrientes y de sucesión natural del suelo (Kairo *et al.*, 2003; Young *et al.*, 2010; Oviedo-Prieto *et al.*, 2012).

Nombre científico: *Scaevola taccada*
Nombre común: lechuga de playa
Especie exótica e invasora

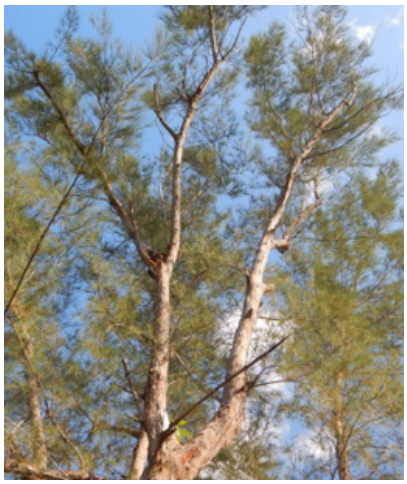


Fotografía: Vanessa Francisco

Scaevola taccada es una especie nativa de las costas tropicales y subtropicales a lo largo del océano Índico, China. En el Caribe se ha convertido en una especie altamente invasora (Acevedo-Rodríguez y Strong, 2012). Coloniza las dunas y compite con la vegetación costera nativa y otras especies en peligro crítico y vulnerables (Burton, 2008). Es considerada bastante competitiva y puede formar rápidamente matorrales extensos monoespecíficos que pueden llegar a impedir el acceso de las tortugas marinas a las zonas de anidación.

En los sitios donde esta especie está presente es necesario eliminarla de forma gradual y sustituirla por especies nativas, como la baya de playa o chunup (*Scaevola plumieri*), o por otras especies como uva de playa (*Coccoloba uvifera*), tabaquillo (*Suriana maritima*), lirio de playa (*Hymenocallis littoralis*), lavanda de mar (*Tournefortia gnaphalodes*), riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), frijol de playa (*Canavalia rosea*), margarita de mar (*Ambrosia hispida*) y verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*).

Nombre científico: *Casuarina equisetifolia*
Nombre común: casuarina, pino australiano, pino de playa, pino de mar (Nee, 1983)
Especie exótica e invasora



Fotografía: Vanessa Francisco

Es una especie nativa de Australia, Malasia y Polinesia. En el Caribe se ha convertido en una especie invasora (Rentería, Atkinson y Buddenhagen, 2007; Blancas, Rubio y Santos, 2011). Una vez establecida, altera radicalmente la luz, la temperatura y la composición química del suelo del hábitat costero, desplazando e inhibiendo el crecimiento de otras especies de plantas y destruyendo el hábitat de insectos y otros animales. También se ha reportado que puede causar problemas respiratorios y reacciones alérgicas a seres humanos (Rentería, Atkinson y Buddenhagen, 2007). En México se ha encontrado que aumenta las tasas de erosión del suelo, resultado de la exclusión de suelos nativos estabilizadores; además, compite con las plantas nativas y reemplaza las comunidades naturales de plantas (Potgieter, Richardson y Wilson, 2014).

Nombre científico: *Cassytha filiformis*
Nombre común: fideo de monte, bejuco de fideo
Nombre en maya: *k'an le' kay*
Especie parásita



Fotografía: Vanessa Francisco

Cassytha filiformis es una especie nativa parásita que penetra en el tallo de especies parasitadas y absorbe sustancias nutritivas de la planta hospedera, causando asfixia y sombra a su huésped. Esta especie invade dunas pioneras y de matorral. Sus semillas se trasladan por corrientes marinas y por dispersión de aves que se alimentan de sus frutos (Hernández-Mendoza *et al.,* 2020).

1.4 Modificación y/o remoción de estructuras sobre las dunas costeras

La presencia de infraestructura (p. ej., palapas, torres salvavidas, regaderas y sanitarios, área de barbacoa y/o fogata, bar de playa, cercos de madera, etc.) sobre el ecosistema de playa y dunas interrumpe el transporte de sedimentos inducido por el viento y el oleaje de tormentas, además del crecimiento de la vegetación (Silva *et al.*, 2012). La infraestructura evita la consolidación y regeneración natural de las dunas y puede generar procesos de erosión (Semarnat, 2013) debido a que altera su dinámica

natural en áreas con cimientos de construcción y muros corridos asentados completamente sobre el suelo. En este caso, tales estructuras deben ser removidas o sustituidas por estructuras abiertas y elevadas que permitan el transporte de sedimentos.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, la infraestructura establecida es permanente (p. ej., hoteles, muros de concreto, restaurantes de playa, piscinas, etc.) y se encuentra asentada sobre las dunas generando cambios en su estructura y función. Los efectos que tiene la presencia de estas construcciones y, en consecuencia, en la recuperación de las zonas, pueden variar dependiendo de la ubicación (p. ej., sobre la duna primaria, sobre el matorral de duna, etc.) y como esté dispuesta (p. ej., asentadas sobre la duna o elevadas en pilotes, etc.).

2. Recuperación topográfica y estabilización de la duna

2.1 Recuperación de la morfología de la duna con estrategias naturales

En áreas muy degradadas puede ser necesario recuperar la morfología de la duna, en la que es importante considerar las características originales o remanentes del sistema (forma, tamaño, pendiente y ubicación de la duna), la disponibilidad de arena y las condiciones de los patrones de viento. En caso de existir un aporte natural y suficiente de arena, se pueden instalar sistemas pasivos de captación que disminuyen la velocidad del viento sin interrumpir por completo el flujo (Moreno-Casasola, Martínez y Castillo-Campos, 2008). Éstos podrían tener un impacto paisajístico en el sitio, pero pueden ser muy eficientes para acumular arena y son temporales.

2.1.1 Captadores pasivos de arena

Los captadores pasivos son estructuras tipo empalizadas que obstaculizan el movimiento de la arena transportada por el viento para que ésta se detenga al impactar en ellas y se deposite acumulándose de manera gradual (Lithgow *et al.,* 2014). Se utilizan generalmente cuando no hay vegetación en el área de interés o se encuentra alterada; sustituyen temporalmente la función natural que la vegetación pionera ejerce en la formación de dunas (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007). Este tipo de sistemas es frecuentemente utilizado en proyectos de restaura-

ción debido a su bajo costo, su eficiencia en la retención de sedimentos y su fácil construcción. Los captadores pasivos forman dunas más heterogéneas que los sistemas dunares construidos con maquinaria, ya que la acumulación de arena responde a la acción del viento sobre las estructuras, lo que favorece el establecimiento de diferentes especies de plantas. Para hacer uso de ellos debe existir un conocimiento previo sobre la dinámica sedimentaria de la costa (si es progradante, estable o erosiva), en el que se tome en cuenta la dirección y fuerza del viento, y se identifiquen las fuentes de arena seca (Lithgow *et al.,* 2014). La eficiencia en el uso de estas estructuras depende de su porosidad, altura e inclinación, número y distancia entre las filas de captadores, así como de las características propias del sistema (velocidad del viento, tipo de arena y topografía) (Nordstrom, Lampe y Vandemark, 2000). Se recomiendan los porosos, ya que estructuras sólidas pueden producir depósitos menos estables (Ranwell y Boar, 1986).

2.1.2 Tipos de captadores de arena

Distintos materiales pueden ser utilizados para construir los captadores, que pueden ser de origen natural (Figura 9) o artificial (p. ej., redes y cercos de plástico). Los primeros tienen la ventaja de que, al ser biodegradables, no presentan consecuencias ecológicas negativas, y al descomponerse, aumentan el contenido de materia orgánica en el suelo, lo cual facilita el establecimiento posterior de la vegetación; sin embargo, también pueden presentar algunas desventajas como su poca durabilidad (Tabla 4). Por otro lado, los segundos son principalmente plásticos y suelen ser más duraderos, pero deben retirarse una vez que se haya acumulado arena (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007; Semarnat, 2013).

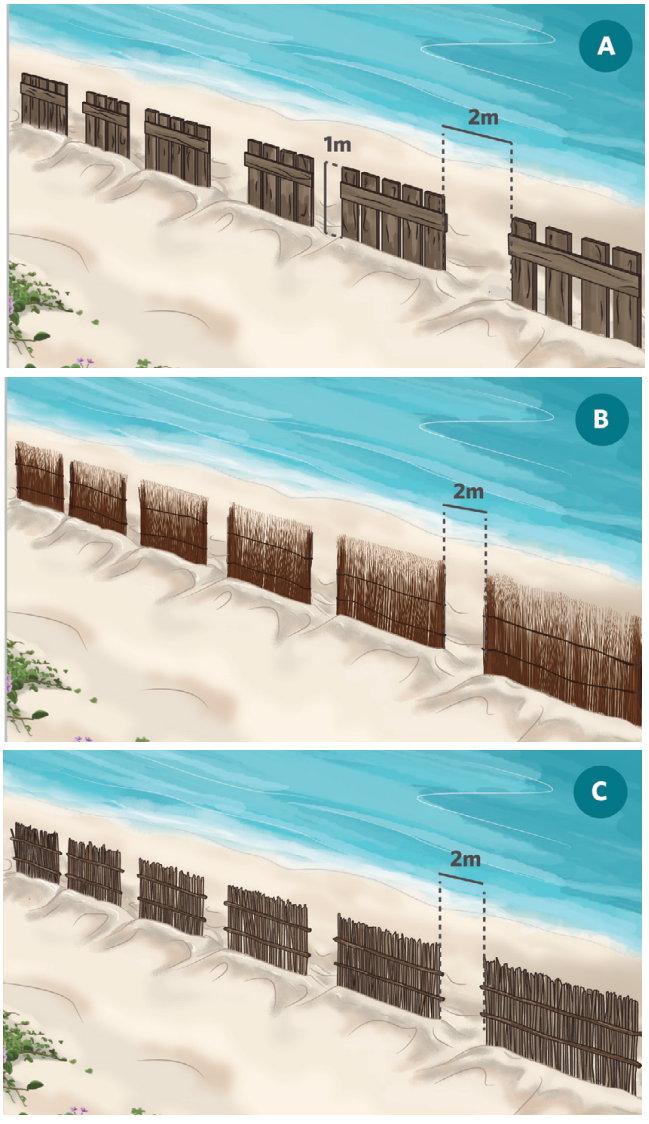


Figura 9. *Materiales naturales utilizados para fabricar captadores. A) Captador con tablas de madera; B) Captador con pasto nativo, mimbre o materiales similares; C) Captador elaborado con ramas secas. En todos los casos debe existir un espacio de entre 2 m y 3 m para permitir el paso de tortugas marinas (adultos y crías).*

Tabla 4. Ventajas y desventajas de los distintos tipos de materiales usados para construir captadores de arena

Tipo de material	Ventajas	Desventajas
TABLAS DE MADERA		
Puede ser madera reutilizada (p. ej., embarcaciones, plataformas, *pallets*, etc.). Se usan tablas de madera verticales unidas con cuerda o alambre galvanizado a tablas horizontales más estrechas.	■ Aunque son biodegradables, necesitan más tiempo para desintegrarse que otros materiales más delgados. ■ La deposición de arena ocurre tanto a barlovento como a sotavento.	■ La acumulación de arena no es constante, es mucho más irregular que en los captadores flexibles y varía dependiendo de la ubicación del cerco y de la estación del año. ■ Pueden romperse o astillarse y ser peligrosos para los usuarios de las playas. ■ La vegetación tarda un poco más en establecerse, en comparación con otros materiales.
PASTO NATIVO, MIMBRE O MATERIALES SIMILARES		
Se apilan en manojos que van amarrados con cuerda o hilo encerado o alquitranado.	■ Al ser porosos, permiten el paso lento de la arena mejor que los obstáculos rígidos. ■ Su instalación es sencilla. ■ Son más económicos que los captadores elaborados en madera. ■ Son fácilmente biodegradables, contribuyen al contenido de materia orgánica del suelo.	■ Son menos resistentes a las inclemencias climáticas (lluvia y viento). ■ Son quebradizos y duran menos que la madera.
RAMAS SECAS		
Pueden elaborarse de las ramas secas de árboles nativos de la región. Se amarran con cuerda, alambre o hilo encerado o alquitranado, y se fijan con estacas clavadas en la arena.	■ Su instalación es muy sencilla. ■ Su precio es menor que los captadores anteriores. ■ Son biodegradables, contribuyen al contenido en materia orgánica del suelo.	■ Son frágiles y duran menos que los dos anteriores. ■ Algunas ramas pueden contener espinas que podrían causar lesiones o resinas que inhiben el crecimiento de vegetación alrededor.

Fuente: elaboración propia con base en Ley, Gallego-Fernández y Vidal (2007), y Lithgow *et al.* (2014).

Los captadores de arena pueden ser de dos tipos de acuerdo con Ley, Gallego-Fernández y Vidal (2007):

Captadores estructurales. Ayudan en la formación de un nuevo cordón de dunas en zonas donde han sido removidas o severamente degradadas. Se instalan a través de diferentes filas de empalizadas paralelas y continuas, las cuales se colocan verticalmente en el suelo. En la zona central se recomienda que la distancia entre las filas sea menor para acumular una mayor cantidad de arena y replicar el perfil de la duna natural.

Captadores de apoyo. Se utilizan para apoyar la restauración en zonas donde la duna no ha sido completamente degradada. Se instalan entre la vegetación natural o las plantas sembradas mientras alcanzan su tamaño adulto, para protegerlas de la erosión eólica y la acumulación de arena. Se colocan en filas discontinuas o de zigzag dejando que el espacio entre dos captadores coincida con el de la fila siguiente.

2.1.3 Ubicación e instalación de captadores de arena

La ubicación de los captadores depende de la dinámica sedimentaria de la costa. En las playas más estables, se ubican en el mismo sitio donde se sitúan las dunas preexistentes que se pretende restaurar. En costas progradantes (terrenos ganados al mar), se colocan sobre o delante de la duna que se desea recuperar siguiendo la tendencia natural avanzando hacia el mar. Para aumentar el volumen de la duna embrionaria, se deben situar de forma paralela al pie de la duna para recoger la arena seca que procede de la playa. Para aumentar la altura del cordón de dunas, se deben alojar en la cresta de la duna. Finalmente, en costas erosivas, las estructuras deben construirse hacia el interior, después del primer frente de dunas, aunque en este tipo de costas la restauración sedimentaria se dificulta, ya que las fuentes de arena son muy escasas (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007; Lithgow *et al.,* 2014).

Los captadores de arena se deben instalar en filas paralelas separadas por 5 m aproximadamente y en zigzag. El número de filas requeridas dependerá del tamaño de la superficie a restaurar. Para instalarlos es necesario excavar zanjas de aproximadamente 60 cm de profundidad para enterrar su base, rellenando la zanja con los captadores en posición vertical y nivelando el suelo para dar mayor estabilidad. Estos sistemas deben colocarse perpendicularmente a los vientos dominantes para

acumular una mayor cantidad de arena. Su altura es variable y depende de la cantidad de arena que se mueva; en sitios con poco movimiento, se recomienda que ésta sea menor a 2 m desde la base (Grafals-Soto y Nordstrom, 2009; Grafals-Soto, 2010;). Si llegaran a enterrarse totalmente por la arena acumulada y todavía existiera la necesidad de aumentar el tamaño de la duna, se recomienda colocar una nueva línea. Finalmente, si la duna ha alcanzado la altura deseada, se debe sembrar vegetación nativa para su estabilización y consolidación (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007).

Es importante no colocar los captadores en extensiones muy grandes ni durante la temporada de anidación de las tortugas marinas, ya que pueden obstaculizar su paso. En la PY, el periodo de mayor anidación generalmente ocurre entre los meses de mayo y septiembre.

2.2 Recuperación de la morfología de la duna con estrategias no naturales

2.2.1 Estrategias de recubrimiento

Consiste en cubrir el suelo con materiales preferentemente de origen natural que aumentan los nutrientes del sedimento; también pueden utilizarse materiales de plástico biodegradables. El recubrimiento reduce la erosión del viento sobre las zonas restauradas, mantiene la humedad y regula la temperatura del sustrato. Debido a su efecto protector contra el viento, resulta útil en las primeras fases de establecimiento de la vegetación, cuando ésta no se ha desarrollado lo suficiente como para estabilizar el sistema. Aunque atrapan cierta cantidad de arena, no es bastante como para modificar la topografía, y su efecto protector no permite que las plantas queden enterradas. Los recubrimientos se pueden realizar con materiales de diverso origen orgánico o inorgánico, como pasto, restos de poda, plástico biodegradable, etc. El mulch (acolchado o cubresuelos) es un tipo de recubrimiento protector de origen orgánico e inorgánico, que puede alterar las características del substrato arenoso y limitar la capacidad de colonización de las especies nativas, por lo que su uso no es muy recomendado, además de su alto precio, y se restringe a zonas muy puntuales sin vegetación natural, como playas urbanas con problemas erosivos (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007).

2.2.2 Estructuras artificiales y maquinaria

Actualmente, en algunas playas y dunas de la PY se realizan obras para intentar proteger la costa mediante la construcción de montículos, rellenos del sistema playa-duna o estructuras para mitigar la ener-

gía del oleaje y, con ello, su impacto erosivo (p. ej., tubos geotextiles). Todo ello requiere del uso de arena proveniente de zonas aledañas y de maquinaria pesada (p. ej., retroexcavadoras), que pueden generar un gran impacto ambiental. Este tipo de obras *no son las más recomendables y sólo deben llevarse a cabo cuando existe un importante riesgo para la población humana o para la infraestructura de interés público*, p. ej., tras el embate de una tormenta o un huracán que haya generado la desaparición total o parcial del cordón dunar. Posteriormente deben retirarse para hacer una recuperación adecuada (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007; Semarnat, 2013).

Para hacer uso de cualquiera de estas estructuras es necesario llevar a cabo estudios a fin de conocer las características ambientales que permiten el transporte de arena en la zona seca y sumergida (viento, oleaje, corrientes, niveles de la superficie libre del agua, batimetría, geomorfología, estratigrafía, sedimento, etc.), además de la orientación de la costa y la dinámica del perfil de duna a lo largo del año. Para la instalación de estructuras artificiales y el uso de maquinaria pesada, se requiere la autorización de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) y de la Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros, ambos por Semarnat. La MIA sirve para analizar el impacto causado por la modificación del hábitat natural, la calidad del agua y el transporte de sedimentos.

Los tubos geotextiles, llamados también geotubos, han sido frecuentemente utilizados en la construcción de dunas artificiales y la protección contra la erosión. Estas estructuras se colocan de forma paralela a la costa, con una separación adecuada de la playa (*que depende de un análisis previo y puntual para cada sitio*), lo cual permite su efectividad al reducir la velocidad de la corriente y favorecer el depósito de arena sin interrumpir su flujo. Cuando estos dispositivos son ubicados de manera inadecuada, pueden causar daños ambientales graves al eliminar el hábitat natural y alterar la circulación y el transporte de sedimentos a hábitats adyacentes (Martin *et al.,* 2005; Chapman y Underwood, 2011). Asimismo, durante las tormentas pueden romperse y desplazarse, causando daños a la infraestructura costera (World Bank Group, 2016; Kilfoyle, 2017).

Algunos ejemplos de proyectos que hicieron uso de este tipo de estructuras son:

Dunas artificiales en el Hotel Grand Velas, Riviera Maya, Quintana Roo. Emplearon tubos geotextiles (bolsacreto) rellenos de concreto (Figura 10), con el objetivo de construir una barrera de protección en caso de tormenta extrema; se colocaron en la playa formando una línea continua de 600 m paralela a la línea de la costa y delante de la propiedad. Fueron cubiertos de arena para formar una duna artificial, la cual fue revegetada con especies nativas (*Tournefortia gnaphalodes*, *Coccoloba uvifera*, *Ipomoea pes-caprae*, *Thrinax radiata*, *Hymenocallis littoralis*) y especies exóticas (*Cocos nucifera*), con el fin de estabilizar la arena transportada por el viento y fijar la duna con las raíces de las plantas (Figura 11) (López, 2014; Timpson y Stephens, 2018). Después de cinco años de iniciado el proyecto, el litoral de esta zona tuvo una recuperación de 20 metros.



