

Daños a los manglares causados por huracanes

Técnicas y costos de restauración tras una tormenta



ESCUELA
NACIONAL DE
ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD
MÉRIDA



BUILDERS
INITIATIVE



Daños a los manglares causados por huracanes Técnicas y costos de restauración tras una tormenta

Jorge A. Herrera Silveira²
Claudia Teutli Hernandez³
Fernando Secaira Fajardo¹
Rod Braun¹
Janet Bowman¹
Laura Geselbracht¹
Marcia Musgrove¹
Martha Rogers¹
Joseph Schmidt¹
Pedro Javier Robles Toral²
Jesús Andrés Canul Cabrera²
Lucía Guerra Cano²

1. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia
2. Departamento de Recursos del Mar CINVESTAV- Mérida, Yucatán, México
3. Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida, UNAM

Fotografía de la portada: Defoliación y daños a estructuras de manglar en SianKa'an, México tras el Huracán Ernesto. © Fernando Secaira.

Diseño gráfico: .Puntoaparte Editores

Cita sugerida: Herrera-Silveira, J. A., Teutli-Hernandez, C., Secaira-Fajardo, F., Braun, R., Bowman, J., Geselbracht, L., Musgrove, M., Rogers, M., Schmidt, J., Robles-Toral, P. J., Canul-Cabrera, J. A., & Guerra-Cano, L. 2022. "Daños a los manglares causados por huracanes. Técnicas y costos de reparación tras una tormenta". The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.

Agradecemos la financiación de AXA XL y Builders Initiative Foundation. Así mismo, queremos agradecer a nuestros atentos colegas de The Nature Conservancy (TNC), quienes aportaron su experiencia técnica y comentarios acertados a la redacción de este informe. Estos colegas incluyen a Lianna McFarlane-Connelly, Eric Roberts y Mark Way.

Este informe es el primero de tres que publicará TNC en colaboración con nuestros socios de AXA XL, CINVESTAV y la Universidad de California, Santa Cruz. Los informes son parte de un proyecto de un año de duración encaminado a evaluar la viabilidad de un proyecto de seguro de manglares en el Golfo de México y el Caribe. En este primer informe, documentamos el tipo de daños a los manglares que pueden resultar tras el paso de un huracán, las técnicas de restauración adecuadas para restaurar de manera apropiada los manglares dañados, y los costos de estos esfuerzos de restauración. En el segundo informe, documentamos el valor de protección que brindan los manglares en la región estudiada. Por último, en el tercer informe, recopilamos información de los dos primeros informes e identificamos las áreas específicas en las cuales un producto de seguro de manglares sería más rentable. También condensamos los esfuerzos de nuestro análisis de mercado en México, Florida y Las Bahamas e identificamos lugares específicos donde se puede implementar un piloto del producto de seguro de manglares. Como se describe en este informe, las tormentas tropicales y los huracanes pueden causar daños significativos a los manglares, y los costos de su restauración pueden ser altos. Financiar estas actividades de restauración mediante soluciones innovadoras como lo es un producto de seguro de manglares, será crucial para garantizar que los beneficios de protección de los manglares se mantengan en el futuro.



Tabla de contenido



Introducción	4
Ecosistemas de manglar	6
Huracanes	8
Frecuencia e intensidad de los huracanes en el Golfo de México y el Caribe	9
Influencia del cambio climático en las tormentas tropicales	11



Daño a los manglares causados por huracanes	12
Tipos de daños	13
Severidad de los daños causados por huracanes	18



Grado, ubicación y severidad de los daños	19
Susceptibilidad de las especies	20
Estructura forestal: tamaño de los troncos y altura de los árboles	21
Tipo ecológico de manglar	21
Fragmentación o degradación de los manglares	21
Ubicación de los manglares en relación con la trayectoria de los huracanes y la distancia al mar	22
Frecuencia de los huracanes	23



Acciones para restaurar o reparar los daños	24
Rehabilitación hidrológica	26
Rehabilitación topográfica	29
Reforestación	31



Costos de la restauración de manglares	32
Identificar los costos de la restauración de manglares en México	34
Identificar los costos de la restauración de manglares en Florida	35
Identificar los costos de la restauración de manglares en Las Bahamas	36
Costos de la restauración de manglares por enfoque o acción	37



Consideraciones finales	39
Referencias	41
Apéndice	46

1

Introducción

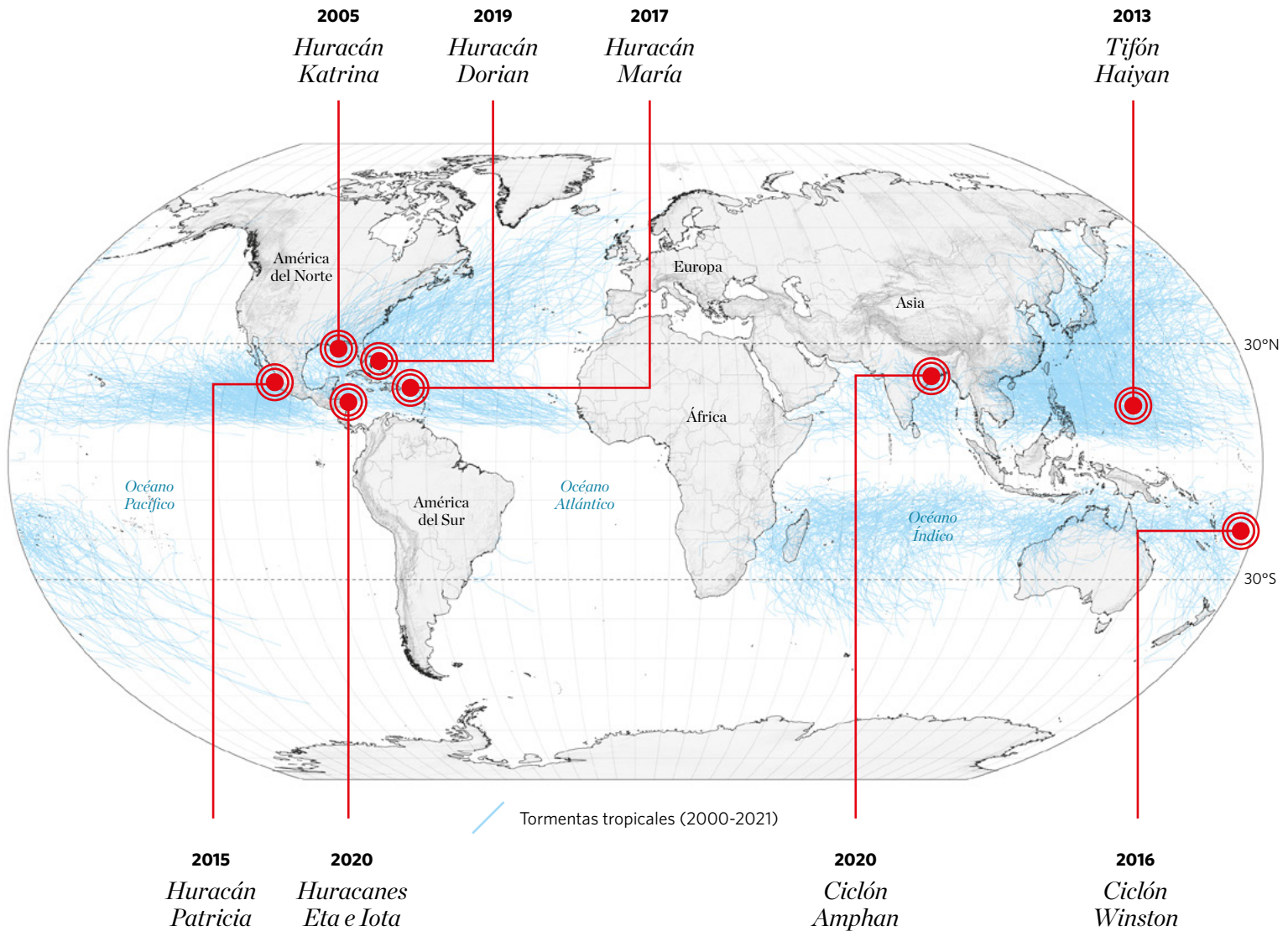
Los manglares prestan importantes servicios ecosistémicos que incluyen hábitats para peces y crustáceos, filtración de agua, secuestro de carbono, formación de suelos y protección contra la erosión costera mediante la estabilización del suelo, acumulación de sedimentos y mejora de las marejadas ciclónicas (Cohem-Shacham *et al.*, 2016; Herr y Landis, 2016; IUCN, 2020).