Figura 10. *Colocación de tubos geotextiles (geotubos) en el año 2006 frente al Hotel Grand Velas, Riviera Maya. Fuente: López (2014) y Timpson y Stephens (2018).*



Figura 11. *Vista de dunas artificiales frente al Hotel Grand Velas, Riviera Maya (2022). Fotografías: Gabriela Mendoza.*

Dunas artificiales en Las Coloradas, Yucatán. Reconstruyeron las dunas costeras que ofrecen protección a las charcas que producen sal junto con el mar; fueron diseñadas tomando como referencia las geoformas naturales existentes previas al evento de degradación, las cuales fueron reforzadas con un tubo geotextil (Figura 12), como el ejemplo anterior. Esto lo realizaron debido a que esta zona ha sido impactada históricamente por fenómenos meteorológicos extremos que ponen en riesgo la industria salinera local, que es considerada importante económicamente. Después de 12 años de iniciado el proyecto, las dunas costeras han sido reportadas como estables aun con los lavados naturales eventuales por embates climáticos de alta magnitud durante este periodo (AXISIMA, 2017) (Figura 13).



Figura 12. *Construcción de una duna artificial con tubo geotextil en Las Coloradas, Yucatán. Fuente: AXISIMA (2017).*



Figura 13. *Ejemplo de la recuperación de las dunas costeras con tubo geotextil realizada en Las Coloradas, Yucatán. La secuencia de las figuras 12 y 13 comprende un periodo de 12 años. Fuente: AXISIMA (2017).*

3. Restablecimiento de la vegetación nativa

Una de las causas de la desestabilización de las dunas y la movilización masiva de arena es la remoción de la cobertura vegetal de los sistemas dunares, por lo que la revegetación con plantas nativas es una de las técnicas de restauración que tiene como principal objetivo recuperar la función de protección costera (Navarro *et al.*, 2007; Secaira y Acevedo, 2017). Esto se debe principalmente a que la vegetación puede estabilizar la duna por medio de sus raíces a corto plazo, cambiar la composición y propiedades del sedimento a largo plazo, amortiguar la energía de la marea y del viento, y aumentar el tamaño de la duna (Martínez *et al.,* 2014; Secaira y Acevedo, 2017). El restablecimiento de la vegetación, de acuerdo con Martínez *et al.* (2014), se puede dar de dos maneras:

- Por revegetación, la cual tiene que ver con a la introducción de especies herbáceas al sistema, y
- Por reforestación, que se refiere a la introducción de especies leñosas.

En ocasiones, la recuperación de la vegetación requiere una mínima intervención, ya que por sucesión natural se recupera sola en semanas o meses, por lo que no se necesita riego, ni fertilizantes, sino únicamente evitar el pisoteo por parte de personas o animales en el área mediante letreros informativos y algún sistema de protección (Martínez *et al.,* 2014). En este tipo de intervención es necesario considerar mantener todas las especies nativas de las dunas costeras y eliminar malezas (principalmente pastos) y otras especies invasoras o exóticas (Ley, 2012).

El restablecimiento de la vegetación nativa es una técnica de siembra de plantas que originalmente se distribuyen en el ecosistema de la región (Figura 14), con la que se busca recuperar la cobertura vegetal original que ha sido removida y que trae como consecuencia principal la desestabilización de la duna (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007). Estas plantas se caracterizan por ser resistentes a factores ambientales extremos, que se encuentran de manera natural en la zona: alta salinidad, estrés por agua, alta radiación solar, enterramiento por arena, aridez, altas temperaturas y poca disponibilidad de nutrientes (Espejel, 1992; Maun, 2009). No obstante, es importante su cuidado inicial posterior a ser sembradas, ya que si provienen de un vivero, necesitan aclimatarse a su nuevo ambiente para poder establecerse. Para lograr esto, se

recomienda el cambio paulatino del sitio de propagación al de destino final (p. ej., si en el vivero fueron propagadas a la sombra, se recomienda pasarlas a un espacio con mayor influencia solar, de manera gradual, hasta lograr las condiciones ambientales similares a las del destino final de restauración). Si presentan tallos frágiles, es conveniente sujetarlos a un soporte de madera o utilizar un tubo corrugado para protegerlos al momento de sembrarlas y hasta su establecimiento.



Figura 14. *Siembra de plantas nativas en la duna costera de Puerto Morelos, Quintana Roo. Fotografías: Calina Zepeda (A, B y D) y Luis Guillermo (C, E, F, G, H e I).*

3.1 Verificación de la limpieza de la zona a restaurar

En la sección "Eliminación o control de las fuentes de degradación" del Capítulo III, se menciona la limpieza previa de la zona a restaurar. Antes de comenzar el restablecimiento de la vegetación nativa, es necesario cerciorarse de que el sitio continúe limpio, pues mucha basura puede ser arrastrada por el mar de manera recurrente. Esta es una actividad permanente para mantener y asegurar el éxito de un proyecto de restauración.

3.2 Obtención o producción de plantas de dunas costeras

Cuando no se tiene un proveedor de plantas de dunas costeras en la misma zona que se restaura para ser utilizadas en el restablecimiento de la vegetación, se debe considerar reproducirlas. En esta sección se indican acciones para ello, lo que requiere el establecimiento de un vivero; la gestión de permisos de colecta; la colecta *per se* de semillas, esquejes o estacas, y la propagación de las especies. El proceso concluye con la preparación del sitio de siembra y el trasplante.

3.2.1 Establecimiento del vivero

Un vivero es el lugar destinado para la producción y el cuidado de plantas que son utilizadas para el restablecimiento de la vegetación nativa, un programa de reforestación o revegetación. Debe contar con espacios destinados a la realización de cada una de las siguientes actividades:

- Almacenamiento, preparación de sustratos y llenado de bolsas.
- Germinación de plantas (provistas de camas semilleros, charolas o contenedores para esa finalidad, con una profundidad no menor a 10 cm).
- Limpieza y selección de semillas colectadas en el medio silvestre.
- Área de crecimiento para las plantas.
- Suministro de agua (por almacenamiento o toma de agua potable).
- Deposición de residuos orgánicos de podas, deshierbe y otros.
- Bodega para guardar materiales de trabajo (herramientas, equipos, insumos).
- Espacio seco y sin humedad para resguardar las semillas.
- Área para el personal del vivero: descanso o cambio de ropa, mesa o comedor, y acceso a sanitarios.

Para la producción de vegetación de dunas costeras, se recomienda la construcción de un vivero lo más cercano al área a revegetar, ya que las condiciones del lugar permiten la aclimatación de las plantas a su sitio final. Es importante considerar que éstas requieren de mucha exposición a la luz solar para desarrollarse adecuadamente.

Considerando el modelo de un vivero forestal (Luna Gómez *et al.,* 2011), y adaptado a la práctica en la producción de plantas de dunas costeras, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Tamaño del vivero.** Dependerá del número de ejemplares a producir, el financiamiento y el personal disponible para su atención. Necesita contar con espacio para camas de germinación, producción de plantas en bolsa, área de llenado de éstas, almacenamiento de sustrato y preparación, y pasillos de 70 cm a 80 cm aproximadamente para la circulación de personas con carretilla o con herramientas. Un área de 15 m x 15 m (245 m^2) puede albergar de 6 000 a 10 000 especies, sin considerar los espacios adicionales descritos anteriormente.

  Las camas de germinación pueden hacerse con cajones de madera, charolas de plástico o aluminio colocados sobre el suelo o mesas. Éstas deben considerar el drenaje de agua en temporada de lluvias para evitar el arrastre de sustrato; se recomienda 1 m de ancho (como distancia óptima de manejo con las manos, sin perder el equilibrio) por el largo deseado.

  El espacio destinado para preparar las bolsas con sustrato debe ser techado para protegerlo de lluvias, y se recomienda cubrir el sustrato preparado con lonas o bolsas para evitar que se deslave. Se sugiere usar bolsas de polietileno de 15 cm x 15 cm, calibre 300 y 400, considerando que el tiempo de desarrollo de una planta podría ser de entre tres a seis meses. Para el caso de especies que requieren más tiempo, se deberán contemplar bolsas más grandes para su trasplante gradual. También pueden usarse envases de refresco reciclados y limpios, cortados de la boquilla y perforados en el fondo para permitir el drenaje.

- **Disponibilidad de agua.** El suministro del vital líquido debe estar disponible durante todos los meses que dure el proyecto, puede ser a través de una toma fija de agua potable o de un sistema de almacenamiento de agua pluvial. En temporada de secas, aproximadamente se utilizan entre 4 000 a 5 000 litros por semana para el riego de 10 000 plantas. Si no se cuenta con una fuente de agua en el sitio, se debe transportar en pipas y planear el acceso y su almacenamiento. También se puede considerar el uso de algunos materiales como el hidrogel, la perlita o vermiculita (o agrolita), que retienen la humedad en el sustrato por mayor tiempo y reducen la

necesidad de riego debido a que almacenan agua y nutrientes que quedan disponibles en el sustrato, en beneficio de la planta. Estos materiales no representan costos elevados y se pueden comprar en bultos de varios kilos en tiendas tanto de jardinería como de agroquímicos.

- **Topografía del terreno.** Preferentemente colocar el vivero en un sitio elevado, donde no haya pendientes, para evitar inundaciones o el desplazamiento de suelo durante las lluvias.

- **Microclima del sitio.** Con disposición de luz directa la mayor parte del día. Dado que pueden ocurrir ráfagas de viento, es recomendable contar con una barrera (edificio o cortina de vegetación) para disminuir la velocidad del viento.

- **Accesos para transporte de plantas.** El vivero debe instalarse cerca de una entrada vehicular para la carga y descarga de materiales (suministro de agua por pipa, descarga de sustratos, traslado de plantas, etc.) y para la movilización de la producción.

- **Malla sombra o cubierta para bajar la luminosidad.** Es recomendable para evitar la pérdida de agua y proteger las plantas en proceso de trasplante o germinación, las cuales podrían ser sensibles a la radiación. Existe una disponibilidad de mallas de diferentes tipos y precios, o pueden utilizarse otros materiales similares que cumplan el mismo propósito.

- **Herramientas y equipos para vivero.** Se deben contemplar materiales para diversas actividades del vivero, como herramientas (rastrillo, palas, carretillas, cubetas de plástico, guantes, tijeras estaqueras, mangueras); insumos (bolsas de polietileno para vivero, bolsas de rafia para colecta de semillas, bolsas de papel para resguardo de semillas); materiales para limpieza de semillas (mallas de criba, coladores de malla, charolas, contenedores), y recipientes para siembra (sembradores, charolas de germinación).

- **Personal para atención del vivero.** Se requiere mínimo de dos personas para el manejo diario del vivero, con el fin de realizar las actividades de mantenimiento: riego, poda, deshierbe, trasplante, repique, limpieza y demás actividades que permitan el crecimiento adecuado de las plantas.

3.2.2 Colecta y manejo de semillas y esquejes

Una vez definidas las especies y cantidades de ejemplares a producir, se recomienda considerar lo siguiente:

- **Ética y legalidad de la colecta.** Es primordial que durante la colecta de semillas no se ponga en riesgo el equilibrio de las poblaciones naturales. Se debe recoger máximo 20% de semillas o frutos por ejemplar (Di Sacco *et al.* 2020). De igual manera, durante la obtención de esquejes y estacas es fundamental no dañar la

integridad de la planta madre siendo cuidadosos con los cortes. Para la colecta de cualquier parte de la planta, por disposición oficial debe obtenerse el permiso denominado "Colecta de germoplasma forestal para reforestación y forestación con fines de conservación o restauración" ante la Semarnat. Además, si algunas de las especies de interés se encuentran bajo alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010, es obligatorio obtener el permiso llamado "Licencia de colecta científica con propósitos de enseñanza en materia de vida silvestre" ante la secretaría mencionada.

- **Colecta de semillas.** En caso de no contar con la adquisición de semillas por medio de proveedores, viveros, donaciones u otro medio de legal procedencia, la colecta en el medio silvestre debe contar con los permisos de las autoridades correspondientes. Las prácticas recomendadas para ello son:

  - Seleccionar individuos sanos y vigorosos en la misma localidad de restauración y colectar semillas de mínimo 15 individuos diferentes de plantas para obtener variación genética.

  - Comúnmente se colecta de la planta madre, pero hay algunas especies, como *Canavalia rosea* e *Ipomoea pes-caprae*, que tienen un alto porcentaje de germinación cuando son recogidas del suelo. En este caso, se recomienda revisar que no estén parasitadas, ya que pierden su viabilidad y pueden contaminar a otros ejemplares. Esto se puede realizar en el sitio mediante una prueba, cortanto de 10 a 20 semillas para verificar que los embriones tengan un color claro y se vean turgentes y firmes. Semillas con embriones claros y turgentes se podrían considerar viables. Se debe considerar que algunas plantas de dunas costeras tienen frutos con distintas etapas de maduración, como el caso de *Cordia sebestena*, que presenta un racimo de frutos de diferentes tamaños, del que se recomienda sólo colectar los maduros y dejar el resto para que termine su maduración en la planta.

  - Todas las semillas deben transportarse en bolsas de papel, rafia o tela para evitar su pudrición, cada especie en una bolsa diferente. No se recomienda utilizar una misma bolsa para diferentes especies, ni el uso de bolsas de plástico.

  - Llevar una bitácora de campo para el control de la colecta indicando la especie y ubicación de las plantas madre, la fecha y el sitio. También se deben etiquetar las bolsas indicando con precisión la especie colectada, la ubicación y la fecha.

  - Colectar semillas de una o dos especies en cada salida para facilitar la producción por lotes programados y un manejo más eficiente y sencillo.

  - Considerar que algunas plantas, como *Pithecellobium keyense*, presentan

muchos frutos de vaina, pero con pocas semillas disponibles. De un costal de vainas sólo se obtiene un puño de semillas.

- La colecta de semillas maduras (no verdes) se puede lograr planeando la colecta durante la temporadda de dispersión natural de las especies. Generalmente en las dunas costeras de la PY, esta dispersión tiende a suceder durante la temporada de secas.

- **Extracción de semillas**

  - Las de los frutos secos se extraen manualmente o moviendo éstos (vainas o cápsulas) y se resguardan en bolsas de papel.

  - Las de los frutos carnosos se obtienen sumergiendo el fruto en agua para lavarlo y separar la pulpa. Se recomienda el uso de una criba o colador de tela hasta obtener sólo las semillas.

  - Una vez extraídas las semillas del fruto deben ponerse sobre una criba o un colador de tela en un espacio sombreado y bien ventilado.

  - Una vez listas, se colocan en bolsas de papel. Es importante etiquetarlas o rotularlas todas para tener un buen control.

- **Almacenamiento de semillas.** Se recomienda utilizar las semillas colectadas lo antes posible debido a que son sensibles a la humedad. Si no se cuenta con los medios adecuados para su almacenamiento a temperatura fría durante periodos largos, existe la posibilidad de perder el material colectado.

- **Tratamiento de semillas para siembra.** Algunas no germinan inmediatamente a pesar de tener buena humedad y temperatura, ya que presentan un estado de letargo o latencia; para romperlo es necesario aplicar algunos tratamientos con el fin de que logren germinar. A continuación se presentan algunos ejemplos:

  - Las leguminosas, como *Canavalia rosea*, tienden a hincharse y germinar entre tres y cuatro días después de haber sido sumergidas en agua entre 12 y 24 horas. Otra opción es realizar una pequeña muesca como proceso de escarificación mecánica.

  - En el caso de semillas más duras, como las de *Scaevola plumieri*, se recomienda sumergirlas en agua caliente por 15 segundos para ablandarlas.

  - Para el caso de semillas más grandes y duras, como *Chrysobalanum icaco*, se sugiere una escarificación mecánica (Figura 15) que rompa o fracture su cubierta y permita la entrada de agua para que germine. En estos casos se aconseja usar una navaja o lija para madera, con el fin de raspar la cubierta de la semilla del lado opuesto al que sale la raíz.



Figura 15. *Semillas de* Chrysobalanum icaco *en proceso de escarificación mecánica con lija de madera. Fotografía: Dalia Hoil.*

3.2.3 Producción de plantas

- **Preparación de sustratos.** Se recomienda colectar el sustrato directamente del sitio que se desea restaurar, de preferencia del matorral de dunas costeras cerca de árboles y arbustos maduros, ya que ahí es donde se puede encontrar una buena cantidad de nutrientes y micorrizas (asociaciones entre hongos y plantas, cuya importancia se explica más adelante), los cuales ayudan al desarrollo y el establecimiento de las plantas. Para preparar el sustrato, se sugiere hacer una mezcla de tierra vegetal y arena colectada, a la que se puede añadir una fracción *no mayor a 30%* de sargazo y/o pasto marino; si se usa demasiado, la planta podría pudrirse. De igual manera, se puede usar únicamente arena como sustrato, pero es más susceptible al movimiento y se desmorona durante el trasplante, por lo que dificulta su transportación y manipulación. La mezcla de 70% de tierra vegetal y 30% de arena facilita el manejo durante la movilización y el trasplante. También se pueden utilizar pastillas de pellets (sustrato comprimido) para la retención de humedad, las cuales tienen una capacidad estimada de 500 plantas en una charola de 40 cm x 100 cm, por lo que reduce considerablemente el espacio necesario; son muy útiles para algunas especies como *Sideroxylon americanum* y *Scaevola plumieri*. Éstas se acomodan dentro de cajas de madera con un fondo de malla para mantener la aireación y evitar la acumulación de agua. Este diseño es de fácil elaboración.

- **Preparación de lotes para la siembra.** Los semilleros o bolsas se deben colocar en lotes. Un lote facilita la contabilidad de la producción en hileras de 10 x 100 bolsas para obtener uno de 1 000 plantas de una sola especie. Es posible acomodar algunos más pequeños según se facilite su manejo (de 500 individuos o menos, pero en números pares). Los semilleros y bolsas deben quedar preparados con los sustratos seleccionados antes de salir a colectar las semillas.

- **Germinación de semillas y siembra.** La viabilidad de las semillas varía dentro de las poblaciones, por lo que se aconseja hacer una selección descartando las que estén dañadas o parasitadas. Se sugiere germinar las más pequeñas en camas de semilleros o charolas con una profundidad mínima de 10 cm

para facilitar su manejo. Con un lápiz o palito se marca una línea a lo largo del sustrato de los semilleros con profundidad de dos a tres veces el tamaño de las semillas, y se colocan linealmente para cubrirlas con el mismo sustrato. El semillero debe estar húmedo para facilitar la colocación de las semillas. Luego de situarlas, se debe humedecer nuevamente con un aspersor con salida de agua muy fina para evitar que se expulsen del sitio. Es recomendable germinar las más grandes directamente en la bolsa, colocando dos o tres para garantizar el proceso. Una vez que hayan brotado, se selecciona la planta más vigorosa. Finalmente, para colocar la semilla, se recomienda el uso de un sembrador (palo rollizo de 1" de diámetro con punta) para abrir un agujero y facilitar su instalación a una profundidad de dos a tres veces su tamaño; éste puede ser fabricado con un pedazo de madera de escoba con punta de 15 cm de largo. Para el caso particular de *Hymenocallis littoralis*, la semilla se coloca horizontalmente sobre la superficie del sustrato, no se entierra; así, germinará en esa posición y posteriormente se sumergirá en el sustrato.