La protección contra los ciclones tropicales, que se pueden llamar tifones o huracanes dependiendo del lugar del mundo donde ocurran, es uno de los servicios ambientales más beneficiosos que prestan los manglares a los asentamientos humanos cercanos a las costas. Se estima que aproximadamente dos tercios de la población humana mundial vive a 65 kilómetros o menos de la costa, y es altamente vulnerable a los ciclones tropicales (UN Atlas of the Oceans, 2016). Investigaciones recientes muestran que los manglares disipan la energía de las olas y

desaceleran la penetración de las marejadas ciclónicas, lo que puede disminuir los daños por inundación y minimizar la erosión (Banco Mundial, 2016). A nivel mundial, los manglares prestan servicios de protección costera que evitan 65 mil millones de dólares al año en daños e inundaciones para más de 15 millones de personas (Menéndez *et al.*, 2020).

Alrededor del mundo, existen varios ejemplos de comunidades costeras que han sido devastadas por estas tormentas (ver Figura 1). En 2004, un tsunami en el Océano Índico causó enormes daños a infraestructura y la muerte de más de 200.000 personas (Check, 2005; Danielsen *et al.*, 2005). El huracán Katrina devastó la costa del Golfo de México de los Estados Unidos en 2005, y se consideró el huracán más costoso hasta la fecha (Costanza *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2007). El tifón Haiyan, en 2013, fue uno de los más letales en azotar las Filipinas.

Manglar en Alligator Creek,
Cat Island, Bahamas.
© Shane Gross.



La degradación y pérdida de los ecosistemas de manglar, como resultado de la deforestación y del cambio climático de la Tierra, ha disminuido su capacidad de prestar estos servicios ecosistémicos (MEA, 2005; Costanza *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016). Así mismo, los ciclones tropicales pueden causar graves daños a los manglares (Uriarte *et al.*, 2019), lo que limita aún más su capacidad de prestar dichos servicios ecosistémicos. Se han reportado mayores pérdidas económicas a medida que los manglares se degradan y la protección costera se ve comprometida (Pendleton *et al.*, 2012). Además de la degradación de los manglares, la erosión costera y el aumento del nivel medio del mar han exacerbado el

impacto de los ciclones tropicales (Nicholls y Casenave, 2010).

En este informe, caracterizamos los daños que los ciclones tropicales ocasionan a los manglares y recomendamos acciones para reducir o reparar estos daños. Si bien nos enfocamos en las actividades de restauración para manglares dañados tras una tormenta, muchas de las acciones de restauración de manglares descritas se pueden aplicar en otros contextos. Describimos el rango de costos de la reparación de manglares en tres regiones prioritarias: México, Florida y Las Bahamas. La restauración de manglares en estas tres regiones ya ha demostrado ser rentable en el pasado (Beck *et al.*, 2020).

Figura 1. Registro de ciclones tropicales y tormentas históricas.

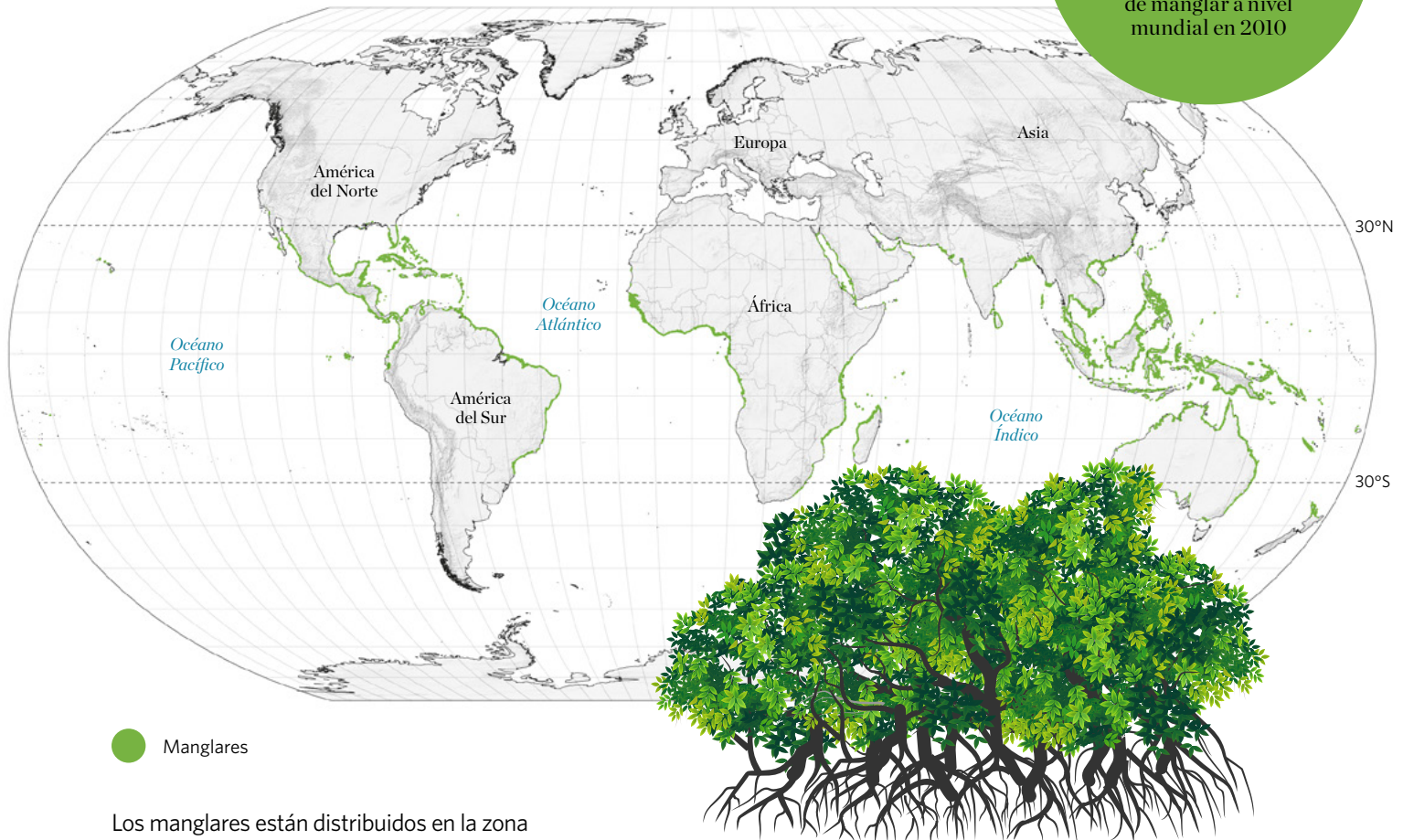
Nota: La gráfica incluye registros de ciclones y huracanes tropicales a nivel mundial de 2000 a 2021.

Fuente: Datos de NOAA, International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), consultado en enero de 2022. Creado con Natural Earth.

Ecosistemas de manglar

13,8

millones de hectáreas de manglar a nivel mundial en 2010



● Manglares

Los manglares están distribuidos en la zona intermareal, a lo largo de las costas tropicales y subtropicales, entre los 30° N y 30° S de latitud (Giri *et al.*, 2011); alrededor del 75% de todos los manglares del mundo se encuentran distribuidos en solo 15 países. La cobertura mundial de estos ecosistemas se estima en 13,8 millones de hectáreas (ver Figura 2), sin embargo, la deforestación de la tierra debido a la agricultura, acuicultura, asentamientos urbanos e infraestructura hotelera o portuaria, así como los cambios en los procesos climáticos y ambientales (Thomas *et al.*, 2017), están degradando y destruyendo los manglares de manera acelerada. Desde 1980, se han perdido más de 3,6 millones de hectáreas de manglares, lo que corresponde a más del 20% de la cobertura mundial de manglares (FAO, 2007).

En 2010, debido a la alarmante tasa de pérdida, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) agregó 11 de las 70 especies de manglar que existen en el mundo a la Lista Roja de Especies Amenazadas, seis como Especies Vulnerables (FAO, 2007; Polidoro *et al.*, 2010). La condición de un manglar y el grado de pérdida están fuertemente relacionados con la incidencia de eventos climáticos extremos (tormentas intensas, ciclones tropicales o tsunamis), con procesos oceánicos (cambios en el nivel medio del mar o el clima de las circulaciones oceánicas) (Gilman, Ellison, Duke y Field, 2008) y con una variedad de actividades humanas.

Figura 2. Distribución mundial de manglares en 2010.

Fuente: Global Mangrove Partnership Dataset, World Atlas of Mangroves (Spalding, 2010). Creado con Natural Earth.



Los manglares, por lo general, están ubicados en áreas expuestas a perturbaciones (Lugo *et al.*, 1981); por lo tanto, se consideran comunidades ecológicamente estables (Alongi, 2008) con la capacidad de recuperarse de los daños causados por ciclones tropicales. La frecuencia y magnitud de los ciclones tropicales influye a la hora de determinar la composición y complejidad estructural de un manglar. Por ejemplo, en los lugares en los que la temporada de ciclones es particularmente intensa, la complejidad estructural de los manglares está caracterizada por árboles más bajos y pocos árboles emergentes de mayor altura (Lugo y Snedaker, 1974), mientras que, en las áreas en las que los ciclones

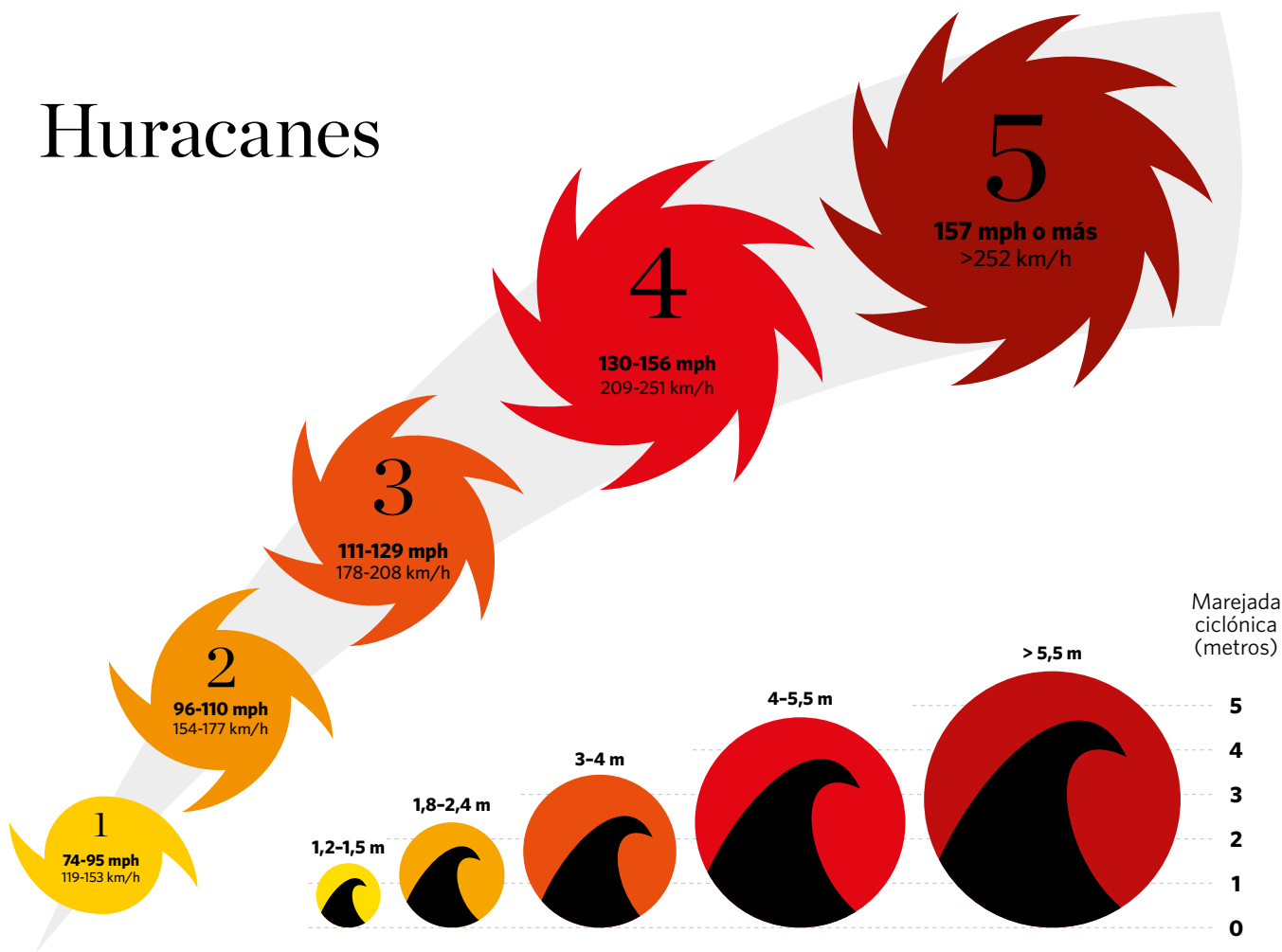
tropicales son menos frecuentes (algunas islas del Pacífico y las costas del Pacífico de América Central), la biomasa y complejidad estructural aumenta con el paso del tiempo (Allen *et al.*, 2001; Simard *et al.*, 2019).

Las características de los manglares reflejan el efecto de las perturbaciones pasadas y la recuperación tras estas y, a su vez, influyen en la magnitud del impacto y la respuesta ecosistémica ante futuras perturbaciones (Peters *et al.*, 2011). Los ciclones tropicales podrían tener un mayor impacto en las áreas pobladas (Vogt *et al.*, 2012; Lewis *et al.*, 2016) donde los manglares se han degradado o destruido como resultado de las actividades humanas.

Crecimiento de ostras en la costa de manglares del estuario del puerto de Charlotte, cerca de Punta Gorda, Florida, en el Golfo de México. @Carlton Ward Jr.