- **Trasplante.** También conocido como repique, es el proceso en el cual las especies ya germinadas en semilleros se traspasan a bolsas de vivero para que continúen su crecimiento. Esto sucede cuando alcanzan de 4 cm a 5 cm de altura o cuando tienen la segunda generación de hojas verdaderas de las plántulas. Para facilitar la extracción de raíces, se sugiere humedecer previamente el sustrato y extraer con sumo cuidado evitando romper las raíces. Las bolsas adonde se transferirán las plántulas para su crecimiento deben tener dos perforaciones que permitan el drenaje de agua y la aireación, las cuales se deben hacer preferentemente antes del relleno de sustrato. Una vez rellenadas, se humedece el sustrato y se abre un agujero con un sembrador para introducir la plántula; se cubre la planta con más sustrato y se riega posteriormente. El proceso es similar cuando el ejemplar ha crecido en la bolsa de vivero y es necesario hacer un trasplante a otra bolsa de mayor capacidad; en este caso, se pueden cortar las raíces con una tijera para evitar que se enreden en el tallo.

- **Propagación de plantas por esquejes o estacas.** Es otro método para la producción de especies que utiliza la capacidad de la reproducción vegetativa o asexual. Para ello, se obtienen segmentos de la planta de 15 a 20 cm de largo, los cuales se introducen directamente en las bolsas con sustrato. Los cortes deben hacerse por debajo de los "nudos" que presentan los tallos o las ramas para que prosperen. En algunos casos se utilizan enraizadores para facilitar el proceso de establecimiento. Una vez colocadas las estacas en las bolsas, éstas no deben moverse por lo menos en un mes para evitar el desprendimiento de las raíces nuevas.

- **Endurecimiento.** Después de dos a tres meses en el área de malla sombra, se deben trasladar los ejemplares a un espacio aledaño para que reciban mayor luminosidad, se desarrollen adecuadamente y se aclimaten a su entorno.
- **Mantenimiento.** Las plantas producidas requieren cuidado intenso. Esto involucra riego, deshierbe, poda, desplazamiento de plantas, remoción de hierbas muertas y limpieza, entre otras acciones necesarias para el manejo de la producción.

3.3 Trasplante de vegetación en la zona de restauración

Al momento de trasplantar la vegetación a su destino final, se deben retirar las bolsas plásticas donde las plantas han sido propagadas; esto debe hacerse con mucho cuidado para evitar que el sustrato que rodea las raíces se desmorone. Para esto, se recomienda regar los ejemplares dos días antes del trasplante para que el sustrato esté aglutinado. Para el trasplante se sugiere excavar una poceta de 5 cm (mayor al diámetro de la bolsa que contiene las raíces), y al sembrar se debe tocar la pared contraria a la dirección de la pendiente. En esta etapa se puede integrar materia orgánica dentro de la poceta; ésta puede contener una mezcla de arena con pasto marino o sargazo, previamente tratado mediante la técnica de solarización. Finalmente, se aconseja rellenar la poceta con arena húmeda y comprimirla con moderación para brindar sostén a la planta recién sembrada. Se propone el uso de hidrogel, perlita o vermiculita (o agrolita) para asimilar el agua y los nutrientes, y reducir la necesidad de riego. El agua con la que se hidratan estos materiales debe ser dulce, pues la salada disminuye su capacidad de absorción y puede afectar a la planta. Inmediatamente después del trasplante se debe regar con agua dulce la vegetación recién sembrada, lo cual debe repetirse cada dos días en horarios con baja radiación solar hasta que se establezcan. Posterior a ello, el intervalo entre riegos puede ampliarse de tres a cinco días de acuerdo con los requerimientos del sitio. En época de lluvias es importante considerar la precipitación para determinar la frecuencia del riego.

Se recomienda una alta densidad de plantación, ya que la mortalidad entre el trasplante y el establecimiento puede ser elevada. Una vez arraigadas las plantas, el mantenimiento se reduce considerablemente; esto puede lograrse mediante el riego adecuado, la aplicación de materia orgánica, el podado (con herramientas limpias para evitar la propagación de enfermedades) y la remoción de especies invasoras y pastos que son altamente competitivos (véase la sección "1.3 Remoción de especies exóticas, invasoras y/o parásitas").

3.4 Micorrizas

Las micorrizas son asociaciones positivas que ocurren entre las raíces de las plantas y los hongos del suelo; viven enterradas y necesitan asociarse con las raíces de las plantas para mejorar su crecimiento, reproducción y sobrevivencia. Por su lado, una planta con micorrizas tiene mayores oportunidades de adquirir agua y nutrientes del suelo, particularmente nitrógeno, el cual es muy importante en su desarrollo. Considerar esta asociación benéfica en un proceso de restauración puede facilitar el establecimiento y la sobrevivencia de la vegetación al mejorar su alimentación y la incorporación de nutrientes a los diferentes tejidos de la planta (Moreno-Casasola *et al*., 2015). Asimismo, las micorrizas favorecen el aglutinamiento del sustrato, lo que le da una mayor estabilidad al suelo, son buenas captadoras de agua, absorben nutrientes y sirven de protección contra patógenos (Ramos-Zapata, Aldana-Blanco y Guadarrama, 2017). Para que exista una mayor probabilidad de encontrarlas, se recomienda colectar el sustrato utilizado para la propagación de las plantas en un matorral de duna estabilizada con suficiente vegetación, cercano a las raíces de los árboles y arbustos maduros, que es donde ocurren en mayor proporción estas asociaciones. Es importante evitar la arena de las playas desnudas de vegetación, ya que muy probablemente no contengan micorrizas y, por el contrario, presentan una alta cantidad de sales y pocos nutrientes.

3.5 Vegetación acorde al gradiente de zonificación tierra dentro

Los ecosistemas costeros se caracterizan por ser dinámicos debido al constante movimiento y transporte de la arena por el efecto de la energía del mar y del viento (McLachlan y Defeo, 2017; Maun, 2009). Dentro de esta misma dinámica, la vegetación de las dunas costeras puede cambiar al responder a esta importante variación de los procesos geomorfológicos que ocurren en el ambiente (Gallego-Fernández y Martínez, 2011), en un gradiente tierra adentro. En el interior de las dunas costeras el sedimento se vuelve más estable y las condiciones ambientales extremas son menos estresantes para las plantas (Gallego-Fernández y Martínez, 2011). Estos cambios en el gradiente ambiental tienen efectos sobre la distribución y composición de las especies vegetales, ya que algunas son más tolerantes que otras a tales condiciones (Barbour, 1992); debido a esto, la diversidad de las plantas tiende a ser menor cerca de la playa y aumentar tierra adentro (Moreno-Casasola y Castillo, 1992; Torres *et al.,* 2010).

Para lograr el establecimiento correcto de la vegetación nativa es muy importante considerar la distribución zonal de las especies en este gradiente, es así como la vegetación de las dunas costeras se puede dividir, de manera general, en dos grandes secciones principales: la zona de pioneras y la zona de matorral (Tabla 5).

- **Zona de pioneras.** En ésta se distribuyen plantas herbáceas, perennes y anuales tolerantes a ambientes más estresantes (alta salinidad, enterramiento por arena, vientos fuertes y suelos pobres en nutrientes). Las pioneras crecen generalmente de manera postrada o rastrera, o como arbustos bajos, por lo que son de gran importancia para la retención de arena movida por el viento y el oleaje en la zona más cercana al suelo, lo que permite el mantenimiento de la morfología natural y la dinámica de la playa. Al revegetar esta área, se pueden reactivar algunos procesos y funciones de los ecosistemas, como la sucesión ecológica, lo que permite el establecimiento de nuevas especies de plantas que se reproducen y germinan naturalmente en la zona posterior donde se desarrolla el matorral (Espejel, 1992; Torres *et al*., 2010).

- **Zona de matorral.** La comunidad vegetal es más compleja, presenta el establecimiento de especies arbustivas, árboles pequeños y/o palmas, generalmente leñosos. Este tipo de vegetación es más sensible a las condiciones extremas de las dunas y, por lo tanto, el área se distingue por desarrollar suelos más estables, con ambientes menos estresantes y mayor cantidad de nutrientes para las plantas, por lo que existe una mayor riqueza y diversidad. En esta zona también se pueden encontrar algunas plantas herbáceas, las cuales son importantes y deben mantenerse durante la restauración.

Tabla 5. Ejemplos de especies nativas en la Península de Yucatán según su distribución zonal (pioneras y matorral)

Zona pionera
Margarita de mar (*Ambrosia hispida*), *Xaal* (*Cakile edentula*), frijol de mar (*Canavalia rosea*), *siis ja'* (*Euphorbia mesembrianthemifolia*), campanita de playa (*Ipomoea imperati*), riñonina (*Ipomea pes-caprae*), *chunup* (*Scaevola plumieri*), verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*), tabaquillo (*Suriana maritima*) y tabaquillo mielera o *sik'imay* (*Tournefortia gnaphalodes*).
Zona de matorral
Juluub (*Bravaisia berlandieriana*), mareña (*Caesalpinia vesicaria*), uva de playa (*Coccoloba uvifera*), *náaj k'aax* (*Coccothrinax readii*), siricote (*Cordia sebestena*), beach creeper (*Ernodea littoralis*), lirio de playa (*Hymenocallis littoralis*), orégano *xiiw* (*Lantana involucrata*), *ya'ax k'aax* (*Pithecellobium keyense*), palma *kuka* (*Pseudophoenix sargentii*), caimitillo (*Sideroxylon americanum*) y palma *chit* (*Thrinax radiata*).

3.6 Época de revegetación

La época del año más adecuada para realizar la revegetación es durante la temporada de lluvias, ya que la disponibilidad de agua aumenta el éxito de la sobrevivencia de las especies y reduce costos. Los meses recomendados para la siembra en la PY son a partir de junio y hasta mediados de noviembre, ya que generalmente la temporada de lluvias ocurre en ese periodo. Sin embargo, hay que considerar que algunos años pueden ser atípicos y presentar cambios en este régimen; en tales casos se recomienda considerar el riego artificial. La temporada de lluvias propicia una alta humedad en el ambiente y en el sustrato, lo cual facilita el establecimiento de los ejemplares sembrados, por lo que se recomienda sembrar muy temprano por la mañana o en la tarde, cuando las temperaturas son bajas, y evitar los momentos de máxima luminosidad solar (12:00 a 16:00 horas) debido a que eso implica temperaturas más elevadas que pueden estresar a las plantas. También deben evitarse días con vientos fuertes o época de *nortes* o huracanes, por lo que se aconseja revegetar iniciando la temporada.

3.7 Especies recomendadas

Se sugiere ampliamente el uso de plantas nativas. La consolidación y el crecimiento de la duna requiere especies pioneras nativas, las cuales se caracterizan por ser tolerantes a las condiciones estresantes ya mencionadas y por desarrollar raíces subterráneas capaces de retener el sedimento (Martínez y Moreno-Casasola, 1996; Maun, 1998). Estas plantas también son llamadas constructoras de dunas y suelen ser herbáceas y arbustos de talla pequeña. También se pueden desarrollar jardines en la playa utilizando especies vegetales nativas y con un diseño paisajístico estético, en que el color de hojas, flores y frutos sean atractivos. El número de ejemplares para la restauración dependerá del grado de afectación en la duna y de las dimensiones de la zona a revegetar.

4. Protección y mantenimiento de un proyecto de restauración

4.1 Medidas de protección

El paso de personas y vehículos sobre las dunas costeras provoca la destrucción de la vegetación establecida, impide el reclutamiento de nuevas plantas, ahuyenta las poblaciones de fauna, afecta la geomorfología natural y causa compactación y erosión del suelo. Esto ha sido señalado como una de las causas principales de la degradación de la cobertura vegetal (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007), por lo tanto, es necesario regularlo para reducir su impacto (NSW Department of Land and Water Conservation, 2001; Nordstrom, 2008). Un proyecto de restauración de dunas debe incluir elementos para delimitar, restringir o evitar el paso, por lo que las medidas recomendadas son:

1. Cerramiento parcial o total a las zonas sensibles o recientemente revegetadas.

2. Delimitación de senderos para canalizar el flujo de personas.

3. Construcción de pasarelas peatonales en la playa cuando el flujo es muy intenso.

4. Señalización para orientar a la gente sobre el paso y uso apropiado de la duna.

La construcción de cercos, senderos, pasarelas y letreros informativos debe considerar tres aspectos: la *ubicación* de la infraestructura en la duna, el *diseño* y los *materiales* que se utilizarán. Para seleccionar o decidir sobre dichos aspectos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- **Número de personas y tipo de usuarios que circulan por la zona.** P. ej., si son residentes del área o relacionadas al proyecto, conscientes de la importancia de la restauración, no requieren mayor restricción. Sin embargo, si los usuarios son visitantes y turistas en grandes grupos, será necesario un cerco muy restrictivo. En zonas muy visitadas evitar el cierre de áreas demasiado extensas, dejando pasillos para que los peatones puedan transitar.

- **Usos dominantes de la zona.** Determinar si la duna y la playa son utilizadas para turismo, pastoreo, paso de residentes; y si son empleadas por parte de pescadores para el atraque de sus embarcaciones y comercialización de sus productos, así como evaluar el impacto que puedan tener sobre la zona revegetada. P. ej., si los pescadores las usan, se deben consi-

derar espacios destinados a la ubicación de las lanchas, así como para el paso de vehículos que las recogen y el producto obtenido del mar. Las zonas de bañistas y turismo deben contemplar espacios de esparcimiento, pues al no existir, invadirán las dunas costeras.

- **Tipo de vehículos que circulan.** Determinar el tamaño y el tipo de vehículos, así como su uso, para asegurar que la solución propuesta es efectiva para regular su paso.

- **Fauna local.** Los cercos deben posibilitar el libre paso de fauna marina y costera, como tortugas marinas, aves, reptiles y mamíferos menores.

- **Dinámica costera.** Las estructuras deben permitir el flujo del viento y el oleaje en condiciones normales y de tormenta para evitar alterar la dinámica costera.

- **Impacto de factores ambientales en los materiales.** Los materiales deben ser resistentes a los factores ambientales extremos de las costas, como alta salinidad, alta radiación solar, vientos y humedad, así como a factores biológicos como plagas. Además, es importante considerar algún tratamiento para los materiales con el fin de asegurar la duración y resistencia, como en el caso de la madera.

- **Regulaciones aplicables en la duna.** Revisar la normatividad ambiental vigente y aplicable al proyecto de la zona a restaurar.

- **Alta diversidad de plantas en la restauración.** Para mantener una diversidad alta en la restauración, se debe incluir una gran diversidad de especies de plantas, por lo que la protección debe abarcar, preferiblemente, la zona de pioneras y la de matorral.

Recomendaciones generales:

- La madera es el material más común para la construcción de estas estructuras, pues es térmica, adaptable a distintos diseños, menos costosa que el metal y presenta menor impacto paisajístico. Algunas de las especies maderables más resistentes para la construcción de cercos en la PY son chicozapote, pucté, jabín o tzalam, ya que son maderas impermeables de muy alta densidad, duras y pesadas, difíciles de ser invadidas por hongos o insectos, características que las hacen resistentes. A pesar de que estas especies presentan una resistencia natural, es recomendable darles tratamiento para incrementar su fortaleza ante los factores ambientales y biológicos de la costa.
- Los tornillos/pernos/clavos/rondanas y tuercas en la unión de las estructuras deben ser galvanizados y pintados para evitar la corrosión.
- En caso de que los cercos sean muy largos, se deben construir pasos de fauna (p. ej., tortugas marinas) dejando una distancia mínima de 1 m a 2 m de ancho entre mallas o empalizadas.

4.1.1 Cercos

Los cercos deben impedir o limitar la afluencia de visitantes sobre y dentro del área rehabilitada. El objetivo recomendado es evitar el paso de 90% de los usuarios (Gallego-Fernández, García y Ley, 2003). De preferencia se recomienda que los caminos y cercos sean serpenteados al interior de la duna para minimizar el impacto del viento sobre el camino a través de la protección de la vegetación. El tipo de cerco responde a las necesidades particulares de cada proyecto de restauración y a los recursos disponibles; en la Tabla 6 se presentan algunas opciones.

Tabla 6. Tipos de cerco de acuerdo con las necesidades del proyecto

Tipo de cerco	Paso de personas	Paso de fauna	Adaptación a la dinámica costera	Dinámica de visitantes	Dinámica de la vegetación
Cerco de postes y cuerda/línea (Figura 16 A); p. ej., cerco de madera y cuerda marina.	Delimita el área pero permite el paso.	Permite el paso.	Alto. Permite el paso de arena, viento y oleaje. Fácil de modificar al cambiar la duna o playa.	Apto para pocos visitantes o visitantes conscientes, o que requieren guardia.	Las plantas pueden crecer sin impedimentos.
Cerco de postes (Figura 16 B); p. ej., cerco de poste de concreto y cable galvanizado.	Delimita e impide el paso.	Debe dejarse un espacio libre entre la arena y la malla.	Bajo. Permite el paso de arena, viento y oleaje. Difícil de modificar o mover al cambiar la duna o playa.	Alto flujo de visitantes; es la única opción de control.	Crecimiento de plantas limitado por la malla.
Cerco de postes y travesaños (Figura 16 C); p. ej., cerco de postes de madera y travesaños de madera.	Delimita e impide el paso.	Debe dejarse un espacio libre entre la arena y los travesaños.	Bajo. Permite el paso de arena, viento y oleaje. Puede dañarse por el oleaje. Difícil de modificar o mover al cambiar la duna o playa.	Alto flujo de visitantes.	Crecimiento de plantas limitado por los travesaños.

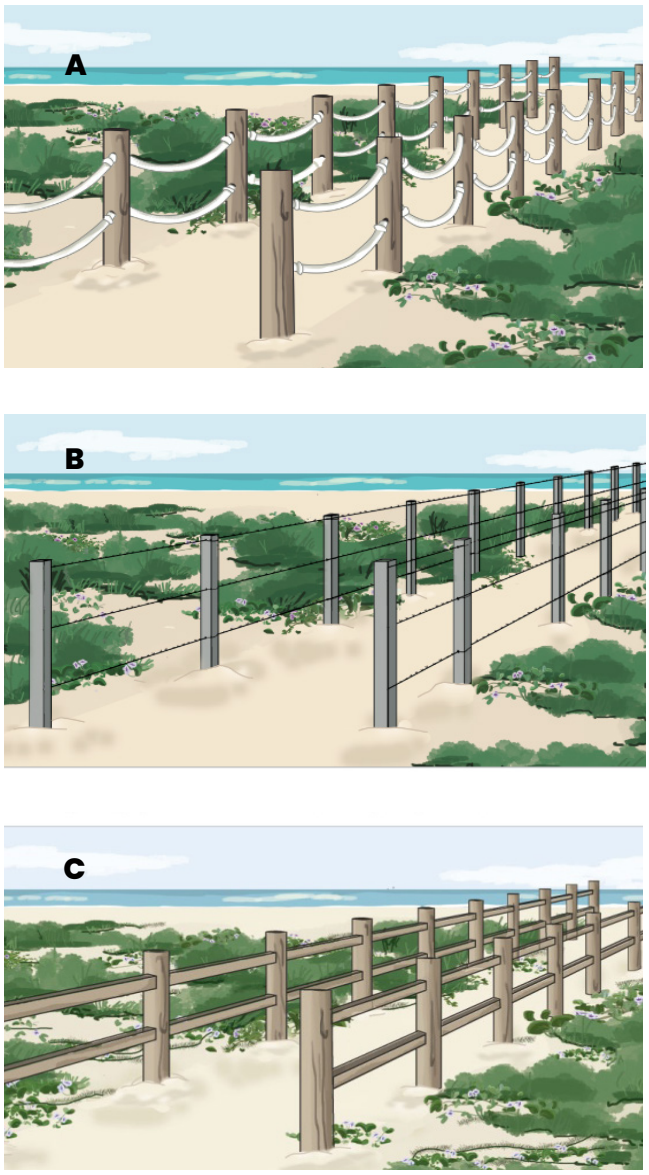


Figura 16. *Cercos de protección de la vegetación de dunas costeras. A) Cerco de madera con cuerda; B) Cerco de postes de concreto con alambre de acero inoxidable, C) Cerco de postes y travesaños de madera.*

También se pueden utilizar cercos vivos, mediante la alineación de especies herbáceas o arbustivas de duna, colocadas con muy poco espacio entre ellas, formando una especie de obstáculo que impida el paso de los peatones, o dividir los senderos de las áreas rehabilitadas. Estos cercos tienen varias ventajas, ya que pueden ser duraderos siempre y cuando se utilicen especies de plantas perennes. Además, resultan económicos, pues evitan la necesidad de comprar materiales. No obstante, debe considerarse también su mantenimiento, ya que pueden ser depredados por animales, irrespetados y pisoteados por los peatones para cortar camino, y extenderse más allá de la zona deseada.