Huracanes



Los ciclones tropicales son fenómenos naturales que, por lo general, se desarrollan en aguas cálidas. Dependiendo de su velocidad máxima de viento sostenida durante un minuto, se denominan y categorizan como una depresión tropical (velocidad de viento baja, menos de 62 kilómetros por hora), una tormenta tropical (velocidad de viento moderada, entre 63 y 118 kilómetros por hora), o un huracán (velocidad de viento severa, mayor a 119 kilómetros por hora) (NPS, 2019). El término “huracán” se emplea para los ciclones tropicales más poderosos que se desarrollan en el Océano Atlántico y en el Océano Pacífico Oriental, mientras que los ciclones tropicales que se desarrollan en el Océano Pacífico Occidental se denominan “tifones”. En lo que resta de este informe, emplearemos el término “huracanes” para referirnos a los ciclones tropicales, pues enfocamos nuestra discusión en los manglares

del Golfo de México y del Caribe, donde los ciclones tropicales se denominan huracanes.

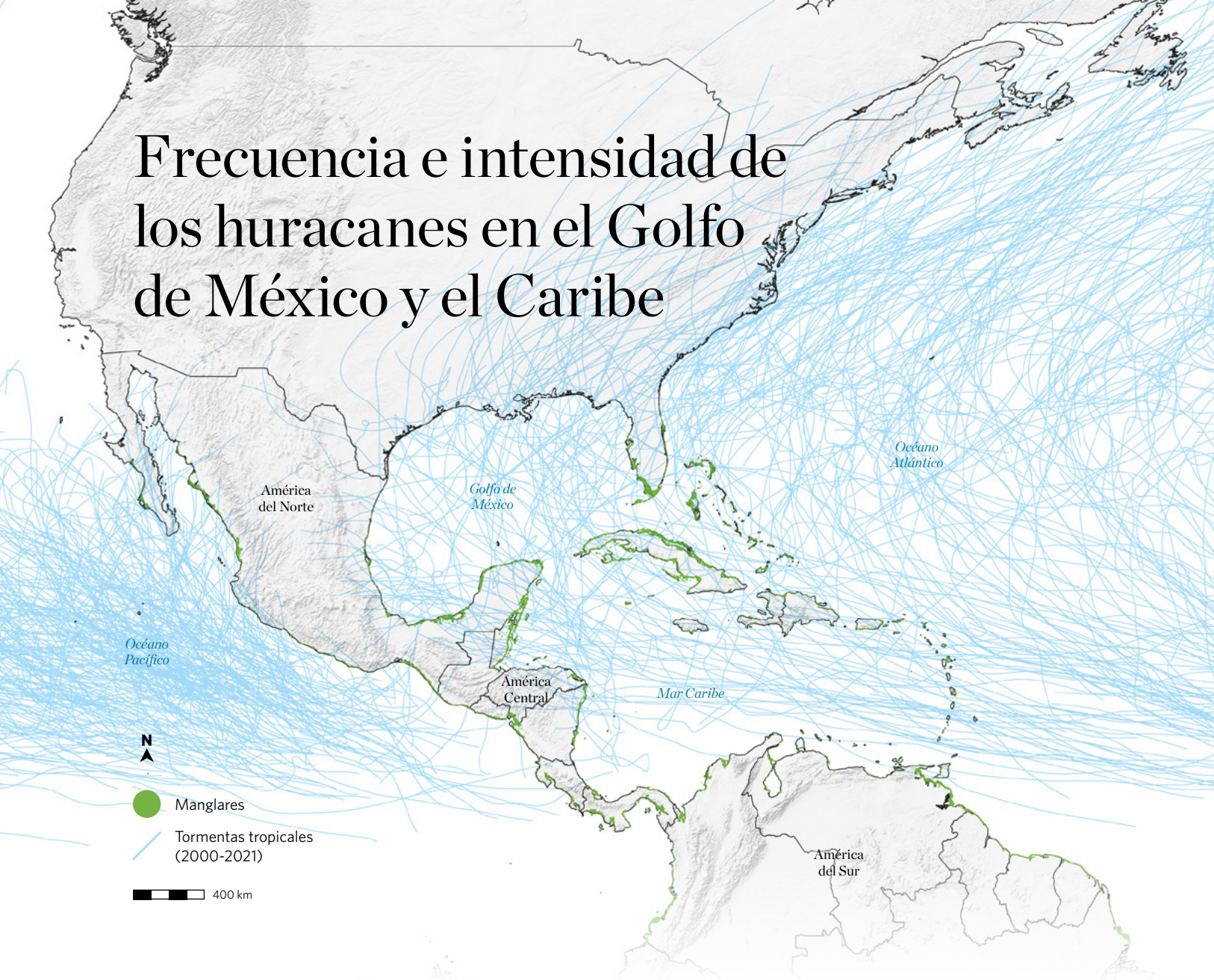
La escala Saffir-Simpson clasifica a los huracanes en cinco grupos, y la categoría cinco es la más severa (NPS, 2019) (Figura 3). Los huracanes categorizados como tres, cuatro o cinco, se denominan huracanes mayores.

Las condiciones favorables para la formación de huracanes suelen incluir una temperatura del agua superficial superior a los 26°C, una humedad atmosférica superior al 85% y una circulación de viento intensa debido a la diferencia térmica entre el océano y la atmósfera (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014). En el Atlántico y el Caribe, la temporada de huracanes es entre junio y noviembre, mientras que, en el Pacífico, la temporada comienza en mayo y termina en noviembre.

Figura 3. Clasificación de huracanes en la escala Saffir-Simpson (NPS, 2019).

Adaptado de Lucía Guerra Cano.