4.1.2 Senderos

Mediante la limpieza y el retiro de vegetación se pueden abrir brechas con el objetivo de dirigir el flujo de visitantes hacia la playa. Para evitar el paso de los peatones del sendero a la zona de vegetación, se recomienda la delimitación del camino con la construcción de cercos. De igual manera, se sugiere que el sendero sea serpenteado para amortiguar la erosión provocada por el viento.

4.1.3 Pasarelas

Para evitar el pisoteo es recomendable habilitar pasarelas transversales al cordón dunar (Figuras 17, 18, 19 y 20), con el fin de canalizar el paso de visitantes entre el interior de la duna y el frente de playa. Se aconseja hacerlas elevadas, soportadas mediante pilotes para permitir el establecimiento de la vegetación y el transporte de arena por el viento debajo de ellas. Este tipo de estructuras son muy importantes en playas que reciben muchos visitantes.

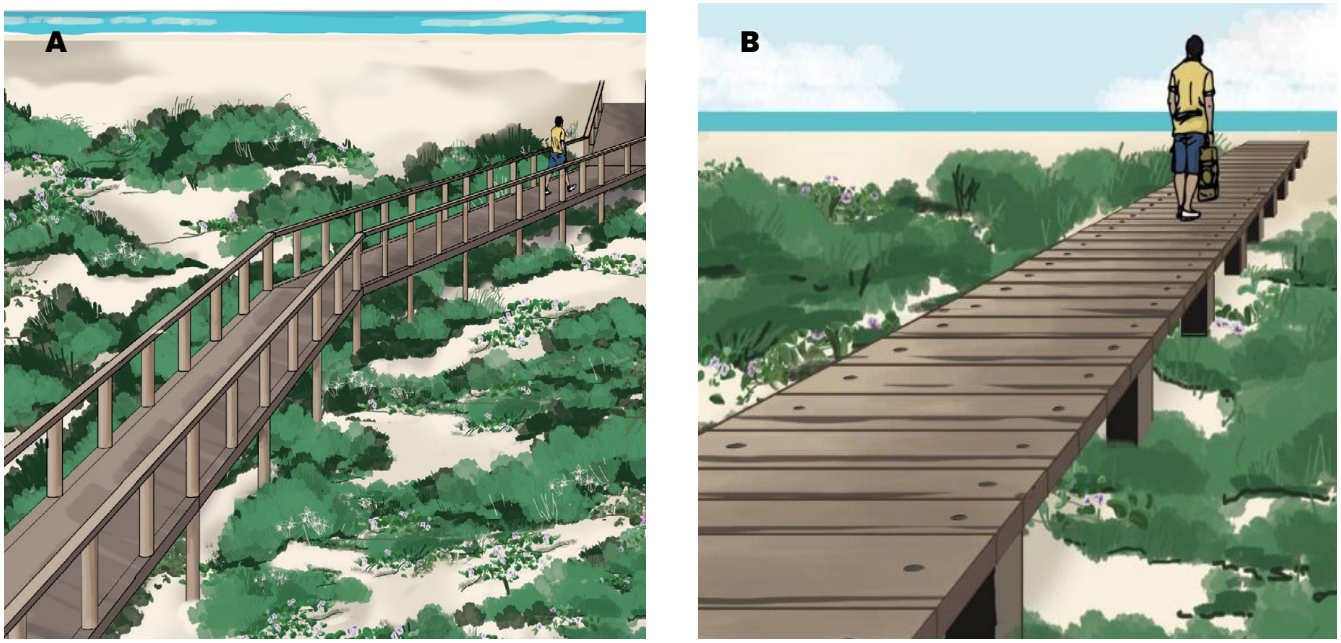


Figura 17. *Ejemplo de pasarela elevada de madera para la protección de las dunas costeras. A) Pasarela con pasamanos; B) Pasarela baja sin pasamanos.*



Figura 18. *Pasarela de 25 m en proyecto de restauración Telchac-Chixchulub. Protege un área vegetada de 200 m², con una elevación aproximada de 50 cm desde el nivel del suelo. Permite el libre acceso y tránsito peatonal en un área pública con salida a la playa. Fotografías: Gabriela Mendoza.*



Figura 19. *Pasarela en un proyecto de restauración en Telchac-Chixchulub. Se instaló una pasarela en forma de "V" en el frente de playa de los condominios Royal Beach 1, con una elevación aproximada de 50 cm. También se cercó el área revegetada con puntales de madera unidos por cuerda. Fotos: Gabriela Mendoza.*

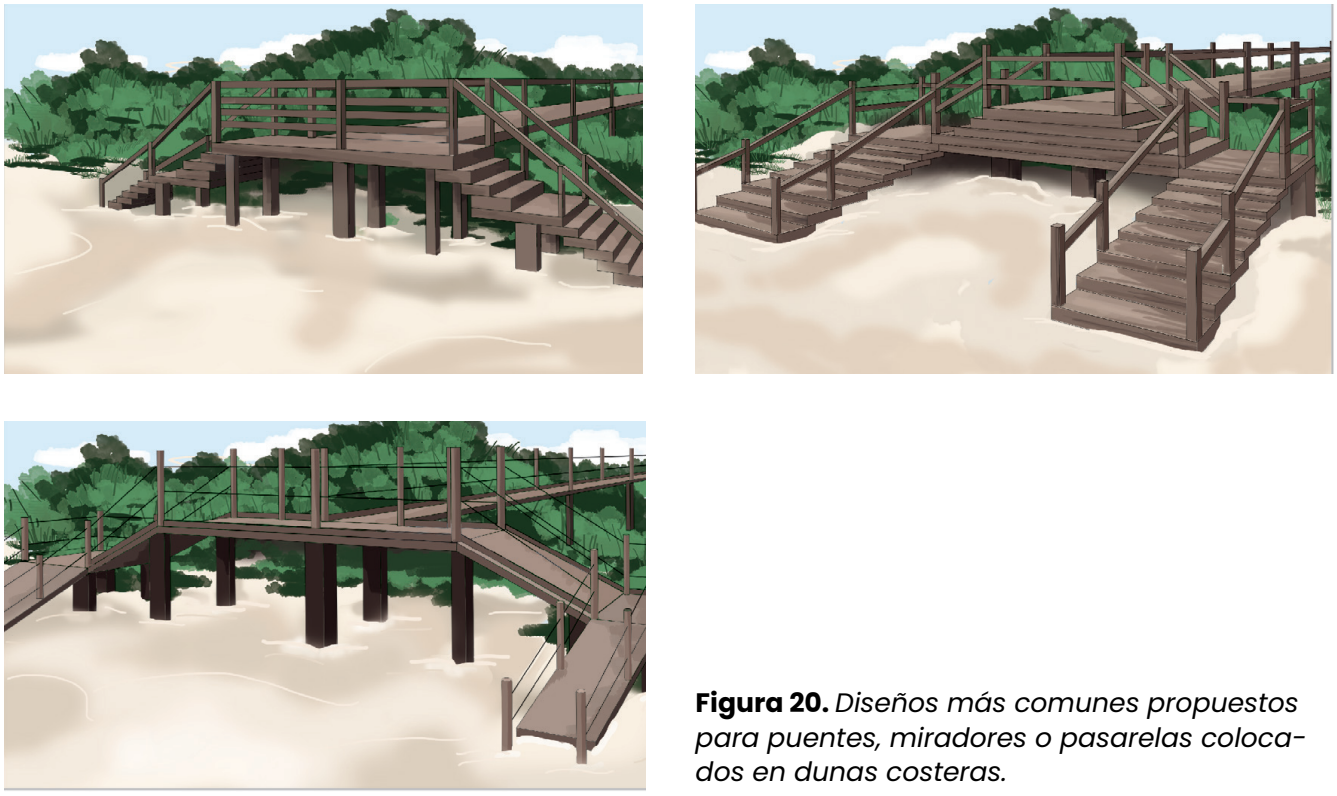


Figura 20. *Diseños más comunes propuestos para puentes, miradores o pasarelas colocados en dunas costeras.*

Algunas recomendaciones para la construcción de pasarelas, de acuerdo con Patterson (2005), son las siguientes:

Ancho. El de una pasarela se calcula con base en el volumen esperado de tráfico peatonal. Si se utiliza con poca frecuencia, uno de 70 cm es suficiente para una persona en una sola dirección. Para dos personas simultáneamente debe tener un mínimo de 1.20 m; en caso de ser una zona muy transitada, puede aumentarse, considerando resistencia y soportes para asegurar su estabilidad.

Altura. La estructura debe permitir el paso de radiación solar a la vegetación que existe o crezca debajo de ésta, además de la conectividad de la vegetación entre parches, por lo que se recomienda que la altura de la estructura sea 1.5 veces su ancho.

Plataforma. Las tablas de madera que conformen la plataforma deben tener una separación aproximada de 2.5 cm o más para posibilitar el paso de la luz solar y la lluvia a la vegetación localizada por debajo de la pasarela.

Accesos. Los visitantes podrán ingresar a la plataforma por medio de escaleras o rampas. Considerar el acceso a personas con capacidades diferentes y diseñar cumpliendo los criterios requeridos.

Pasamanos. Los pasamanos son recomendados como medida de seguridad para los usuarios y evitar que tengan acceso a las dunas. Deben tener al menos 90 cm de altura y, por seguridad, deben ser obligatorios si la plataforma de la pasarela se encuentra a una altura de 1.20 m o más.

Columnas de apoyo. El número de éstas, la distancia entre ellas, su longitud y la profundidad a la que deben ser enterradas dependerán del diseño de la pasarela y los resultados de los cálculos estructurales para su construcción. Para esto se recomienda la asesoría de un ingeniero estructuralista; un mal diseño puede ocasionar accidentes graves a los usuarios, así como una pérdida de la inversión si la estructura no resulta adecuada.

4.2 Mantenimiento de la vegetación y de la infraestructura

1. Vegetación. En este tipo de proyectos es necesario esperar un tiempo prolongado para que el sistema comience a restablecerse naturalmente, por lo que, en general, el mantenimiento consiste fundamentalmente en controlar y promover el crecimiento adecuado y el desarrollo de los ejemplares sembrados, así como mantener en buenas condiciones los sistemas de protección y señalización (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007). Las plantas nativas de duna requieren poco mantenimiento después del establecimiento, sin embargo, es necesario considerar los siguientes conceptos:

- **Riego.** Es preferible realizar la etapa de revegetación en la temporada de lluvias de la región para aprovechar la disponibilidad del recurso agua. En caso de no ser posible, es necesario regar inmediatamente después del trasplante, y posteriormente cada dos o tres días hasta que las plantas recién sembradas logren establecerse. Nunca realizar el riego a medio día cuando la radiación es más intensa. Se recomienda regar muy temprano por la mañana o por la tarde antes de anochecer. Se sugiere el uso de materiales que retienen la humedad en el sustrato por más tiempo, como hidrogel, perlita o vermiculita (véase la sección 3.3 "Trasplante de vegetación en la zona de restauración").

- **Nutrientes y materia orgánica.** Durante la revegetación se puede usar un poco de materia orgánica mezclada con arena. Se ha observado que el pasto marino o el sargazo solarizado en combinación con arena funciona bien como una fuente natural de nutrientes (D. Hoil, comunicación personal, 5 mayo de 2020). Se recomienda realizarlo al menos antes de la temporada de lluvias para que ambos recursos, agua y nutrientes, sean aprovechados.

- **Vegetación invasora.** Las áreas revegetadas deben mantenerse libres de especies invasoras y malezas. Para esto es necesario el monitoreo del área una vez al mes para el retiro o deshierbe de la maleza que esté invadiendo el área (técnica de barrido); de esta manera se evitará el crecimiento masivo de especies indeseadas. Si éstas persisten durante el primer año, podría ser necesaria la aplicación de herbicidas para destruir sus semillas resguardadas en el suelo, para lo cual se aconseja una técnica de barrido a través de la aplicación de herbicida y limpieza de estructuras restantes. Éste sólo debe ser aplicado en las áreas problemáticas y de manera selectiva para no afectar los ejemplares de interés o los utilizados en la restauración. Es importante seguir las instrucciones de seguridad en la aplicación de los herbicidas (véase "Anexo").

2. Infraestructura. Los proyectos de rehabilitación cuentan con infraestructura que requiere mantenimiento debido a las condiciones de las zonas costeras y las presiones humanas a las cuales pueden estar sujetas las áreas rehabilitadas. Deberá elaborarse un plan de mantenimiento y revisión, que puede consistir en un cuadro simple que orienta las acciones (véanse ejemplos en las Tablas 7 y 8).

Tabla 7. Listado de revisión regular para el mantenimiento de infraestructura

Infraestructura	Acción de mantenimiento regular	Frecuencia
Cuerdas o sogas de cercos	Limpiar de algas, musgo, salitre, etc.	Trimestral
	Revisar condición de la cuerda.	Trimestral
	Reemplazar cuerda.	Cada dos años
Postes de madera de los cercos	Barnizar o pintar para su protección.	Anual
	Revisar la condición de clavos o tornillos en uniones, y la cimentación.	Trimestral
Pasarelas sobre dunas	Barnizar o pintar para su protección.	Anual
	Revisar la condición de clavos o tornillos en uniones, y la cimentación.	Trimestral
Letreros de madera y metal	Barnizar o pintar para su protección.	Anual
	Revisar la madera y uniones (pernos, tornillos, etc.).	Trimestral
Letreros de policarbonato u otro plástico	Cambio del letrero de policarbonato.	Cada dos años o menos
	Reponer o reparar letreros vandalizados o dañados por el clima.	Cuando ocurra
Sendero	Limpieza para mantener el ancho de paso libre de vegetación.	Mensual
	Limpieza para mantener libre de basura.	Mensual

Tabla 8. Ejemplo de formato de propuesta de mantenimiento preventivo de infraestructura del área de restauración

FORMATO DE REVISIÓN DE INFRAESTRUCTURA

Empresa	
Sitio revisado	
Persona que verifica	
Fecha	

Puntos para revisar			**Cumple**		**Observaciones**
			Sí	**No**	
1	Senderos	Ancho de paso libre de vegetación			
		Área libre de basura			
2	Pasarelas	Estructuras rotas, dañadas (incluye grafiteadas)			
		Tornillos, clavos, pernos dañados o sueltos			
		Cuerda dañada			
		Madera astillada			
3	Letreros	Daño a la estructura por intemperie			
		Vandalizados			
		Descoloridos			
		Sujeción al soporte dañada			
		Soporte dañado			
		Base del soporte dañada			
4	Cercos	Estructuras rotas/dañadas (incluye grafiteadas)			
		Tornillos, clavos, pernos dañados o sueltos			
		Cuerda dañada			
		Madera astillada			
5	Captadores	Estructuras rotas/dañadas (incluye grafiteadas)			
		Tornillos, clavos, pernos sueltos			
		Malla o travesaños dañados			
		Cuerda dañada/cortada/rasgada			

Persona que evalúa la infraestructura

Nombre

Firma

Persona que revisa el formulario

Nombre

Firma

4.3 Señalización del área rehabilitada

El éxito de la rehabilitación depende de que la comunidad y los usuarios de las playas y dunas no perturben el área rehabilitada, permitan su recuperación en el largo plazo e idealmente apoyen con tiempo y recursos al proceso para realizar actividades de limpieza, riego, financiamiento, etc. Es importante comunicar a los visitantes el motivo de restricción al paso, resaltando la importancia de las dunas costeras y su rehabilitación. Se recomiendan dos herramientas básicas:

1. Letreros en el área de rehabilitación
2. Campañas informativas

Además de lo anterior, se aconseja compartir información sobre el objetivo del proyecto de rehabilitación; la amenaza en que se encuentran las dunas costeras por erosión, fragmentación, cambio de uso de suelo, contaminación, etc.; la importancia de la conservación de las dunas costeras; las especies de flora y fauna que pueden encontrarse en la zona, resaltando las que se encuentren bajo una categoría especial, y las actividades permitidas y prohibidas que el público puede realizar en el entorno del proyecto.

Se recomienda el uso de letreros colocados estratégicamente a lo largo de las áreas con la información anterior. Éstos deben contener información veraz, de fácil entendimiento, con información breve y contundente; así como imágenes, fotografías o diagramas explicativos. Además, su diseño debe ser estético y atractivo (colores, composición y tipo de letra), y de un tamaño adecuado para emitir con éxito el mensaje que se desea transmitir. Existen diferentes materiales para su construcción: acrílico, metal o lámina galvanizada, todos con base y marco de madera tratada o de metal. El uso de materiales galvanizados evita la corrosión acelerada de las estructuras debido a los factores ambientales de las playas; esto dependerá del diseño, así como del presupuesto asignado.

5. Monitoreo de un proyecto de restauración

El monitoreo es la recolección sistemática de datos que tiene el objetivo de caracterizar el estado actual y futuro del área restaurada, a través de la medición de parámetros que indiquen los cambios que ocurren en ella (Vos, Meelis y Ter Keurs, 2000; SINAC, 2016). Para el monitoreo de un área en proceso de restauración, se deben establecer principalmente indicadores y cuantificadores que permitan medir el progreso de la recuperación en el tiempo, así como la evaluación del cumplimiento de los objetivos y las metas (Yoccoz, Nichols y Boulinier, 2001; Herrick, Schuman y Rango, 2006; NSW Department of Land and Water Conservation, 2001). De esta manera, se pueden tomar decisiones de manejo para hacer los ajustes necesarios que permitan mejorar o complementar las estrategias (p. ej., manejo adaptativo) (Aguilar-Garavito y Ramírez, 2015). A través del monitoreo, con el tiempo se pueden detectar cambios en el ecosistema e identificar las potenciales consecuencias ecológicas de la transformación, lo que contribuye a la toma de decisiones para escoger prácticas de manejo adecuadas (Keenleyside *et al.*, 2014). El monitoreo puede proveer información valiosa para futuros proyectos, ya que puede utilizarse para estimar el éxito y la eficiencia de las prácticas, determinar los periodos de establecimiento de la vegetación, detectar nuevas perturbaciones o alteraciones y disminuir los costos en los futuros proyectos de restauración ecológica (Holmes *et al.,* 2004; Holl y Howarth, 2000).

5.1 Metodología de muestreo y colecta de datos

El primer paso es delimitar el área donde se realizará el monitoreo periódicamente. Puede ser toda la zona de restauración, una o varias parcelas, o transectos de muestreo. Se recomienda contratar un equipo capacitado que pueda aplicar las técnicas de monitoreo que se requieren en el lugar. A continuación se muestran los siguientes puntos a considerar:

Frecuencia y estacionalidad. Definir la frecuencia del monitoreo en días, semanas, meses o años (Tabla 9), permite notar los cambios que se desean. Algunos indicadores deben medirse en cada una de las estaciones del año (p. ej., ancho de playa); otros, en un horario determinado del día (p. ej., humedad por las mañanas) para evitar la distorsión de los cambios generados por el transcurso del día.