Frecuencia e intensidad de los huracanes en el Golfo de México y el Caribe



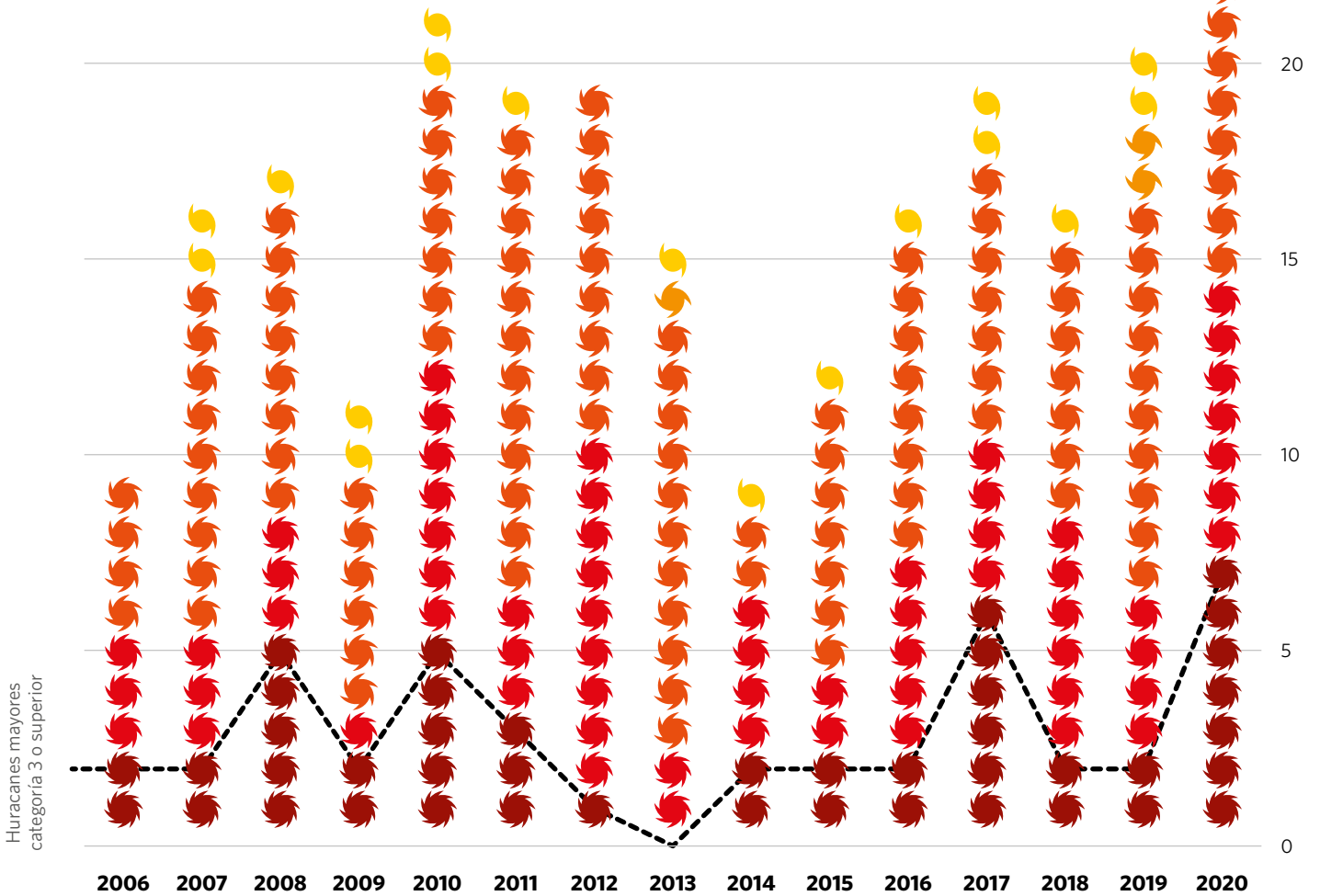
En los últimos 15 años, 250 huracanes, depresiones tropicales, y tormentas tropicales y subtropicales han impactado el Golfo de México y el Caribe (Figura 4). Hasta 2019, la cantidad promedio de tormentas con nombre por temporada era de 15, incluyendo seis huracanes, de los cuales tres eran huracanes mayores (Taillie *et al.*, 2020). La temporada de 2020 fue extremadamente intensa, con 31 tormentas, cantidad muy superior al promedio y que sobrepasó todas las temporadas registradas (Figura 5).

A lo largo del tiempo, las temporadas de huracanes han seguido una tendencia polinomial: cada cuatro a seis años se

produce una disminución considerable en la cantidad de tormentas. Sin embargo, desde 2016, la cantidad de huracanes mayores ha incrementado, en parte debido a un aumento de la temperatura de la superficie y subsuperficie del mar, y una disminución de la circulación atmosférica durante el verano en los trópicos (Taillie *et al.*, 2020). Este incremento de los huracanes mayores, junto con otros efectos del cambio climático, como el aumento del nivel del mar, podría causar daños incluso más graves a los manglares debido a mayores tasas de erosión costera, inundaciones más severas, y marejadas ciclónicas más fuertes con un impacto tierra adentro más extenso (Woodruff *et al.*, 2013).

Figura 4: Registro de huracanes, depresiones tropicales, y tormentas tropicales y subtropicales en el Golfo de México y el Caribe (2000-2021).

Fuente: Datos de NOAA, International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), consultado en enero de 2022. Creado con Natural Earth.



Entre 2009 y 2017, 116 tormentas tropicales, de las cuales 46 se clasificaron como huracanes, han afectado a los manglares en el Golfo de México y el Caribe (Taillie *et al.*, 2020). Tan solo en 2017, más de un millón de hectáreas de manglar fueron afectadas por tormentas tropicales o huracanes, lo que correspondió a la mayor área de manglar afectada por tormentas en las últimas cuatro décadas (Taillie *et al.*, 2020).

Figura 5: Cantidad e intensidad de tormentas tropicales por temporada en el Golfo de México y el Caribe.

Fuente: SMN, 2021.

-  Depresiones tropicales
-  Tormentas subtropicales
-  Tormentas tropicales
-  Huracanes
-  Huracanes mayores



Influencia del cambio climático en las tormentas tropicales

A medida que se intensifica el cambio climático, las condiciones en el Océano Atlántico se vuelven más favorables para la formación de huracanes. Algunos autores predicen grandes cambios en la dinámica de las tormentas tropicales como resultado del cambio climático, incluyendo un incremento en la frecuencia de las tormentas tropicales severas; un aumento de las precipitaciones generadas por un huracán; y un incremento en la cantidad de tormentas tropicales y huracanes que llegan al noreste de Estados Unidos, a Canadá e incluso a Europa (Knutson *et al.*, 2010, 2015; Christensen *et al.*, 2013; Sobel *et al.*, 2016; Kossin *et al.*, 2017; Patricola y Wehner, 2018).

Estas proyecciones muestran que los efectos negativos de las tormentas y los huracanes en los ecosistemas de manglar también aumentarán en las próximas décadas. Los efectos negativos podrían incluir una reducción de la materia orgánica y el reemplazo de manglares por aguas abiertas. Sin embargo, a escala regional, los cambios futuros a los ecosistemas de manglar son más complicados de predecir (Krauss y Osland, 2020), pues la dinámica cambiante de las tormentas interactúa con otros procesos globales de cambio, como el aumento del nivel del mar, la erosión y la alteración del ciclo de nutrientes (Osland *et al.*, 2018; Sippo *et al.*, 2018).

Isla de Pequeño San Vicente, Granada. © Marjo Aho.

A photograph of a beach with a large pile of driftwood and a car in the background. The scene is set on a sandy beach with a large pile of driftwood and a car in the background. The sky is cloudy, and the water is visible on the right side. A large white circle with the number '2' is overlaid on the image.

2

Daños a los manglares causados por huracanes

Alrededor del mundo, existen regiones en las cuales los manglares no se ven afectados por huracanes porque las condiciones climáticas no favorecen la formación de tormentas; por ejemplo, los huracanes casi nunca afectan los manglares de África, Suramérica, Indonesia y Papúa Nueva Guinea. Sin embargo, existen muchas otras regiones en donde los man-

glares se ven afectados por huracanes, como Australia, México, Myanmar, las Filipinas, Bangladesh, Cuba y los Estados Unidos. Países pequeños, como Las Bahamas, Guadalupe, Honduras, Belice y Haití, que albergan grandes áreas de manglar, están ubicados en algunas de las zonas de huracanes más activas (Krauss y Osland, 2020).

Se pueden ver los restos del antiguo muelle y de los manglares en la erosión, Bahía de Grenville, Granada © Marjo Aho.

Tipos de daños

Cambios en la estructura, composición y biomasa de los manglares



Cambios en la hidrología



Cambios en las características de los sedimentos



Cambios en la topografía: elevaciones, canales y salidas de agua



Los manglares constituyen una barrera importante para los huracanes a lo largo de las costas tropicales y subtropicales. Los huracanes afectan a los manglares con fuertes vientos, marejadas ciclónicas, deposición de sedimentos, inundaciones excesivas y erosión costera (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008; Islebe *et al.*, 2009).

Los huracanes afectan la estructura y composición del bosque al arrancar y matar árboles, al romper y derribar tallos y ramas, y al defoliar las copas de los árboles, lo que resulta en la

modificación de la dinámica sedimentaria, los patrones de sucesión y los ciclos de nutrientes, y en el deterioro de la estructura y las funciones forestales, además de una disminución de la biodiversidad (Baldwin *et al.*, 2021; Herbert *et al.*, 1999). El impacto de los huracanes se puede clasificar de acuerdo con los daños a la estructura y composición del bosque, los cambios en la topografía (elevación, canales y salidas de agua) del área, los cambios en la hidrología y los cambios en las características de los sedimentos (Figura 6).

Cambios en la estructura, composición y biomasa de los manglares



- Defoliación
- Pérdida de biomasa (ramas y troncos)
- Pérdida de árboles maduros por arrancamiento y muerte
- Reducción de la complejidad forestal
- Disminución de la distribución y abundancia de especies
- Cambio en la dominancia de especies
- Cambio en la distribución de frecuencia de árboles maduros y jóvenes
- Apertura de claros en el bosque

Cambios en la topografía: elevaciones, canales y salidas de agua



- Árboles, ramas y sedimentos obstruyen los canales y salidas de agua
- La afluencia de sedimentos eleva el nivel del suelo de lagunas, canales y áreas inundadas
- La marejada ciclónica abre salidas de agua de tormenta en dunas e islas barrera
- La marejada ciclónica erosiona y/o acrecienta la línea costera

Cambios en hidrología



- Interrupción del flujo de agua debido a ramas o árboles caídos y/o a la erosión y acumulación de sedimentos
- Aumento del nivel de inundación
- Cambio en el balance de agua salada y agua dulce
- Cambio en el hidroperíodo

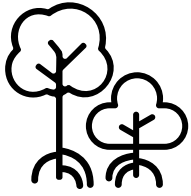
Cambios en las características de los sedimentos



- Salinización de los sedimentos
- Partículas suspendidas en la columna de agua
- Cambios en la textura y composición de la materia orgánica

Figura 6. Daños a los manglares causados por huracanes.

Adaptado de Lucía Guerra Cano.



Cambios en la estructura, composición y biomasa de los manglares

Los daños a la estructura, composición y biomasa de los manglares son el impacto más evidente de los huracanes. Los daños consisten en:

Defoliación. Las fuertes ráfagas de viento durante los huracanes hacen que las hojas se desprendan (es decir, defoliación).

Ruptura de ramas. Los fuertes vientos rompen o desprenden parcialmente las ramas de los árboles. Los árboles maduros son los más afectados pues tienen menor flexibilidad que los árboles jóvenes.

Ruptura del tronco. La severidad de la perturbación es en función de la edad de la comunidad y el tamaño de los árboles. Los árboles más antiguos crecen y se vuelven altos y robustos, y carecen de la flexibilidad para soportar las fuerzas del viento. Los individuos con diámetros de tronco superiores a los 20 o 30 centímetros son susceptibles a romperse durante las ráfagas de viento (Islebe *et al.*, 2009). Los individuos más pequeños o jóvenes, o aquellos con copas más pequeñas, son más flexibles y resilientes.

Desprendimiento de raíces. Las ráfagas de viento causadas por los huracanes mayores pueden arrancar parcial o totalmente las raíces de los árboles y hacer que mueran. La supervivencia de árboles parcialmente arrancados depende de las condiciones de los sedimentos y del régimen hidrológico tras la tormenta.

Reducción de la complejidad. La complejidad forestal se refiere a las características estructurales y florísticas y al grado de desarrollo del sistema. El impacto a cualquiera de estas características ocasionará una disminución de la complejidad forestal. Las variables que se emplean para evaluar los cambios en la complejidad son el índice de “valor de importancia” (que mide la dominancia de las especies), la abundancia y la distribución de diferentes tamaños de troncos y altura promedio de los árboles. Estas mismas características se deben monitorear con el paso del tiempo para determinar la trayectoria de recuperación y la resiliencia del sistema.

Disminución de la distribución y abundancia. El impacto de un huracán puede transformar rápidamente la distribución y abundancia de árboles, y generar condiciones diferentes a las que existían antes de la tormenta. La abundancia puede disminuir debido a la muerte de mangles individuales. Los árboles pueden morir inmediatamente debido a su desprendimiento total del sustrato o pueden morir varios meses después por defoliación, desprendimiento parcial y cambios en las condiciones ambientales

que exceden la tolerancia de cada especie. Las condiciones que probablemente se alteren son el período de inundación, la salinidad, la disponibilidad de nutrientes y la deposición de sedimentos (que interfiere con el intercambio de gases entre la raíz y el sedimento) (Lewis *et al.*, 2016). La distribución de los árboles puede verse afectada cuando los cambios en las condiciones ambientales afectan de manera diferente a las distintas especies de mangle, y favorecen a algunas especies en detrimento de otras.

Cambios en la dominancia de especies. El daño severo a las especies dominantes del manglar facilita el establecimiento de nuevas especies o el crecimiento de especies cuya dominancia era menor. Este reemplazo es causado por los daños estructurales (desprendimiento de la raíz o muerte de individuos) y el cambio en las condiciones ambientales que puede favorecer a las especies menos dominantes.

Cambios en la distribución y frecuencia de los árboles maduros/jóvenes. Los árboles maduros con mayores diámetros son más susceptibles a daños, así que, después de un huracán, los árboles jóvenes pueden dominar el bosque y los individuos maduros pueden ser menos frecuentes.

Apertura de claros. Un claro es un área abierta sin árboles dentro de un bosque. Por lo general, los claros se forman de manera natural; sin embargo, este fenómeno es exacerbado por los huracanes cuando los árboles son derribados o arrancados de raíz.



Cambios en la topografía: elevaciones, canales y salidas de agua

Los huracanes pueden transportar grandes cantidades de sedimentos a la zona costera. Las marejadas ciclónicas y las corrientes pueden transportar y reubicar los sedimentos a lo largo de la costa, y

las lluvias intensas pueden causar erosión tierra dentro y transportar sedimentos corriente abajo hacia lagunas y canales internos. Adicionalmente, los huracanes fuertes a menudo rompen las islas de barrera y abren nuevas salidas de bocas de tormenta, lo que permite que el agua salada ingrese al sistema.

Este transporte de sedimentos puede producir cambios significativos en la topografía, como elevar el fondo de lagunas y áreas de manglar, bloquear canales naturales por los que solía fluir el agua e incluso bloquear las salidas de agua hacia el mar. Los huracanes también pueden generar grandes cantidades de desechos, como árboles muertos

y ramas rotas que pueden bloquear los canales y alterar el régimen hidrológico del área.

Los cambios en la topografía pueden causar tres efectos: (i) mayor elevación, lo que reduce el flujo de agua y el intercambio de sales y nutrientes, y resulta en cambios en las características físicas y químicas de los sedimentos; (ii) nivel topográfico más bajo, lo que eleva los niveles de inundación hasta que exceden la altura de las plántulas e impide su establecimiento y supervivencia (Flores-Verdugo *et al.*, 2010); y (iii) apertura de nuevas salidas/entradas entre el mar y los humedales, que pueden durar meses y afectar la salinidad de los manglares.



Cambios en la hidrología

Como consecuencia de los cambios topográficos y físicos, el régimen hidrológico del cual dependen los manglares se puede ver afectado de las siguientes maneras:

Cambios en el balance de agua dulce y agua marina. Las nuevas conexiones entre el mar y los humedales incrementan el flujo de agua salada hacia los humedales, lo que modifica el balance previo a la tormenta y cambia la química de los pantanos y lagunas, así como la cantidad de agua en el área.