Tabla 9. Ejemplo de cuadro para monitorear frecuencia y estacionalidad

Estación	Periodo de *nortes*	Periodo de secas	Periodo de lluvias
Meses	Noviembre-febrero	Marzo-mayo	Junio-octubre

Método de medición de los datos. Indica los instrumentos y recursos a utilizar, o la fuente de información (p. ej., estación meteorológica de la UNAM en Puerto Morelos para los datos del tiempo). Se sugiere elaborar una propuesta metodológica que contemple los datos requeridos (véase un ejemplo en la Tabla 10).

Tabla 10. Ejemplo de propuesta de metodología para la colecta de datos de algunos indicadores seleccionados. Las técnicas y los métodos seleccionados dependerán de cada proyecto

No.	Indicador	Cuantificador	Técnica de muestreo	Frecuencia	Estación
1	**Morfología**	Ancho (m) de la duna con vegetación del mar al interior	Transectos perpendiculares a la línea de costa.	Cada tres o cuatro meses	Secas, lluvias y *nortes*
2	**Topografía**	Altura (m) sobre nivel medio del mar en transectos perpendiculares a la línea de costa separados cada 50 m	Levantamiento de perfiles de playa	Cada tres o cuatro meses	Secas, lluvias y *nortes*
3	**Desplazamiento de la línea costa**	Índice de la tendencia sobre la ganancia o pérdida de arena en un perfil dado	Levantamiento de perfiles de playa	Cada tres o cuatro meses	Secas, lluvias y *nortes*
4	**Cobertura vegetal**	Porcentaje vegetación con respecto al área medida por parcela	Parcela	Mensual	Secas, lluvias y *nortes*

No.	Indicador	Cuantificador	Técnica de muestreo	Frecuencia	Estación
5	**Índice de diversidad**	Número de especies de flora nativa y número de individuos de cada especie (índice de diversidad Shannon-Wiener)	Transectos o parcelas	Cada tres o cuatro meses	Secas, lluvias y *nortes*
6	**Severidad e incidencia de plagas y enfermedades**	Área afectada por enfermedades o plagas (m). Número de enfermedades o plagas	En toda el área del proyecto	Mensual	—
7	**Precipitación**	Milímetros de lluvia por día	Estación climatológica	Diario	—
8	**Frecuencia de visitas al sitio de restauración**	Número de visitantes registrados por día	En el área del proyecto	Diario	—
9	**Participación de voluntarios**	Horas de voluntariado	En el área del proyecto	Mensual	—

Fuente: Gallego-Fernández *et al.* (2011), Cabrera y Ramírez (2014), Aguilar-Garavito y Ramírez (2015), SINAC (2016) y García-Sánchez *et al.* (2021).

Formatos para la colecta de datos. Los formatos predefinidos para la medición de los datos pueden ser muy útiles, ya que permiten la uniformidad en el método y el registro de dichos datos. De acuerdo con las capacidades técnicas del equipo de trabajo, el formato puede ser impreso o digital (p. ej., llenarlo mediante una tableta o teléfono inteligente).

5.2 Metodología para la interpretación de los datos

Cada criterio debe ser identificado para determinar si el proyecto cumple con los objetivos de monitoreo y restauración. Por lo tanto, el análisis de los datos permite determinar si los resultados obtenidos en cada indicador y cuantificador están cumpliendo los objetivos estipulados (Tabla 11). En la medida de lo posible, el análisis debe ser realizado en conjunto (área en proceso de restauración vs. área de referencia) para obtener una interpretación adecuada (Ortega-Álvarez *et al.*, 2013).

Tabla 11. Ejemplo para comprobar que los objetivos del monitoreo y de la restauración se cumplen.

Objetivo del monitoreo	Criterio	Indicador	Cuantificador	Análisis	Interpretación
Determinar si hay cambios en la forma de las dunas costeras.	Funcionalidad de la duna.	Morfología de la duna.	Altura de la duna.	Comprobar que hay curvas de acumulación de arena.	Las curvas de acumulación son iguales en los sitios restaurados y en los sitios de referencia.
Determinar si aumenta o recupera la vegetación de dunas costeras.	Estructura y composición de la vegetación.	Cobertura vegetal.	Balance entre cobertura vegetal y área sin vegetación.	Comprobar que aumenta la cobertura vegetal.	El número de especies observadas en las áreas de restauración aumenta a lo largo del tiempo hasta que el sistema se estabilice en un estado sucesional maduro. Se espera que la riqueza de especies en las áreas restauradas sea cada vez más similar al ecosistema de referencia.
Determinar si aumenta o recupera la diversidad de especies de flora y fauna de las dunas costeras.	Diversidad ecológica de la duna.	Riqueza de especies.	Riqueza de especies de flora.	Comprobar que aumenta la diversidad y se acerca a la diversidad de referencia.	En el área restaurada se observa por lo menos 70% de las especies nativas esperadas o presentes en el sistema de referencia.

Fuente: Aguilar-Garavito y Ramírez (2015), SINAC (2016) y García-Sánchez *et al.* (2021).

5.3 Manejo adaptativo

Uno de los objetivos del monitoreo es determinar aspectos que requieran cambios o mejoras para lograr las metas del proyecto y realizar los ajustes necesarios, es decir, hacer un manejo adaptativo de éste (Tabla 12).

Tabla 12. Ejemplos de medidas correctivas para el manejo adaptativo

Objetivos del proyecto de restauración	**Objetivo de monitoreo**	**Acciones de manejo adaptativo**
Recuperar la morfología de la duna para proteger la costa.	Determinar si hay cambios en la forma de las dunas costeras.	Captación de arena mediante captadores pasivos. Revegetación de la duna.
Recuperar la estructura y composición de la vegetación nativa sobre el suelo para proteger la duna.	Determinar si aumenta o recupera la vegetación de dunas costeras.	Implementar acciones que contribuyan a garantizar la dispersión, el establecimiento y la permanencia de las plantas nativas.
Recuperar la diversidad de especies en las dunas costeras.	Determinar si aumenta o recupera la diversidad de especies de dunas costeras.	Revegetar la duna con especies de flora nativas en una óptima proporción y abundancia. Remover gradualmente las especies invasoras y/o exóticas. Cambio en las densidades de siembra o trasplante.
Concientizar a la población sobre la importancia de las dunas costeras.	Determinar si hay aumento de personas interesadas en la conservación de las dunas costeras.	Aumentar divulgación del proyecto en redes sociales.

Fuente: elaboración propia con base en Aguilar-Garavito y Martínez (2015).



Fotografía: Luis Guillermo

Capítulo

4

CASOS DE ESTUDIO DE REABIOLITACIÓN DE DUNAS

CASO DE ESTUDIO 1. Condominios Royal Beach I en Chicxulub, Yucatán

Localidad

Condominios Royal Beach I en Chicxulub, Yucatán
Latitud: 21° 17′ 45.9″ N
Longitud: 89° 36′ 18.07″ O

Objetivos del proyecto

Promover la regeneración de las dunas costeras a través de las siguientes acciones:

1. Revegetar con plantas nativas la zona de pioneras.
2. Crear pasos elevados de madera que disminuyan el pisoteo de la vegetación.
3. Comunicar las acciones llevadas a cabo a los diferentes actores sociales vinculados al manejo de playas y dunas de la zona.

Breve descripción del proyecto

Las acciones de rehabilitación de dunas costeras formaron parte de un proyecto en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (Seduma) (ahora Secretaría de Desarrollo Sostenible [SDS]) y la UNAM en el marco del proyecto Estudio Integral de Restauración y Estabilización Costera del Estado de Yucatán (Fase 1: Tramo Chicxulub-Telchac y Zona Experimental en Sisal) (Figura 21). Las acciones de rehabilitación se llevaron a cabo en un área que presentaba fuentes de semillas y propágulos de vegetación nativa en zonas cercanas. Se revegetó el área con plantas fijadoras de dunas, con distribución abundante en el área de estudio, las cuales se reprodujeron en el vivero de la Unidad Multidisciplinaria de

Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, de la UNAM, Campus Yucatán (UMDI-Sisal UNAM), y especies arbóreas reproducidas en el vivero de la Seduma. Asimismo, se instalaron estructuras de protección para la conservación de la vegetación de dunas costeras y la morfología natural (Figura 21). Se colocaron corrales de madera con cuerda y pasarelas elevadas que dirigen el paso peatonal hacia la playa y el mar evitando el pisoteo.

La intervención en las dunas costeras se realizó en cumplimiento de las condicionantes ambientales impuestas por la Semarnat.

Área de restauración antes



Figura 21. *Poligonal y frente de playa de condominios Royal Beach. Fotografía: Gabriela Mendoza.*

Área de restauración después



Figura 22. *Polígono rehabilitado en frente de playa de condominios Royal Beach. Fotografías: Gabriela Mendoza.*

Condiciones del área antes de la rehabilitación

Las dunas del tramo Chicxulub-Telchac en Yucatán se encuentran en muy mal estado de conservación, ya que esta área es donde principalmente se han construido casas de verano, generando una importante pérdida de playa y de dunas embrionarias y primarias. Conserva alrededor de 20% de la vegetación de dunas costeras reportadas para la península. Asimismo, existe una importante área cubierta por especies exóticas (como cultivos de coco y lechuga de mar) y de pastos.

Diagnóstico y diseño de la intervención

Previo a la rehabilitación, se caracterizó el ambiente biofísico e identificaron las especies nativas que se distribuyen en la zona a través de recorridos a lo largo de 7 km en la línea de costa. Se observó una pérdida importante de sedimento en 30% del área, en 8% existen especies introducidas y casi en 40% se presentaron condiciones para llevar a cabo accio-

nes de restauración, con sustrato disponible y con la presencia de algunas especies nativas, las cuales son principalmente herbáceas, rastreras, arbustivas y suculentas.

Posteriormente se realizaron trabajos de intervención. Las acciones se sustentaron en el proyecto Estudio Integral de Restauración y Estabilización Costera del Estado de Yucatán. (Fase 1: Tramo Chicxulub-Telchac y Zona Experimental en Sisal).

Intervenciones físicas realizadas (p. ej., traslado de arena, construcción de muros o retenedores, etc.)

Se construyeron estructuras de protección para la conservación de la vegetación de dunas costeras y la morfología natural. Se instalaron corrales de madera con cuerda y pasarelas elevadas que dirigen el paso peatonal hacia la playa y el mar para impedir el pisoteo de la vegetación en la zona. Posteriormente se sembraron plantas nativas para conformar la duna frente a las instalaciones.

Proceso utilizado para la plantación

El área a restaurar se limpió de basura (principalmente plásticos) y residuos orgánicos encontrados en el área.

Se seleccionaron especies de plantas pioneras formadoras de dunas costeras identificadas en el diagnóstico del área, entre las que destacan las siguientes: *Ipomea presca-prae, Scaevola plumieri, Sesuvium portulacastrum, Euphorbia buxifolia, Croton punctatus, Coccoloba uvifera, Hymenocallis littoralis, Suriana marítima, Tournefortia gnaphalodes, Canavalia rosea, Ambrosia hispida, Blutaparon vermiculare, Atriplex tampicensis, Cakile edentula, Ernoodea littoralis* y *Passiflora foetida.* Éstas fueron reproducidas en el vivero de la UMDI-Sisal y llevadas a los sitios de restauración para su plantación a través de la excavación de pocetas de aproximadamente 40 cm de profundidad por 25 cm de diámetro (dependiendo del tamaño de las raíces de cada ejemplar). Se realizó un croquis para calcular la distancia entre las plantas y el número de filas requeridas para cubrir cada zona (Figura 23).

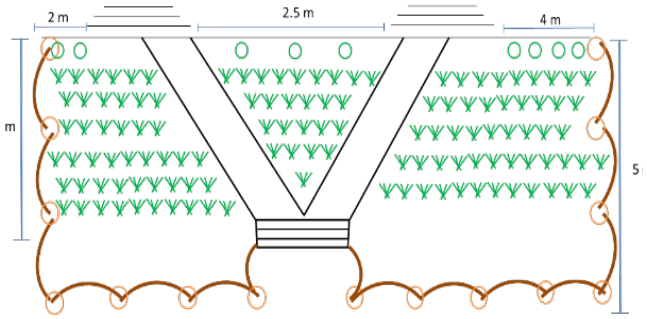


Figura 23. *Esquema de pasarela instalada frente al condominio Royal Beach.*

Se protegió la vegetación presente en las dunas costeras a través de corrales instalados de acuerdo con los límites del polígono descrito anteriormente. Dentro del corral, a un costado de los muros laterales a las escaleras, se plantaron plantas de uva de mar y de anacahuita. Al frente de la zona arbolada se plantaron individuos de vegetación conformada por herbáceas rastreras y erectas y arbustos reproducidos con anterioridad, ocupando los sitios menos cubiertos por la vegetación natural y residente de la zona de interés (Figura 24).



Figura 24. *Instalación de pasarelas en el frente de playa de los condominios Royal Beach 1. Fotografías: Gabriela Mendoza.*

Mantenimiento, protección y monitoreo llevado a cabo

Para realizar el proyecto, se buscó la participación de la ciudadanía, propietarios de inmuebles en el frente de playa que tuvieran el interés y la corresponsabilidad de mantener el trabajo en buen estado. En este caso, el condominio se hizo responsable del mantenimiento de la pasarela y de los corrales instalados con recursos propios y administrados por el condominio.

En el último monitoreo realizado en 2021 se registró un deterioro importante de la vegetación y estructura de madera instalada. En el sitio se registró un impacto en el transporte litoral de sedimentos debido a la instalación de un geotubo y a la construcción de un edificio de concreto de grandes dimensiones construido durante ese año, el cual colinda con la revegetación.

CASO DE ESTUDIO 2. Hotel Haven Riviera Cancún en Benito Juárez, Quintana Roo

Localidad

Hotel Haven Riviera Cancún. Benito Juárez, Quintana Roo
Latitud: 20° 57′ 56″ N
Longitud: 86° 49′ 50″ O

Objetivos del proyecto

1. Restaurar las dunas costeras para prevenir procesos erosivos.
2. Restablecer una duna que proteja las instalaciones del hotel y conserve la biodiversidad que habita en el área.

El proyecto implica un cambio de paradigma para conservar la vegetación original del ecosistema. Se mantienen plantas nativas entre los camastros y en los jardines del hotel. Éstas implican un gasto de mantenimiento menor (riego, plagas, etc.) en comparación con áreas cubiertas de pasto.

La intervención en las dunas costeras se realizó en cumplimiento de las condicionantes ambientales impuestas por la Semarnat.

Breve descripción del proyecto

La primera etapa del hotel fue construida detrás de la duna, respetando su geoforma natural (Figura 25). Una vez terminada esta parte de la obra, que incluye la construcción de plataformas de madera tipo mirador, se rellenó de arena al pie de éstas para generar una

duna costera, la cual se revegetó con plantas nativas (Figura 26). La vegetación nativa y original presente en la playa y la duna se conservó. En la actualidad se lleva a cabo un monitoreo semestral en el que se mide el estado de conservación de la duna, la acumulación de sedimento y la fauna asociada. También se lleva a cabo un programa de erradicación de plantas exóticas e invasoras para el mantenimiento de la duna y su vegetación nativa.

Área de restauración antes



Figura 25. *Poligonal y frente de playa del Hotel Haven Riviera. Fotografía: Vanessa Francisco.*

Área de restauración después



Figura 26. *Rehabilitación en el frente de la playa del Hotel Haven Riviera. Habitaciones detrás de la duna restaurada. Se puede observar el área de la playa con parches de vegetación nativa. Fotografías: Vanessa Francisco.*

Condiciones del área antes de la rehabilitación

Sitio con dunas naturales, vegetación exótica y nativa.

Diagnóstico y diseño de la intervención

La obra se diseñó detrás de las dunas costeras. Los accesos a la playa se establecieron en las zonas con menor afectación a la vegetación natural existente, y cuando no fue posible, se llevaron a cabo trabajos de rescate y reubicación de plantas.

Posteriormente se realizaron labores de revegetación. Las acciones se sustentaron en el Programa de Reforestación de Duna Costera y el Programa de Mantenimiento de Duna Costera y Playa Arenosa, ambos aprobados por la Semarnat.

Intervenciones físicas realizadas (p. ej. traslado de arena, construcción de muros o retenedores, etc.)

Antes de hacer uso del predio, se utilizó una malla de alambre para delimitar la zona de obras, que junto con el tiempo (alrededor de cinco años), sirvió para acumular arena. Esta se recuperó y recolocó en la base de muros de contención de edificios y el área de alberca. Posteriormente se sembraron plantas nativas para conformar la duna frente a las instalaciones.

Previo al desmonte de las áreas de aprovechamiento, se llevó a cabo el rescate selectivo de vegetación, con alrededor de 100 000 plantas, de las cuales, al menos 20% correspondió a especies de dunas costeras. El desmonte se realizó abarcando sólo las áreas a intervenir y se mantuvieron islas de vegetación natural entre las edificaciones.

Proceso utilizado para la plantación

Las dunas artificiales se revegetaron principalmente con plantas rastreras o cubresuelo, como riñonina (*Ipomoea pes-caprae*). En la playa se fomentó la presencia de estas especies y de arbustos nativos, como baya de playa o *chunup* (*Scaevola plumieri*), tabaquillo o *pats'il* (*Suriana maritima*) y tabaquillo o *sik'imay* (*Tournefortia gnaphalodes*). En las jardineras del hotel se usaron lirios de mar (*Hymenocallis littoralis*) y uva de playa (*Coccoloba uvifera*). Entre los edificios y el andador con ubicación paralela al mar se establecieron plantas nativas como tabaquillo (*Tournefortia gnaphalodes*), pats'il o también conocido

como tabaquillo o *pats'il* (*Suriana maritima*), icaco (*Chrysobalanus icaco*), siricote (*Cordia sebestena*), orégano de mar (*Lantana sp.*) y lirio de mar (*Hymenocallis littoralis*), principalmente procedentes de acciones de rescate de vegetación en la zona de matorral costero, donde actualmente se asienta el hotel.

Mantenimiento, protección y monitoreo llevado a cabo

Se protege la vegetación natural en la Zofemat y en este lugar no se instala ningún tipo de infraestructura.

Actualmente, se lleva a cabo un monitoreo continuo del estado de conservación y salud de la vegetación para identificar presencia de plagas, fauna perjudicial o peligrosa, vigor de la planta, presencia de flor o fruto y crecimiento. Cada seis meses se realiza un monitoreo completo que incluye, además de lo anterior, la presencia de fauna, cuadrantes con densidad de plantas y perfiles de playa.

Mensualmente se lleva a cabo la inspección de las actividades en el hotel y se califica el grado de cumplimiento ambiental contra una serie de indicadores previamente definidos. Este resultado se presenta en la Dirección y, según cada caso, se toman las medidas preventivas o correctivas necesarias.

Se brinda capacitación al personal sobre la importancia de las dunas costeras y las reglas de operación del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Asimismo, el hotel cuenta con un vivero donde se reproducen o propagan las plantas de dunas costeras.

Caso de estudio 3. Hotel Moon Palace, Benito Juárez, Quintana Roo

Localidad

Hotel Moon Palace, Benito Juárez, Quintana Roo
Latitud: 20° 59′ 25.20″ N
Longitud: 86° 49′ 32″ O

Objetivos del proyecto

1. Restaurar de manera integral los ecosistemas costeros para mitigar los procesos erosivos.
2. Conservar la biodiversidad que habita este ecosistema (tortugas, aves, cangrejos, etc.) y, con ello, brindar mejores áreas de playa para el disfrute de los huéspedes.

Breve descripción del proyecto

El proyecto consta de tres etapas: reposición paulatina de la arena en la playa, acumulación de área para formar una pequeña duna frontal y plantación y mantenimiento de vegetación nativa de dunas costeras.

Condiciones del área antes de la rehabilitación

Sitio muy erosionado con rocas expuestas y poca cantidad de arena. El nivel del mar llegaba a un muro de contención que delimita el área del hotel.

Diagnóstico y diseño de la intervención

Mediante la toma de perfiles topográficos mensuales de playa, se diseñaron y determinaron las áreas a intervenir, y se priorizaron las zonas que presentaban una mayor erosión por acción del viento o fuerza del oleaje.

Intervenciones físicas realizadas (p. ej. trasladar arena, construir muros, instalar retenedores, etc.)

Una vez determinadas las áreas críticas, se rellenó con arena recuperada de un proceso de separación de sargazo, y posteriormente se revegetó con plantas nativas de las dunas costeras (Figuras 27 y 28).



Figura 27. *Playa norte del Hotel Moon Palace en diferentes etapas del proceso de revegetación: A) Playa antes de iniciar el proceso en 2014, B) Revegetación inicial sin incluir sedimento en 2017, C) Duna revegetada en 2019, D) duna revegetada después de retirar el muro en 2022. Fotografías: Antonio Ortiz Hernández (A), Vanessa Francisco (B y C) y Calina Zepeda (D).*



Figura 28. *Playa norte del Hotel Moon Palace antes y después del proceso de rehabilitación topográfica con un relleno de arena y revegetación: A) 2017, B) 2021, C)2022. Fotografías: Antonio Ortiz Hernández (A y B) y Calina Zepeda Centeno (C).*

Proceso utilizado para la plantación

Una vez que se rellenó con arena suficiente, el primer paso fue sembrar plantas rastreras, como riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), que ayudaron a la fijación del sustrato en toda el área de arena vertida. Ya adaptadas, se sembraron plantas arbustivas, como *sik'imay* o tabaquillo (*Tournefortia gnaphalodes*); pats'il, también llamada tabaquillo (*Suriana maritima*), y lirios de mar (*Hymenocallis littoralis*). Finalmente, se plantaron otras especies como *chunup* o baya de mar (*Scaevola plumieri*), uva de mar (*Coccoloba uvifera*) y orégano de mar (*Lantana* sp.).

Mantenimiento, protección y monitoreo llevado a cabo

Este proyecto tiene un mantenimiento permanente en el que, para ayudar al buen estado de las dunas, se revisa el área periódicamente, y se perfila y da forma a éstas. Durante los primeros días posteriores a la revegetación, se mantuvo el riego constante hasta asegurar que las plantas estuvieran adaptadas.

Lecciones aprendidas implementadas en la segunda etapa de construcción del hotel

La segunda etapa de construcción del hotel se hizo detrás de las dunas costeras (Figura 29); en esta zona se efectuó un trabajo de revegetación y eliminación de especies exóticas. Se instalaron pasarelas de madera y senderos para atravesar el sitio sin dañar la vegetación (Figura 30). Es importante señalar que esta área de playa delante de la duna natural conservada no presenta problemas de erosión y es ampliamente utilizada por los huéspedes.

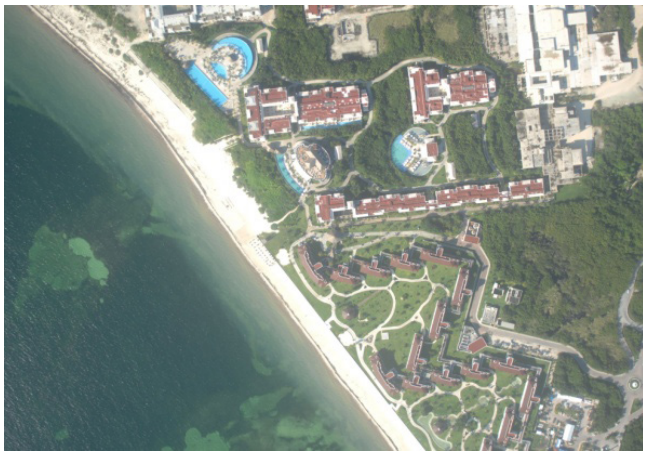


Figura 29. *Fotografía aérea de las dos etapas de consrucción. La primera etapa en parte inferior de la imagen (playa norte) y la segunda etapa construida detrás de la duna en la parte superior de la imagen. Fotografía: Archivo Conanp (2013).*





Figura 30. *Segunda etapa de construcción en el Hotel Moon Palace. A) Área de playa, duna revegetada y construcciones detrás de la duna; B) Sendero con camino serpenteante que evita la erosión por acción del viento; C) Pasarela sobre la vegetación. Fotografías: Vanessa Francisco.*



Caso de estudio 4.
Reciclando dunas en Sisal, Yucatán

Localidad

Puerto Sisal, Yucatán
Latitud: 21° 09′ 55′′ N
Longitud: 90° 02′ 33.03′′ O

Objetivos del proyecto

1. Reforestar a través de la restauración activa y pasiva para recuperar 4,500 m² de dunas mediante la siembra de aproximadamente 13,000 plantas nativas, con el fin de aumentar la cobertura vegetal en 10%-15%.

2. Reconectar las islas de vegetación para recuperar las funciones naturales al incrementar la abundancia y riqueza de plantas; fomentar la polinización, la llegada de aves migratorias, tortugas y otros organismos, así como aumentar el valor paisajístico de las dunas costeras.

3. Incentivar el uso de plantas nativas en la comunidad con la construcción de un invernadero y la germinación, el cuidado y el crecimiento de ejemplares para la reforestación en el área de intervención.

4. Impulsar la cultura del reciclaje mediante la recolecta de materia orgánica para la producción de composta y la reutilización de 200 kg de botellas PET en la construcción del vivero, y como macetas en el proceso de reproducción de plantas. Todo esto promovido a través del diseño de trípticos y en actividades educativas.

Breve descripción del proyecto

Este proyecto surge como una iniciativa estudiantil para trabajar de la mano de la comunidad local y académicos de la UMDI-Sisal, con el objetivo de recuperar los servicios ecosistémicos de las dunas costeras a través de la reforestación, impulsando el reciclaje y la cultura de la protección ambiental. Asimismo, pretende difundir la importancia de las dunas costeras como parte del patrimonio natural del país a través de medios audiovisuales e impresos, así como de pláticas y talleres que impacten tanto a la comunidad como a los visitantes.

El enfoque del proyecto es multidisciplinario y está basado en: a) Fase administrativa y de coordinación con instituciones locales: comisario ejidal, asociaciones civiles, sector académico y comunidad en general, b) Comunicación: con la educación ambiental mediante el uso de redes sociales, infografías, carteles, videos y pláticas con la comunidad, c) Reforestación de las dunas costeras, y d) Apoyo comunitario: compra de PET a la comunidad de mujeres.

Área de restauración antes



Figura 31. *Vista del área antes de la revegetación. Fotografía: Reciclando Dunas.*

Área de restauración después



Figura 32. *Vista del área después de la revegetación. Fotografía: Reciclando Dunas.*

Condiciones del área antes de la rehabilitación

La localidad de Sisal se encuentra rodeada por dos Áreas Naturales Protegidas estatales: El Palmar y Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán. Esto permite que la zona presente un estado de conservación que va de regular a bueno. Sin embargo, actualmente existe un aumento en el número de visitantes y nuevos residentes, que generan una pre-

sión mayor que impacta las playas y dunas costeras de la localidad, principalmente por la compactación de arena por pisoteo, la apertura de caminos nuevos, el paso de vehículos motorizados y la fragmentación y el desmonte de la vegetación para dar lugar a construcciones de casas de descanso cerca de la playa.

Diagnóstico y diseño de la intervención

Se realizaron recorridos en las áreas de interés para restaurar. Por medio de la observación, se determinaron aquellas deforestadas que cambiarían su cobertura a un uso de suelo humano (caminos, construcciones). En estas zonas y en los bordes de caminos aledaños a la duna se realizó un rescate de propágulos de plantas remanentes y semillas para la recuperación de material biológico, el cual fue transportado al invernadero de la UMDI-Sisal para resguardo, germinación, crecimiento y cuidado; se sembró en suelo orgánico producido por compostaje para comenzar el proceso. Algunas semillas fueron escarificadas mecánica o químicamente (*Canavalia rosea*, *Ipomoea pescaprae*, *Chrysobalanum icaco y Scaevola plumieri*) para lograr su brote en el invernadero.

Intervenciones físicas realizadas (p. ej. trasladar arena, construir muros, instalar retenedores, etc.)

Se construyeron estructuras de protección para evitar el pisoteo y el paso de vehículos, con el fin de conservar la vegetación y la morfología natural de las dunas costeras. Se instalaron corrales de madera con cuerda y postes de PVC de despojo y con postes de bambú desechados por los pescadores. Estas estructuras permiten la regeneración natural de la vegetación y dirigir el paso peatonal hacia la playa y al mar, lo cual evita el tránsito de peatones y vehículos. Esto, con el fin de lograr la protección de las áreas y fomentar que los usuarios respeten caminos y brechas para la recuperación del ecosistema de manera natural. Posteriormente, en los sitios ya delimitados se sembraron plantas nativas para rehabilitar las áreas desprovistas de vegetación.

Proceso utilizado para la plantación

La zona se ubica entre la duna primaria y secundaria, en un pasillo paralelo a la línea de costa a unos 50 metros de la marea alta. El sitio a restaurar se limpió de basura (principalmente plásticos) y residuos orgánicos encontrados. Las semillas colectadas se germinaron, y los esquejes se mantuvieron en el invernadero hasta alcanzar una talla óptima para el trasplante; posteriormente fueron llevados al campo para ser sembrados.

Se trazaron dos transectos separados entre sí un metro, y en cada vértice, con un metro de distancia, se sembraron las plantas. Se excavaron hoyos de 40 cm de profundidad según el tamaño de la raíz (Figura 33).

La vegetación que se plantó es principalmente de tipo pioneras formadoras de dunas y rastreras (*Ipomea presca-prae, Sesuvium portulacastrum, Croton punctatus, Canavalia rosea, Blutaparon vermiculare, Cakile edentula, y Passiflora foetida*), pastos (*Distichlis spicata*) y algunas cactáceas (*Opuntia stricta*), agaves (*Agave angustifolia*), así como plantas de matorral arbustivas (*Scaevola plumieri, Coccoloba uvifera, Hymenocallis littoralis, Suriana maritima y Tourneforthia gnaphalodes*).

Mantenimiento, protección y monitoreo llevado a cabo

Para protección, el área de reforestación fue acordonada con postes de bambú o de PVC y se instalaron carteles de señalización con recomendaciones para la protección de las plantas (Figura 34). Para su cuidado, se realizaron riegos semanales en campo durante tres semanas y se mantuvo un control de supervivencia. Para monitoreo, se realizaron vuelos periódicos de dron para supervisar el cambio del paisaje en las dunas costeras. Para difusión, se impartieron pláticas de forma personal, así como cápsulas informativas que permiten que la población y los visitantes estén enterados de las acciones que se llevan a cabo. El comisariado ejidal realizó actividades de vigilancia.



Figura 33. *Revegetación con plantas pioneras nativas de duna costera. Fotografía: Tatiana Meza.*



Figura 34. *Protección de las áreas restauradas y señalización. Fotografía: Gabriela Mendoza.*


Fotografía: Calina Zepeda

GLOSARIO

GLOSARIO

Abiótico. Elemento o sustancia formada por compuestos inorgánicos y orgánicos básicos, junto con minerales y aleaciones que forman la tierra, el agua o el aire, que se encuentra desprovista de vida.

Aclimatación. Proceso de un individuo en el que desarrolla la capacidad de sobrevivir a un ambiente nuevo o recién colonizado, o a nuevas condiciones ambientales a lo largo de su vida.

Acreción. Deposición de arena en la playa o duna, es decir, lo contrario de la erosión.

Antrópico. Perteneciente o relativo a los humanos.

Ambiente. Conjunto de procesos y funciones con los que se desarrolla y opera un ecosistema.

Arvense. Plantas generalmente llamadas "malas hierbas", que crecen en los sistemas perturbados, cultivos o en competencia con la vegetación sostenida por el hombre.

Aspersión marina. Esparcimiento de agua marina a manera de gotas finas debido al efecto del oleaje y viento.

Azolvamiento. Depositación de arena en el fondo marino resultado de la energía del oleaje y las corrientes cerca de la costa.

Balance sedimentario. Concepto cuantitativo de un proceso geomorfológico en el que se consideran todos los volúmenes de sedimento que entran y salen a lo largo del tiempo en un tramo físico previamente definido.

Barlovento. Parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado en el mar.

Batimetría. Estudio de las profundidades oceánicas mediante el trazado de mapas de isóbatas, así como de la distribución de animales y vegetales marinos en sus zonas isobáticas.

Biodegradable. Materiales, sustancias o productos que pueden degradarse por acción biológica. Al exponerse a los elementos, son fácilmente descompuestos por bacterias de putrefacción, hongos carnosos y otros organismos saprobios.

Biótico. Relativo a los seres vivos.

Colonización. Establecimiento de los organismos en espacios nuevos.

Comunidad (ecológica). Conjunto de especies que coinciden en un lugar y momento determinados pero que difieren en sus relaciones filogenéticas y usan diferentes tipos de recurso.

Conectividad. Se utiliza para describir la conexión entre diferentes parches o fragmentos en áreas naturales o la presencia de corredores biológicos, los cuales permiten el intercambio o el flujo de organismos.

Cordón dunar. Acumulación de arena con vegetación pionera asociada, conformada principalmente por el sistema primario de dunas, que se forma con la deposición de arena procedente de la playa mediante la acción del viento y por sedimento marino mediante la acción de las olas.

Cresta dunar. Zona de mayor elevación de la barra longitudinal de una duna.

Criba. Aparato mecánico que se emplea para cribar semillas, es decir, separar semillas o materiales de un sustrato.

Degradación. Modificación del ecosistema causada por una perturbación natural o antrópica; generalmente implica alteraciones ambientales severas, reduce la biodiversidad y los flujos de bienes y servicios ecosistémicos.

Dinámica sedimentaria. Procesos simultáneos que conducen el transporte neto de sedimento tierra adentro o mar adentro, y a lo largo de la costa. Este transporte de sedimento es generado por las corrientes oscilatorias asociadas a las olas y sus rompimientos. La dirección de este movimiento de sedimento depende del balance de todas las fuerzas sobre el sedimento, como las olas, las corrientes y la marea.

Duna. Depósitos de arena formados por la acción del viento como resultado de la elevación, transporte y deposición de granos de arenas

Duna costera. Formaciones arenosas de origen eólico que se desarrollan a lo largo de cualquier costa donde haya suficiente sustrato suelto y que sea susceptible de ser transportado por la acción del viento. Presentan una altura variable, desde menos de un metro hasta centenares de metros. Se encuentran detrás de la zona de la playa donde llegan las mareas más altas.

Duna embrionaria. Aquella cuya formación está dando inicio; se forman pequeños montículos de arena dispersos en la zona entre la línea de marea más alta y la base del primer cordón de dunas, fijados por vegetación pionera (especies de plantas tolerantes a la salinidad, estrés hídrico y enterramiento).

Duna estabilizada. Duna totalmente cubierta de plantas cuya arena permanece inmóvil. Esta clasificación es en función de su estabilidad.

Duna frontal. Montículos de arena relativamente pequeños y aislados; generalmente se encuentran más cercanos al mar y se distribuyen de manera paralela a la costa. Su formación da inicio cuando la arena transportada por el viento queda atrapada por la vegetación que crece en la playa, o bien por otros obstáculos que se pueden encontrar en el lugar.

Duna móvil. Duna que carece de vegetación; está expuesta al viento constante y adquiere una gran movilidad. Esta clasificación es en función de su estabilidad.

Duna semimóvil. Duna que, al estar parcialmente cubierta por vegetación, merma su movilidad. Esta clasificación se realiza en función de su estabilidad.

Ecosistema. Totalidad de los organismos (comunidades) de un área determinada que actúa en reciprocidad con el medio físico, de modo que una corriente de energía conduzca de una estructura trófica a una diversidad biótica y a ciclos biogeoquímicos.

Ecosistema de referencia. Ecosistema modelo en que se basan los objetivos o metas de un proyecto de restauración ecológica (p. ej., diversidad, riqueza y abundancia de especies vegetales o animales, calidad de suelo, calidad de agua, etc.). Pueden ser Áreas Naturales Protegidas, descripciones ecológicas de ecosistemas sanos ya existentes.

Eólico. Algo producido o accionado por la acción del viento.

Erosión costera. Pérdida o desplazamiento de tierra a lo largo de la costa debido a la acción de olas, corrientes, mareas, agua impulsada por el viento o impactos de tormentas. Se considera un proceso natural y es responsable de la reducción de las playas y el retroceso de las dunas, pero también puede ser inducido por causas antrópicas.

Escarificación. Desgaste de la cubierta de las semillas que permite la entrada de agua a los tejidos para que éstas puedan germinar.

Escollera o espigón. Estructura de protección costera para disminuir el efecto del oleaje.

Especie (ecológica). Generalmente hace referencia a la categoría base en la clasificación de los organismos vivos en relación con su capacidad reproductiva. Una especie es aquella en la que sus miembros pueden reproducirse entre ellos y cuya descendencia es fértil.

Especie exótica. Especie no nativa introducida accidentalmente o deliberadamente a un nuevo hábitat.

Especie exótica-invasora. La legislación mexicana (DOF, 2016) define la especie exótica invasora como aquella especie o población que no es nativa; que se encuentra fuera de su ámbito de distribución natural; que es capaz de sobrevivir, reproducirse y establecerse en hábitats y ecosistemas naturales, y que amenaza la diversidad biológica nativa, la economía y la salud pública.

Especie introducida. Especie establecida por la acción humana en un área fuera de su rango de distribución natural.

Especie invasora. Especie no nativa que se ha establecido en una nueva área fuera de su rango de distribución natural y que ocasiona alteraciones de la biodiversidad, pérdidas económicas o riesgos para la salud.

Especie nativa. Especie con aparición comprobada en una región biogeográfica, sin que haya sido introducida por la acción del hombre o que ya estuviera presente antes del periodo Neolítico, o de otro periodo histórico elegido como referencia.

Especie naturalizada. Especie introducida que se integra a la comunidad y al funcionamiento natural de un ecosistema; es decir, puede interactuar con otras especies nativas y reproducirse sin alterar drásticamente el funcionamiento natural de dicho ecosistema.

Esqueje. Unidad reproductora que en condiciones óptimas es capaz de formar un nuevo individuo clonal a partir de una planta madre. Éste se puede obtener separando un segmento que contenga zonas meristemáticas (nudos y entrenudos).

Estaca. Unidad reproductora proveniente de plantas leñosas, que en condiciones óptimas es capaz de formar un nuevo individuo clonal a partir de una planta madre.

Estratigrafía. Estudio de los componentes rocosos y sedimentarios de la tierra, los cuales se depositan en capas superpuestas y se denominan estratos. También estudia la correlación de los procesos geológicos de la Tierra.

Fragmentación. Interrupción de la continuidad espacial y funcional del hábitat. Resulta de la restricción de flujos biológicos en el paisaje, lo que lleva a poblaciones naturales de especies nativas al aislamiento reproductivo, a la restricción de migración y a mayor vulnerabilidad a disturbios que, juntos, comprometen la conservación de la biodiversidad a mediano y largo plazo. La fragmentación amplía las áreas bajo los efectos de borde, reduciendo la cantidad de hábitat adecuado a especies más sensibles y variaciones ambientales. Las intervenciones como la implantación o mejora de corredores y trampolines ecológicos, cambios del uso de la tierra en la matriz entre las unidades de paisajes que están aislados, entre otros, pueden revertir los efectos de la fragmentación.

Geomorfología. Ciencia que estudia las formas de la superficie terrestre, incluidas las que se encuentran cubiertas por el agua (océano, lagos, ríos y glaciares). Abarca la descripción morfológica, origen, desarrollo, dinámica, estructura, proyecciones a futuro y su relación con la actividad humana. Cuando estudia la formación y la dinámica actual de la zona costera de mares y océanos, y comprende aspectos geológico-geomorfológicos, hidrotécnicos e hidrográficos entre el mar y tierra firme, se le denomina geomorfología costera.