Cambios en el hidroperíodo. Esto puede ocurrir debido al bloqueo de las salidas de agua existentes o la apertura de nuevas salidas. El período y nivel de inundación puede aumentar o disminuir dependiendo de si las salidas de agua están bloqueadas o abiertas.

Cambios en las características del agua. Los canales obstruidos y las nuevas salidas/entradas de agua por lo general alteran y reducen los flujos hidrológicos, lo que puede causar el incremento de la salinidad del agua, incremento de los sedimentos, incremento de la temperatura del agua, reducción de las concentraciones de oxígeno, incremento en las concentraciones de sulfuro y/o variaciones en los ciclos de nutrientes (Paling *et al.*, 2008; Taillie *et al.*, 2020). Cuando las

tormentas abren entradas de agua, el agua salada fluye hacia el interior y permea los pantanos, lagunas y demás áreas bajas. Los manglares sobreviven o perecen dependiendo de la tolerancia de la especie a estas variaciones en las características del agua.

Incrementos en los períodos y niveles de inundación. El incremento de la marea y la precipitación durante las tormentas puede hacer que aumenten los períodos y niveles de inundación de las áreas cercanas a la costa, lo que afecta el hidroperíodo natural del manglar. Las consecuencias de estos cambios pueden ir desde el "ahogamiento" de plántulas o de arbustos adultos hasta incrementos en las concentraciones de sulfuro y niveles negativos de reducción-oxidación (> -350 milivoltios).



Cambios en las características de los sedimentos

Salinización del sedimento. En las áreas en las que se interrumpe el flujo de agua, la concentración de sales puede permear el sedimento. Las entradas de agua abiertas por la tormenta pueden permitir una mayor intrusión de agua marina, lo que modifica las condiciones fisicoquímicas de los sedimentos. Esto puede resultar en una degra-

dación acelerada de la vegetación, que afecta la estructura forestal y la pérdida de funciones ecosistémicas.

Entierro de propágulos. La acumulación causada por la marejada ciclónica puede aumentar la elevación del suelo y enterrar los propágulos.

Hipoxia. La deposición de sedimentos puede cambiar los flujos de agua, lo que posteriormente puede causar hipoxia (Cahoon *et al.*, 2002; Smith *et al.*, 2009). La deposición de sedimentos por mareas puede limitar el intercambio de gases entre el suelo y las raíces, lo que también causa hipoxia.

Cambios en la textura y composición de la materia orgánica. La

deposición de nuevos sedimentos puede cambiar la composición y tipo de sedimentos. Las fuertes lluvias y los aumentos en el nivel de la marea pueden causar la deposición de sedimentos y de materia orgánica en los manglares. Adicionalmente, los vientos y las olas pueden aflojar la biomasa subterránea, lo que resulta en la reducción de la consistencia del suelo, favorece su hundimiento y causa cambios en la topografía y en el hidroperíodo (Mazda *et al.*, 2002; Teutli-Hernández y Herrera-Silveira, 2016).

Manglares a lo largo de la costa de Warderick Wells Cay en el Parque Terrestre y Marino Exuma Cays, Bahamas. © Mark Godfrey/TNC.

Severidad de los daños causados por huracanes



MÍNIMOS



1. Defoliación leve
2. Ruptura de ramas pequeñas
3. Partículas suspendidas en la columna de agua



MODERADOS



1. Ruptura de ramas pequeñas y medianas
2. Inundación moderada (hasta 2,5 metros)
3. Sedimentación moderada de los canales



EXTENSIVOS



1. Ruptura de ramas grandes
2. Grandes volúmenes de material leñoso caído
3. Inundación extensiva (2,7 a 3,6 metros)
4. Interrupción del flujo hidrológico
5. Salinización de los sedimentos



EXTREMOS



1. Árboles grandes caídos/arrancados de raíz
2. Cambio en la estructura y composición (altura y tamaño)
3. Inundación extrema (3,9 a 5,5 metros)
4. Intrusión de agua marina
5. Apertura de entradas de agua a través de islas barrera o sistemas de dunas



CATASTRÓFICOS



1. Ausencia de plántulas y árboles jóvenes
2. Árboles grandes caídos/arrancados de raíz
3. Disminución de la densidad y la complejidad
4. Inundación catastrófica y prolongada (mayor a 5,5 metros)
5. Salinización de los sedimentos
6. Apertura de entradas de agua a través de islas barrera y sistemas de dunas

La severidad del daño que los huracanes ocasionan a los manglares depende de la condición de cada manglar y de las características de cada huracán (intensidad, velocidad del viento, marejada ciclónica, tamaño). Krauss y Osland (2020) proponen una descripción de los daños según la intensidad del huracán (Figura 7).

Figura 7. Grado del daño a los manglares con base en la intensidad de los huracanes, empleando la escala Saffir-Simpson. Modificado de Krauss y Osland, 2020.

3

Grado, ubicación y severidad de los daños

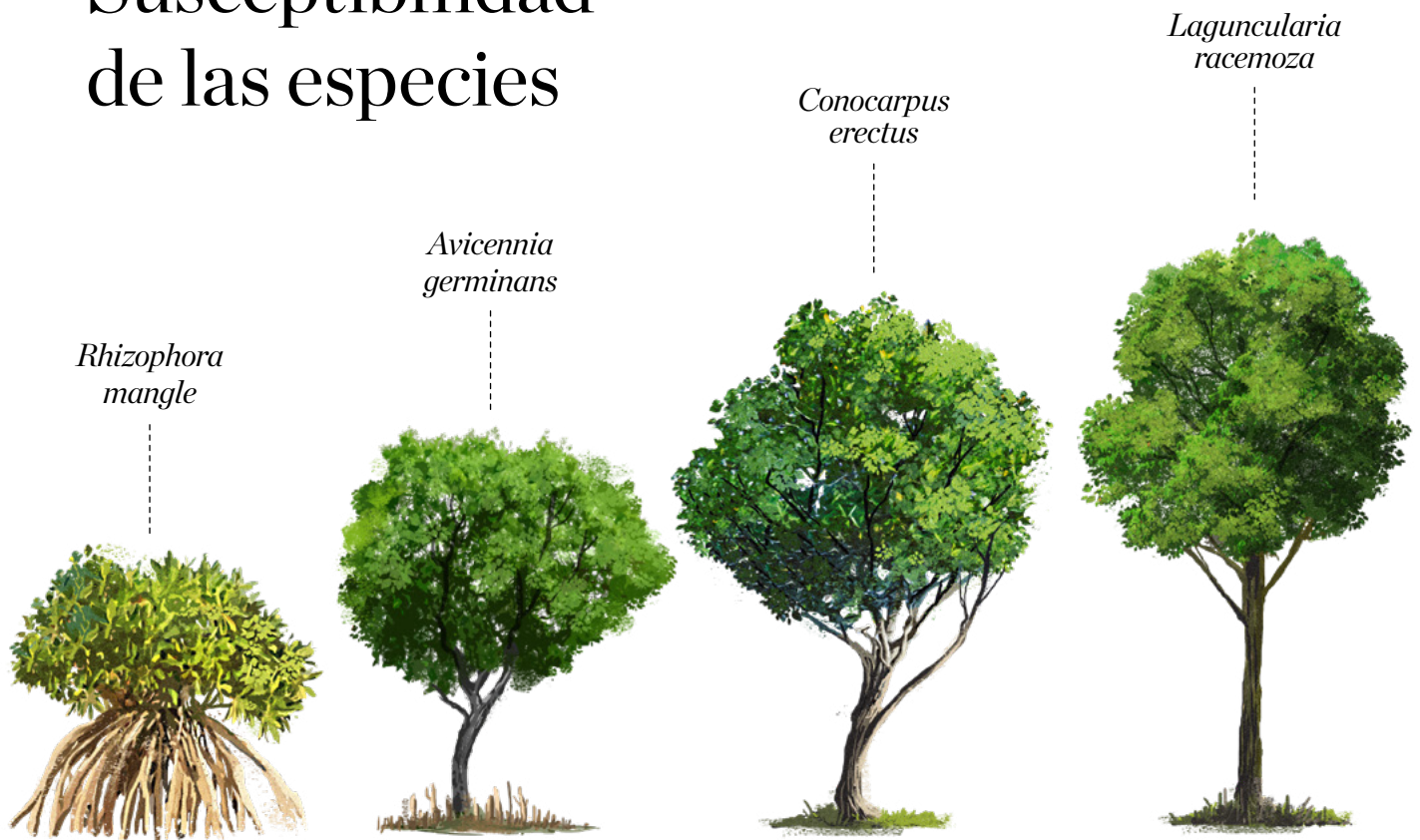
El grado y la severidad del daño a los manglares que resulta tras un huracán no es homogéneo y varía dependiendo de numerosos factores. Taillie *et al.* (2020) estiman que, durante las temporadas de huracanes de 2009 a 2017, el daño a los manglares fue de entre 86.439 y 133.662 hectáreas a lo largo del Golfo de México, el Caribe, Centroamérica y Suramérica. Otros estudios han encontrado que la biomasa de manglares muertos tras un huracán puede llegar a las 150 toneladas por hectárea (Sánchez e Islebe, 1999).