Hábitat. Medio ambiente en el cual vive un organismo.

Indicadores (ecológicos). Variables que pueden ser medidas con facilidad y precisión para el monitoreo de las alteraciones en la biodiversidad o en los procesos ecológicos del ecosistema en restauración, a lo largo de su trayectoria, en relación con el estado deseado o estado inicial documentado en un proyecto de restauración ecológica.

Infraestructura permanente. Construcciones edificadas con cimientos de concreto, difíciles de remover.

Intrusión salina. Movimiento temporal o permanente del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce.

Isla de barrera. Depósito sedimentario paralelo a la línea de costa que se forma cuando el sedimento es transportado por el oleaje.

Litificados. Que se encuentran transformados en roca (petrificados).

Manejo adaptativo. Es la restauración ecológica, comprende intervenciones deliberadas en el ecosistema durante su trayectoria, con el objetivo de superar filtros o barreras que dificulten su evolución hacia el estado deseado.

Micorriza. Asociación simbiótica de una planta con el micelio de un hongo.

Mitigar. Acción cuyo objetivo es minimizar los impactos o daños ambientales inevitables previstos para un desarrollo.

Monitoreo. Consiste en la aplicación de indicadores para verificar si los objetivos o metas en cada etapa de la restauración están cumpliéndose.

***Mulch*.** Es un tipo de recubrimiento protector que se extiende sobre la superficie del suelo para retener la humedad, crear humus, controlar la temperatura, mantener los nutrientes y evitar la erosión. Puede ser de origen orgánico (hojas, paja, hierba cortada, cartón, papel, algas marinas, estiércol degradado, aserrín, etc.) en estado de descomposición, pero en ocasiones puede contener materiales inorgánicos en pequeñas proporciones.

Nortes. Temporada climática que en la PY se caracteriza por la presencia de fuertes vientos provenientes del noreste (50-90 km/h) y algunas precipitaciones, asociados a frentes polares, y que ocurren de noviembre a febrero.

Nutrientes. Sustancia o elementos que se encuentran naturalmente en los suelos, o que se pueden agregar; son necesarios para el óptimo crecimiento y desarrollo de plantas sanas, así como para su reproducción.

Parasitado(a). Individuo vegetal o animal que es atacado o consumido por un organismo parásito.

Perfil topográfico. Representación de una porción de la superficie terrestre, la cual se representa por medio de un sistema de coordenadas de *X* (distancia horizontal) y *Y* (puntos expresados en altitud). Este perfil se construye con mediciones en el terreno o nivelación o mediante un mapa topográfico.

Perturbación. Disturbio controlado donde se conocen el efecto y las consecuencias generadas sobre el ecosistema.

Petrificadas. Que se encuentra convertida en piedra (litificada).

Planta herbácea. Planta que no está lignificada, al contrario que una leñosa.

Planta hospedera. Planta que acoge en su superficie un parásito, ya sea hongo, bacteria, nematodo, otra planta, entre otros.

Planta leñosa. Planta lignificada o perenne con tallo leñoso verdadero que contiene madera. Generalmente son árboles, arbustos, cactus o trepadoras perennes.

Planta perenne. Planta que vive más de tres años.

Plántula. Planta joven que creció a partir de una semilla.

Pleamar o marea alta. Nivel de la playa en que el agua de mar alcanza su máxima altura dentro del ciclo de las mareas.

Población (ecológica o natural). Grupo de individuos de la misma especie que habitan un área en particular.

Progradante. Que le gana terreno al mar mediante la depositación de materiales y sedimentos.

Propagación. Habilidad de las plantas que les permite multiplicarse y preservar su información genética. Puede ser sexual, por medio de semillas, o asexual, por medio de tejidos, estructuras o partes vegetales.

Propágulo. Cualquier parte de una planta que es capaz de originar una nueva planta o una población. Pueden ser semillas, yemas, esquejes, bulbos, cormos o tubérculos.

Reforestación. Plantación de árboles, nativos o no, en poblaciones puras o mixtas, para formación de una estructura forestal en un área que fue deforestada. Generalmente este tipo de plantación tiene fines de protección, producción o ambas.

Rehabilitación. Conjunto de técnicas y medidas que mejoran las funciones del ecosistema dañado pero que no llega a restaurarse.

Resiliencia. Capacidad de un ecosistema para absorber o resistir el efecto de perturbaciones, manteniendo su estructura y funcionamiento básicos. Si la resiliencia es sobrepasada, el ecosistema se vuelve vulnerable a los efectos de una perturbación (p. ej., cambio climático), lo cual limita su capacidad de recuperación y generación de servicios y bienes ambientales.

Restauración. Proceso y práctica de auxiliar la recuperación de un ecosistema (vegetación) que fue degradado, damnificado o destruido, a su carácter y condición original.

Revegetación. Restablecimiento de cubierta vegetal de cualquier naturaleza (independiente del origen, forma de vida o número de especies) en un terreno deforestado.

Semilla. Órgano de propagación sexual a través del cual ciertas especies vegetales se dispersan y son capaces de colonizar diferentes ambientes.

Servicios ecosistémicos. Procesos y funciones de los ecosistemas que proveen beneficios a la sociedad humana.

Solarización. Útil para la desinfección de suelos y deshidratación de estructuras vegetales. Se utiliza la radiación solar para eliminar organismos patógenos y/o evitar la reproducción de estructuras vegetales no deseadas. Con la ayuda del sol y una bolsa plástica, se genera un efecto invernadero que eleva la temperatura lo suficiente como para desecar estructuras vegetales, eliminar plagas y enfermedades.

Sotavento. Parte opuesta a aquélla de donde viene el viento con respecto a un punto o lugar determinado en el mar.

Sucesión ecológica. Proceso dinámico que modifica los ecosistemas y los establece a lo largo del tiempo a través de cambios progresivos de la comunidad biótica en un ecosistema.

Surada. Vientos fuertes provenientes del sur y sureste con rachas mayores a 60 km/h que pueden presentarse a lo largo del año. Son favorecidos por sistemas anticiclónicos y se caracterizan por propiciar ambientes cálidos y no estar acompañados por precipitaciones. En México afectan principalmente a Veracruz, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Técnica. En restauración ecológica hace referencia al conjunto de medidas o acciones que provienen de la ingeniería o de cualquier campo del conocimiento, que sirve para mitigar los factores limitantes y eliminar o controlar los factores adversos.

Transporte de sedimentos. Movimiento de sedimento de un sitio a otro por efecto del oleaje, las corrientes marinas y la marea.

Tubo geotextil. Estructuras hidráulicas que se manufacturan con geotextiles tejidos de alta resistencia y se llenan por medios hidráulicos con una mezcla fluida de agua y suelo dragado o bombeado. También son llamados geomembrana o geotubo, y se utilizan, en su mayoría, en aplicaciones marinas y fluviales para construir obras de control de erosión, encauzamiento, defensa y protección.

Vegetación de dunas costeras. Vegetación halófila que se desarrolla en suelos con alto contenido de sales solubles, que puede asumir formas florísticas, fisonómicas y estructurales muy diversas. Esta comunidad vegetal es muy rica en cuanto a número de especies, a la fecha se han registrado 271 en el litoral de la PY.

Vegetación nativa. Vegetación originaria del sitio, anterior a la acción de restauración.



Fotografía: Vanessa Francisco

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo-Rodríguez, P. y Strong, M. T. (2012). Catalogue of Seed Plants of the West Indies. *Smithsonian Contributions to Botany, 98,* 1-1192.

Aguayo-Camargo, J. E. (2005). Neotectónica y facies sedimentarias cuaternarias en el suroeste del golfo de México, dentro del marco tectono-estratigráfico regional evolutivo del sur de México. *Ingeniería, investigación y tecnología, 6*(1), 19-45.

Aguilar-Garavito, M. y Ramírez, W. (Eds.; 2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Amador, E. y Moreno-Casasola, P. (2006). Turismo alternativo en los municipios costeros: en búsqueda de un desarrollo sustentable. En P. Moreno y A. Peres, *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal* (vol. 3) (pp. 971-988). Xalapa: Instituto de Ecología, A. C./Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Semarnat)/Gobierno del Estado de Veracruz.

AXISIMA (2017). Regeneración de duna costera en Las Coloradas, Yucatán (2005). Recuperado de http://axisima.com/estabilizacion-de-duna-costera-con-tubos-geotextiles/ el 8 de diciembre del 2020.

Barbour, M. G. (1992). Life at the Leading Edge: The Beach Plant Syndrome. En *Coastal Plant Communities of Latin America* (pp. 291-307). Academic Press.

Bejarano, F., Aguilera-Márquez, D., Márquez, J., Álvarez-Solís, J., Arámbula, E., Arellano-Aguilar, O., Bastidas, P., Beltrán, V., Bernardino, H., Betancourt-Lozano, M., Calderón, C., Castillo, J., Cadena, C., Colin, M., Flores, D., García, J., Gómez, I., Herrera, C., Hinojosa-Garro, D., Leyva, G., Leyva, J., López, J., Mariaca, R., Martínez, I., Mendoza, L., Montenegro, L., Montero, R., Navarro, H., Beutelspacher, A., Ortega, N., Ortega, L., Pérez, M., Rendón, J., Torres, A., Tristán, E., Vandame, R. y S. Waliszewski. 2017. Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A. C. (RAPAM). México. 351 p.

Bird, E. C. F. (2008). *Costal Geomorphology: An Introduccion*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Blancas, G., Rubio, T. y Santos, G. (2011). *Control de la especie invasora* Casuarina equisetifolia *(pino australiano) en el APFF Manglares de Nichupté*. México: Semarnat.

Burton, F.J. (2008). *Threatened Plants of the Cayman Islands: The Red List.* Reino Unido: Royal Botanic Gardens, Kew.

Cabrera, M. y Ramírez, W. (Eds.; 2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia: transformación y herramientas para su conservación*. Bogotá: Instituto Alexander von Humboldt.

Camacho, R., Salazar, S., González, L., Pacheco, H. y Suárez, C. (2011). Caracterización geomorfológica de las dunas longitudinales. *Investigaciones Geográficas*. *Boletín del Instituto de Geografía, 76,* 7-19.

Carr, A. P. (1982). Sediment Size Classification. En *Beaches and Coastal Geology. Encyclopedia of Earth Science*. Boston: Springer. Recuperado de https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1_406

Castillo, J. M., Fernández□Baco, L., Castellanos, E. M., Luque, C. J., Figueroa, M. E. y Davy, A. J. (2000). Lower Limits of *Spartina densiflora* and *S. maritima* in a Mediterranean Salt Marsh Determined by Different Ecophysiological Tolerances. *Journal of Ecology, 88*(5), 801-812.

Chan, E. y Elevitch, C. R. (2006). *Cocos nucifera* (coconut). *Species Profiles for Pacific Island Agroforestry, 2,* 1-27.

Chapman, M. G. y Underwood, A. J. (2011). Evaluation of Ecological Engineering of "Armoured" Shorelines to Improve their Value as Habitat. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 400*(1-2), 302-313.

Chapman, V. J. (1978). *Coastal Vegetation*. Oxford: Pergamon Press.

Clewell, A., Rieger, J. y Munro, J. (2005). *Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects*. Society for Ecological Restoration International.

Conanp (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2020). Lineamientos en Señalización Vigentes. Recuperado de https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=80687

Cooper, W. S. (1967). *Coastal Sand Dunes of California*. Washington: Geological Society of America.

Dean, R. G. (2005). Dynamic Equilibrium of Beaches. En M. L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*. Dordrecht: Springer.

Di Sacco, Alice & Way, Michael & Leon, Pedro & Suárez-Ballesteros, Carlos & Diaz, Jeniffer. (2020). Manual de recolección, proce-

samiento y conservación de semillas de plantas silvestres. 10.34885/175.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (9 de diciembre de 2008). NOM-017-STPS-2008. Equipo de protección personal. Selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (30 de diciembre de 2010). NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio Lista de especies en riesgo.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2016). Lista de las Especies Exóticas Invasoras para México. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464456&fecha=07/12/2016

Durán, R., Torres, W. y Espejel, I. (2010). La vegetación de la duna costera del estado de Yucatán. En R. Durán, M. Méndez y J. Arellano (Eds.), *Diversidad biológica y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 136-137). México: CICY/Seduma/PNUD/Conabio. Recuperado de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap3/04%20Vegetacion%20de%20dunas.pdf

Espejel, I. (1992). Coastal Sand Dune Communities and Soil Relationships in the Yucatan Peninsula, Mexico. En *Coastal Plant Communities of Latin America* (pp. 323-335). Academic Press.

Everard, M., Jones, L. y Watts, B. (2010). Have We Neglected the Societal Importance of Sand Dunes? An Ecosystem Services Perspective. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems, 20,* 476-487.

Flores, J. S. y Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán.* México: Universidad Autónoma de Yucatán-Dirección General de Extensión/Fondo Nacional de Fomento al Turismo. Recuperado de http://www.fonatur.gob.mx

Fonatur (Fondo Nacional de Fomento al Turismo) (1982). *Cancún. Un desarrollo turístico en la costa turquesa.* México: Fonatur.

Funes-Izaguirre, J. L. P. (2021). Análisis legal para la implementación en Quintana Roo de proyectos de rehabilitación de dunas costeras. Informe final de consultoría GITEC-IGIP GmbH. Proyecto Adaptación al Cambio Climático basada en Ecosistemas con el sector turismo (Adaptur). GIZ.

Gallego-Fernández, J. B., García, M. R. y Ley, C. (2003). Restauración de ecosistemas dunares costeros. En *Restauración de ecosistemas mediterráneos* (pp. 157-171). Alcalá de Henares: Asociación Española de Ecología Terrestre.

Gallego-Fernández, J. B. y Martínez, M. L. (2011). Environmental Filtering and Plant Functional Types on Mexican Foredunes along the Gulf of Mexico. *Ecoscience, 18*(1), 52-62.

Gallego-Fernández, J. B., Sánchez, I. A. y Ley, C. (2011). Restoration of Isolated and Small Coastal Sand Dunes on the Rocky Coast of Northern Spain. *Ecological Engineering, 37,* 1822-1832.

García-Sánchez, G., Mancho, A. M., Ramos, A. G., Coca, J., Pérez-Gómez, B., Álvarez-Fanjul, E., Sotillo, M. G., García-León, M., García-Garrido, V. J. y Wiggins, S. (2021). Very High Resolution Tools for the Monitoring and Assessment of Environmental Hazards in Coastal Areas. *Frontiers in Marine Science, 7,* 1237.

Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapur: World Scientific Publishing Company.

González, J. L. y Sandoval, M. F. D. (2017). Caracterización de oleaje frente a la costa de Sisal Yucatán. En J. R. G. Pérez e I. I. Lema, *Caracterización multidisciplinaria de la zona costera de Sisal, Yucatán* (pp. 30-39). Yucatán: LANRESC.

Grafals-Soto, R. (2010). *Understanding the Effects of Sand Fence Usage and the Resulting Landscape, Landforms and Vegetation Patterns*: *A New Jersey Example*. Disertación doctoral. Rutgers University-Graduate School, Nuevo Brunswick.

Grafals-Soto, R. y Nordstrom, K. (2009). Sand Fences in the Coastal Zone: Intended and Unintended Effects. *Environmental Management, 44*(3), 420-429.

Guido-Aldana, P., Ramírez-Camperos, A., Godínez, L., Cruz-León, S. y Juárez-León, A. (2009). Study of Coastal Erosion in Cancun and Riviera Maya, Mexico. *Avances en recursos hidráulicos, 20,* 41-56.

Hernández-Mendoza, V., Mendoza-González, G., Rosales-Juárez, C., Zepeda-Centeno, C. y Francisco-Ramos, V. (2020). *Guía de buenas prácticas para el manejo de plantas de duna costera en vivero.* The Nature Conservancy.

Herrick, J. E., Schuman, G. E. y Rango, A. (2006). Monitoring Ecological Processes for Restoration Projects. *Journal for Nature Conservation, 14*(3-4), 161-171.

Hesp, P. (2000). *Coastal Sand Dunes*: *Form and Function* (Technical Bulletin No. 4). Rotorua: Coastal Dune Vegetation Network-Forest Research Institute/Massey University.

Hesp, P. A. (2002). Foredunes and Blowouts: Initiation, Geomorphology and Dynamics. *Geomorphology, 48*, 245-268.

Holl, K. D. y Howarth, R. B. (2000). Paying for Restoration. *Restoration Ecology, 8*(3), 260-267.

Holmes, T. P., Bergstrom, J. C., Huszar, E., Kask, S. B. y Orr, F., III. (2004). Contingent Valuation, Net Marginal Benefits, and the Scale of Riparian Ecosystem Restoration. *Ecological Economics, 49,* 19-30.

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Infante-Manta, D. y Rodríguez-Revelo, N. (2014). Usos de las dunas y situación actual. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México*. México: Comisión Nacional Forestal.

Kairo, M., Ali, B., Cheesman, O., Haysom, K. y Murphy, S. (2003). *Invasive Species Threats in the Caribbean Region.* Report to the Nature Conservancy.

Keenleyside, K. A., Dudley, N., Cairns, S., Hall, C. M. y Stolton, S. (2014). *Restauración ecológica para Áreas Protegidas: Principios, directrices y buenas prácticas*. Gland: UICN.

Kilfoyle, A. K. (2017). *Exploring the Potential for Artificial Reefs in Coral Reef Restoration: Responses and Interactions of Associated Biota to Varying Experimental Treatments in the Mexican Caribbean.*

Ley, C. (2012). Restauración de dunas: el caso español. En A. Rodríguez, G. X. Pons, R. X. Roig-Munar, J. Á. Martín-Prieto, M. Mir-Gual y J. A. Cabrera (Eds.), *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa* (pp. 141-157). Palma de Mallorca: Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears.

Ley, C., Gallego-Fernández, J. B. y Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Santander: Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino-Dirección General de Costas del Gobierno de España.

Lithgow, D., Martínez, M. L. y Gallego-Fernández, J. B. (2013). Multicriteria Analysis to Implement Actions Leading to Coastal Dune Restoration. En M. L. Martínez, J. B. Gallego-Fernández y P. A. Hesp (Eds.), *Coastal Dune Restoration* (pp. 307-321). Springer Series on Environmental Management.

Lithgow, D., Martínez, M. L. y Gallego-Fernández, J. B. (2015). The "ReDune" Index (Restoration of Coastal Dunes Index) to Assess the Need and Viability of Coastal Dune Restoration. *Ecological Indicators, 49,* 178-187.

Lithgow, D., Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., Hesp, P. A., Flores, P., Gachuz, S., Rodríguez-Revelo, N., Jiménez-Orocio, O., Mendoza-González, G. y Álvarez-Molina, L. L. (2013). Linking Restoration Ecology with

Coastal Dune Restoration. *Ecological Indicators, 199,* 178-187.

Lithgow, D., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Infante-Mata, D. y Jiménez-Orocio, O. (2014). La restauración de dunas costeras. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.). *Diagnóstico general de las dunas costeras de México* (pp. 105-118). México: Conafor-Semarnat.

López, I., Chagollan, F., Del Campo, J., García, R., Contreras, I. y García, R. (2006). *Ecología*. México: Umbral Editorial.

López, R. (2014). Beach Restoration at Grand Velas Hotel, Riviera Maya, Mexico. *Journal of Coastal Research, Special Issue, 71,* 86-92.

López-Rosas, H., Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, D. M. y Espejel, I. (2014). Diagnóstico por estado: Campeche. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México* (pp. 169-180). México: Comisión Nacional Forestal.

Luna, M., Parteli, E., Durán, O. y Herrmann, H. J. (2011). Model for the Genesis of Coastal Dune Fields with Vegetation. *Geomorphology, 129,* 215-224.

Luna Gómez, A., Camacho Cruz, A., Castañeda Ocaña, H., González Espinosa, M., Martínez Icó, M., Ramírez Marcial, N. y Holz, S. (2011). *Guía de propagación de árboles nativos para la recuperación de bosques.* San Cristóbal de las Casas: El Colegio de la Frontera Sur.

Martin, D., Bertasi, F., Colangelo, M. A., De Vries, M., Frost, M., Hawkins, S. J., Macpherson, E., Moschella, P. S., Sattaa, M. P., Thompson, R. C. y Ceccherelli, V. U. (2005). Ecological Impact of Coastal Defence Structures on Sediment and Mobile Fauna: Evaluating and Forecasting Consequences of Unavoidable Modifications of Native Habitats. *Coastal Engineering, 52*(10-11), 1027-1051.

Martínez, M. L., Lithgow, D., Vázquez, G. y García-Franco, J. G. (2016). Diagnóstico de las necesidades y probabilidades de restauración en las dunas costeras de Quintana Roo, México. En Ceccon y Martínez-Garza (Eds.), *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (pp. 409-431). México: UNAM-Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias-Universidad Autónoma del Estado de Morelos-Conabio.

Martínez, M. L. y Moreno-Casasola, P. (1996). Effects of Burial by Sand on Seedling Growth and Survival in Six Tropical Sand Dune Species. *Journal of Coastal Research 12*(2), 406-419.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Infante-Mata, D. y Rodríguez-Revelo, N. (2014). *Diagnóstico de las dunas costeras de México*. México: Conafor.

Martínez, M. L., Valverde, T. y Moreno-Casasola, P. (1992). Germination Response to Temperature, Salinity, Light and Depth of Sowing of Ten Tropical Dune Species. *Oecologia, 92*(3), 343-353. DOI: 10.1007/bf00317460

Maun, M. A. (1998). Adaptations of Plants to Burial in Coastal Sand Dunes. *Canadian Journal of Botany*, *76*(5), 713-738.

Maun, M. A. (2009). *The Biology of Coastal Sand Dunes*. Oxford University Press.

McLachlan, A. y Defeo, O. (2017). *The Ecology of Sandy Shores*. Academic Press.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington, D. C.: World Resources Institute.

Mendoza-González, G., Martínez M. L., Lithgow D., Pérez-Maqueo, O. y Simonin, P. (2012). Land Use Change and its Effects on the Value of Ecosystem Services Along the Coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics, 82*, 23-32.

Meyer-Arendt, K. J. (2001). Recreational Development and Shoreline Modification along the North Coast of Yucatan, Mexico. *Tourism Geographies, 3*(1), 87-104.

Miller, T., Gornish, E. y Buckley, H. (2010). Climate and Coastal Dune Vegetation: Disturbance, Recovery and Succession. *Plant Ecology, 206,* 97-104.

Molina, C., Rubinoff, P. y Carranza, J. (1998). *Normas prácticas para el desarrollo turístico de la zona costera de Quintana Roo, México*. Programa de Manejo Integrado de los Recursos Costeros en Quintana Roo, México. Amigos de Sian Ka´an.

Moreno-Casasola, P. (1986). Sand Movement as a Factor in the Distribution of Plant Communities in a Coastal Dune System. *Vegetatio, 65,* 67-76.

Moreno-Casasola, P. y Castillo, S. (1992). Dune Ecology on the Eastern coast of Mexico. En *Coastal Plant Communities of Latin America* (pp. 309-321). Academic Press.

Moreno-Casasola, P., Cejudo-Espinosa, E., Capistrán-Barradas, A., Infante-Mata, D., López-Rosas, H., Castillo-Campos, G., Pale, J. y Campos-Cascaredo, A. (2010). Composición florística, diversidad y ecología de humedales herbáceos emergentes en

la planicie costera central de Veracruz, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (87), 29-50.

Moreno-Casasola, P. y Espejel, I. (1986). Classification and Ordination of Coastal Dune Vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. *Vegetation, 66,* 147-182.

Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, D., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Martínez, M. L., Rodríguez-Revelo, N. y Monroy, R. (2014a). Diagnóstico por estado: Quintana Roo. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México* (pp. 253-264). México: Comisión Nacional Forestal.

Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, D., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Martínez, M. L., Rodríguez-Revelo, N. y Monroy, R. (2014b). Diagnóstico por estado: Yucatán. En M. L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, O. Jiménez-Orocio, D. Infante-Mata y N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México* (pp. 227-338). México: Comisión Nacional Forestal.

Moreno-Casasola, P., Infante-Mata, J., Laborde, D., Madero Vega, C. y Travieso, A. C. (2015). *Reforestación y enriquecimiento de especies arbóreas en los médanos. Guía práctica.* INECOL-OIMT.

Moreno-Casasola, P., Martínez, M. L. y Castillo-Campos, G. (2008). Designing Ecosystems in Degraded Tropical Coastal Dunes. *Ecoscience, 15,* 44-52.

Moreno-Casasola, P., van der Maarel, E., Castillo, S., Huesca, M. L. y Pisanty, I. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: Estructura y composición en el Morro de La Mancha, Ver. *Biótica, 7*(4), 491-526.

Navarro, M., Muñoz-Pérez, J. J., Román-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G. (2007). *Morphological Evolution in the Migrating Dune of Valdevaqueros (SW Spain) During an Eleven-Year Period. International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. Santander: Universidad de Cantabria.

Nee, M. (1983). Causarinaceae. En V. Sosa (Ed.), *Flora de Veracruz* (Fascículo 27). Xalapa: Instituto de Ecología.

Nordstrom, K. (2008). *Beach and Dune Restoration*. Cambridge University Press.

Nordstrom, K. F., Lampe, R. y Vandemark, L. M. (2000). Reestablishing Naturally Functioning Dunes on Developed Coasts. *Environmental Management, 25*(1), 37-51.

Nordstrom, K. F., Psuty, N. P. y Carter, R. W. G. (1990). *Coastal Dunes: Processes and Morphology.*

NSW Department of Land and Water Conservation (2001). *Coastal Dune Management*: *A Manual of Coastal Dune Management and Rehabilitation Techniques.* Newcastle: Coastal Unit-DLWC.

Ortega-Álvarez, R., Lindig-Cisneros, R., MacGregor-Fors, I., Renton, K. y Schondube, J. E. (2013). Avian Community Responses to Restoration Efforts in a Complex Volcanic Landscape. *Ecological Engineering, 53*, 275-283.

Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R. y Simons, A. (2009). Agroforestree Database: A Tree Reference and Selection Guide. Version 4. Recuperado de https://www.worldagroforestry.org/publication/agroforestree-database-tree-reference-and-selection-guide-version-40

Oviedo-Prieto, R., Herrera-Oliver, P., Caluff, M. G., Regalado, L., Ventosa-Rodríguez, I., Plasencia-Fraga, J. M., Oviedo, I. B., González-Gutiérrez, P. A., Pérez-Camacho, J., Hechavarría-Schwesinger, L., González-Oliva, L., Catasús-Guerra, L., Padrón-Soroa, J., Suárez-Terán, S. I., Echevarría-Cruz, R., Fuentes-Marrero, I. M., Rosa Angulo, R., Oriol Rodríguez, P., Bonet-Mayedo, W., Villate-Gómez, M., Sánchez-Abad, N., Begué-Quiala, G., Villaverde-López, R., Chateloin-Torres, T., Matos-Mederos, J., Gómez-Fernández, R., Acevedo, C., Lóriga-Piñeiro, J., Romero-Jiménez, M., Mesa-Muñoz, I., Vale-González, Á., Leiva, A. T., Hernández-Valdés, J. A., Gómez-Campo, N. E., Toscano-Silva, B. L., González-Echevarría, M. T., Menéndez-García, A., Chávez-Zorrilla, M. I. y Torres-Cruz, M. (2012). Lista nacional de especies de plantas invasoras y potencialmente invasoras en la República de Cuba, 2011 (National List of Invasive and Potentially Invasive Plants in the Republic of Cuba, 2011.). *Bissea: Boletín sobre Conservación de Plantas del Jardín Botánico Nacional de Cuba 6*(1), 22-96.

Packham, J. R. y Willis, A. J. (1997). *Ecology of Dunes, Salt Marsh and Shingle*. Springer Science & Business Media.

Patterson, J. (2005). *Dune Protection and Improvement Manual for the Texas Gulf Coas*t (5ª ed.). Texas General Land Office.

Potgieter, L. J., Richardson, D. M. y Wilson, J. R. U. (2014). *Casuarina*: Biogeography and Ecology of an Important Tree Genus in a Changing World. *Biological Invasions, 16*(3), 609-633.

Ramos-Zapata, J., Aldana-Blanco, R. y Guadarrama, P. (2017). Interacción planta-hongos benéficos en la restauración de la vegetación de duna costera. En J. Ramos-Zapata, V. Parra-Tabla, J. Leirana-Alcocer, A. González-Moreno y X. Chiappa-Carrara, X. (Eds.), *Ecología funcional*

de la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos (pp. 266-280). Mérida, Yucatán: Secretaría de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Estado de Yucatán/Parque Científico y Tecnológico de Yucatán-UADY-UNAM.

Ranwell, D. S. (1972). *Ecology of Salt Marshes and Salt Dunes*. Londres: Chapman and Hall.

Ranwell, D. S. y Boar, R. (1986). *Coastal Dune Management Guide*. Abbots Ripton-Norwich: Institute of Terrestrial Ecology.

Rentería, J. L., Atkinson, R. y Buddenhagen, C. (2007*). Estrategias para la erradicación de 21 especies de plantas potencialmente invasoras en Galápagos*. Ecuador: Fundación Charles Darwin-Departamento de Botánica-Programa de Especies Invasoras en Galápagos.

Rodrigues, R. S., Mascarenhas, A. y Jagtap, T. G. (2011). An Evaluation of Flora from Coastal Sand Dunes of India: Rationale for Conservation and Management. *Ocean & Coastal Management 54*, 181-188.

Sallenger, A. H., Jr. (2000). Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 890-895.

Sánchez, O. (2005). Restauración ecológica: algunos conceptos, postulados y debates al inicio del siglo XXI. En O. Sánchez, E. Peters, R. Márquez, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (Eds.), *Temas sobre la restauración ecológica* (pp. 15-30). México: Instituto Nacional de Ecología-U. S. Wildlife Services y Unidos para la Conservación, A. C.

Secaira, F. y Acevedo, C. (2017). *Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa. Serie técnica. El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas en su condición actual*. México: The Nature Conservancy.

Secretaría de Economía del Estado de Quintana Roo (2014). Información Económica y Estatal. 16 de julio 2018, de la SE del gobierno del estado de Quintana Roo. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/43822/Quintana_Roo.pdf

Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2013). *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias.* México: Semarnat.

SER (Society for Ecological Restoration), International Science Policy Working Group. (2004). Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Tucson, Arizona: Society for Ecological Restoration International. Recuperado de www.ser.org

Silva, R., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vázquez, G., Martínez-Martínez, R. E., Monroy-Ibarra, R., Cáceres-Puig, J. I., Ramírez-Hernández, A. y Boy-Tamborell, M. (2017). *Aspectos generales de la zona costera*. México: UNAM/INECOL.

Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E. y Feagin, R. A. (2016). Response of Vegetated Dune-Beach Systems to Storm Conditions. *Coastal Engineering, 109,* 53-62.

Silva, R., Ruiz, G., Mariño Tapia, I., Posada, G., Mendoza, E. y Escalante, E. (2012). Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *CLEAN-Soil, Air, Water, 40*(9), 911-919.

SINAC (2016). Protocolo PRONAMEC: Protocolo para el monitoreo ecológico de playas arenosas ante el cambio climático: estudio de caso Refugio Nacional Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala. Proyecto Consolidación de las Áreas Marinas Protegidas. San José, Costa Rica: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y El Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

Timpson, C. D. y Stephens, T. C. (2018). Beach Development and Protection of Resort Coastline Using Geotextile Tubes. *Proceedings of the Western Dredging Association Dredging Summit & Expo '18*, 25-28.

Torres, W., Méndez, M., Dorantes, A. y Durán, R. (2010). Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México,* (86), 37-51.

USDA-ARS. (2014). Germplasm Resources Information Network (GRIN). Base de datos en línea. Beltsville, Maryland, E. U. National Germplasm Resources Laboratory. Recuperado de http://www.ars-grin.gov

Vargas, O. (2007). *Los pasos fundamentales en la restauración ecológica*. En O. Vargas (Ed.), *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino* (pp. 17-29). Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica-Departamento de Biología-Universidad Nacional de Colombia.

Vargas, O. (2011a). Los pasos fundamentales en la restauración ecológica. En O. Vargas y S. Reyes (Eds.), *La restauración ecológica en la práctica*: *Memoria del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica* (pp. 19-40). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Vargas, O. (2011b). Restauración ecológica: Biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana, 2*(16), 221-246.

Vargas, O. y Velasco-Linares, P. (2011). *Reviviendo nuestros p*áramos: Restauración *ecológica de p*áramos. Proyecto Páramo Andino.

Villalobos-Zapata, G. J. y Mendoza-Vega, J. (Coords.; 2010). *La biodiversidad en Campeche: estudio de estado*. México: Conabio/Gobierno del Estado de Campeche/ Universidad Autónoma de Campeche/El Colegio de la Frontera Sur.

Vos, P., Meelis, E. y Ter Keurs, W. J. (2000). A Framework for the Design of Ecological Monitoring Programs as a Tool for Environmental and Nature Management. *Environmental Monitoring and Assessment, 61*(3), 317-344.

World Bank Group (2016). *World Development Report 2016: Digital Dividends*. World Bank Publications.

Yoccoz, N. G., Nichols, J. D. y Boulinier, T. (2001). Monitoring of Biological Diversity in Space and Time. *Trends in Ecology and Evolution, 16,* 446-453.

Young, H. S., Raab, T. K., McCauley, D. J., Briggs, A. A. y Dirzo, R. (2010). The Coconut Palm, *Cocos nucifera*, Impacts Forest Composition and Soil Characteristics at Palmyra Atoll, Central Pacific. *Journal of Vegetation Science, 21*(6), 1058-1068.



Fotografía: Vanessa Hernández

ANEXOS

MEDIDAS DE SEGURIDAD EN LAS LABORES DE RESTAURACIÓN

La seguridad en el trabajo tiene como objetivo conservar la salud y el bienestar de los trabajadores. Una de las principales premisas para lograrlo es generar un ambiente digno y seguro mediante la implementación de medidas como la evaluación, la prevención y el control de riesgos. Para ello, se enlistan las siguientes recomendaciones generales para cualquier labor que requiera exposición en espacios abiertos por largos periodos, como ocurre en un proyecto de restauración, las cuales están descritas con mayor detalle en las Tablas 1 y 2.

1. Analizar los riesgos potenciales (ARP) de cada actividad.

2. Identificar las medidas preventivas para cada riesgo.

3. Aplicar las medidas preventivas en las actividades correspondientes.

Tabla A1. Ejemplo de identificación de algunos riesgos potenciales de una actividad

Actividad: Remoción de especies invasoras
Riesgos potenciales identificados
1. Exposición prolongada al sol
2. Exposición a especies alergénicas
3. Lesiones
4. Exposición a enfermedades como el dengue

1. Equipo de protección personal (EPP)

La NOM-017-STPS (DOF, 9 de diciembre de 2008) define como equipo de protección personal (EPP) al conjunto de elementos y dispositivos diseñados para proteger al trabajador de accidentes y enfermedades que pudieran ser causados por agentes generados con motivo de sus actividades. El EPP se debe seleccionar de acuerdo a la región del cuerpo que se encuentre expuesta, al nivel de protección que se necesite y a los tipos de riesgos de las actividades laborales a realizar (p. ej., uso de lentes de seguridad cuando exista el riesgo de la proyección de partículas o líquidos que puedan dañar los ojos).

Durante la implementación de las actividades para algún proyecto de restauración de dunas los riesgos más comunes son caídas, heridas por objetos punzocortantes, cortes, raspones por las espinas de las plantas, exposición a la alta radiación solar, exposición a sustancias químicas (en caso tener contacto con herbicidas), entre otros. Se recomienda utilizar el siguiente equipo:

- Equipo de protección personal básico (EPP-B), el cual es el equipamiento mínimo que se recomienda utilizar como base para todas las actividades: camisa de manga larga, pantalones rectos sin roturas, lentes de seguridad y protección (existen claros y oscuros), protección solar (sombreros o gorra y bloqueador) y botas con casquillo.
- Para las actividades de remoción de vegetación: EPP-B y guantes de jardinero.
- Para manejo y aplicación de herbicidas: EPP-B y guantes para manejo de sustancias químicas, mascarilla-respirador industrial desechable, careta facial.
- Para el podado con desbrozadora: EPP-B y careta protectora.
- Para actividades de muestreo de vegetación: EPP-B.
- Para actividades de muestreo de fauna: EPP-B y guantes de carnaza.

Es importante mencionar las obligaciones de las partes involucradas en cuanto al uso de EPP, la NOM-017-STPS (DOF, 9 de diciembre de 2008) menciona que los patrones tienen la obligación de brindar el EPP correspondiente a sus trabajadores, y éstos tienen la obligación de usarlo, cuidarlo y mantenerlo limpio.

Tabla A2. Ejemplo de riesgos potenciales con sus medidas de prevención de la actividad: remoción de especies invasoras

Riesgos	Causa	Medida de prevención
1. Exposición prolongada al sol		
Insolación y deshidratación	Exposición prolongada al sol	Uso de EPP: pantalón, camisa de manga larga, sombrero o gorra; horarios adecuados; disponibilidad de sombra e hidratación constante.
2. Exposición a especies alergénicas		
Alergias	Exposición a plantas o picaduras de insectos con propiedades alérgicas	Uso de EPP: guantes, pantalón, camisa de manga larga y botas de campo.
3. Lesiones		
Fracturas	Caídas con carga o sobre objetos o superficies	Moderar la carga. Retirar objetos previo al movimiento.
Cortes y raspones	Perforación por objetos punzocortantes, espinas, etc.	Uso de EPP: guantes, pantalón, camisa de manga larga y botas de campo.
4. Enfermedades		
Enfermedades contagiosas	Exposición a contagios por virus o bacterias	Uso de EPP: mascarillas y lentes de seguridad.
Dengue, zika u otra enfermedad	Piquete de mosquitos o zancudos	Uso de EPP: pantalón, camisa de manga larga, botas de campo y repelente.
Cáncer de piel	Exposición prolongada al sol	Uso de EPP: pantalón, camisa de manga larga, sombrero o gorra y bloqueador solar; horarios adecuados.

2. Aplicación de herbicidas

Los productos mencionados en este manual están autorizados por la Cofrepis (2020), no son considerados peligrosos (Bejarano-González et al., 2017) y están catalogados en el nivel de toxicidad verde (productos que normalmente no significan peligro alguno). Sin embargo, siempre es muy importante leer la hoja de seguridad de cualquier sustancia química con la que se trabaja, ya que allí se encuentran las indicaciones para prevenir riesgos y actuar en caso de ocurrir algún accidente. Además, es obligatorio el uso de equipo de protección personal, como los guantes contra sustancias químicas, según la Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS (DOF, 9 de diciembre de 2008).

En caso de usarlos, su aplicación debe ser uniforme sobre la superficie de las plantas, la cual debe estar seca (p. ej., no aplicar después de llover, ni con rocío). Realizar preferentemente en días despejados, con poco viento y siempre a favor de éste para evitar el contacto directo con el herbicida. Es importante considerar que una de las características de las dunas costeras es la alta velocidad del viento, por lo que es recomendado el uso de mochilas con campana aspersora para esparcir herbicidas. Adicionalmente, debido a la cercanía de otros escosistemas sensibles como los arrecifes de coral, su uso debería evitarse en la medida de lo posible.

ISBN 978-607-30-6149-0



The Nature Conservancy

CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Ciencias

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNAM
UNIDAD MÉRIDA

LANCIS

Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera

CEMIE-Océano

ECOSUR