Cuando un huracán toca tierra, transfiere su energía al sistema costero, donde los manglares que bordean la costa reciben el impacto más violento (Carrillo *et al.*, 2008). La proporción de árboles dañados es mayor en áreas en las que hay conexión con aguas abiertas.

A continuación, describimos factores bien documentados que han contribuido al grado y severidad del daño a los manglares en el Golfo de México y el Caribe.

La vegetación y los manglares colman la costa de la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an en la región de Pez Maya en el este de la Península de Yucatán, México.
© Edward Porter/TNC

Susceptibilidad de las especies



Varios autores han discutido ampliamente la susceptibilidad de diferentes especies de mangle a los vientos fuertes. Kovacs *et al.* (2001) encontraron que el *Rhizophora mangle* es más resistente a los vientos de huracán que el *Avicennia germinans*; sin embargo, Smith *et al.* (1994), Imber *et al.* (1996) y Ross *et al.* (2006) llegaron a la conclusión contraria. Por último, Sherman *et al.* (2001), Milbrandt *et al.* (2006) y Smith *et al.* (2009) no encontraron ninguna diferencia en cuanto a susceptibilidad al viento entre las dos especies. Varios autores han reportado que el *Rhizophora mangle* resulta más dañado que el *Avicennia germinans* y el *Conocarpus erectus* tras un huracán de baja categoría (Imbert *et al.*, 1996; Galeano *et al.*, 2007). Los vientos fuertes pueden defoliar y arrancar de raíz a otra especie presente en el Caribe, *Laguncularia racemosa*. Al igual que *Avicennia germinans*,

la especie *Laguncularia racemosa* puede volver a crecer si la salinidad del agua intersticial es menor a 40 ups. Cuando un tronco de *L. racemosa* se cae, pero las raíces permanecen vivas, volverá a crecer y a generar nuevas ramas que crecerán de manera vertical como nuevos troncos, como lo atestigua la experiencia de campo de Herrera. Sin embargo, cuando ocurren huracanes mayores, no hay diferencias significativas entre especies porque las ráfagas de viento y las marejadas ciclónicas son muy violentas.

Krauss y Osland (2020) realizaron un análisis en el Caribe y sugirieron que la tolerancia de cada especie de mangle a los huracanes está influenciada por las condiciones de cada lugar, el tipo ecológico de manglar, y el viento, la lluvia, las olas y la sedimentación generadas por la tormenta específica.

Estructura forestal: tamaño de los troncos y altura de los árboles

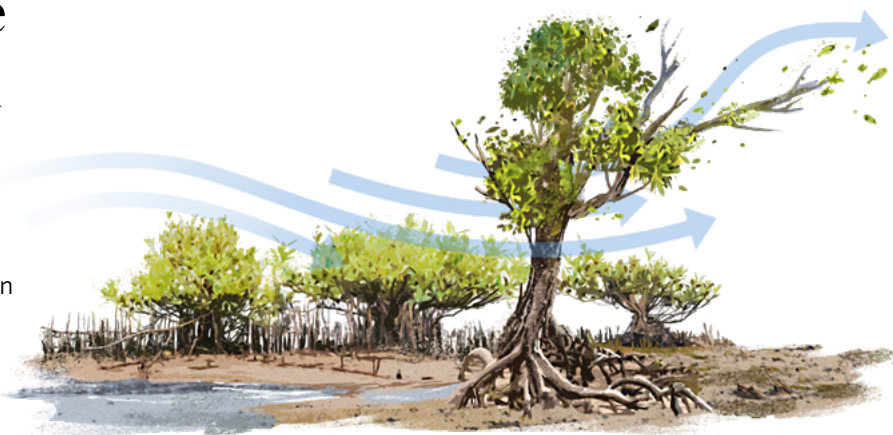
Los individuos cuyos troncos tienen un diámetro superior a los 20 centímetros sufren más daños que los individuos con diámetros más pequeños, pues entre más ancho sea el tronco, es menos flexible para resistir las ráfagas de viento.

En bosques de manglar maduros, los árboles más pequeños pueden resistir los fuertes vientos con mayor efectividad, contrario a lo que ocurre con los árboles más altos, que son más susceptibles a romperse (Islebe et al., 2009; Roth, 1992). Imbert (2018) reportó que, en los bosques mixtos, la especie más alta, *R. mangle*, sufre más daños letales (80% de pérdida de área basal) en comparación con *A. germinans* (20% de pérdida de área basal) (Figura 8); este último sufre daños letales solo cuando es impactado por vientos superiores a los 124 kilómetros por hora.

Tipo ecológico de manglar

El tipo ecológico de manglar desempeña un rol importante en la severidad del daño causado por las tormentas y huracanes. Las características hidrológicas y geomorfológicas del lugar determinan el tipo ecológico de los manglares, lo que a su vez determina la estructura y composición del ecosistema (Lugo y Snedaker, 1974).

Los manglares de borde están ubicados de manera paralela a la costa y junto al mar, y son los primeros en recibir el impacto de los huracanes (Carrillo et al., 2008). Sufren más daños que otros tipos de manglares.



En el caso de los *manglares de cuenca*, las marejadas ciclónicas depositan sedimentos que aumentan la elevación del suelo, lo que puede llegar a ahogar la vegetación y/o alterar la salinidad del sistema (Smith et al., 2009; Imbert, 2018). Se ha observado que los manglares de cuenca se ven más afectados por las tormentas tropicales que los manglares ribereños, marginales e insulares. Sin embargo, los manglares de cuenca presentan una recuperación natural más rápida porque su productividad primaria es mayor (Imbert y Portecop, 1986; Imbert y Rollet, 1989).

Figura 8. Impacto de los vientos de huracán en los manglares, donde los árboles más altos son los más afectados por el paso de un huracán.

Adaptado de Javier Robles Toral.

Fragmentación o degradación de los manglares

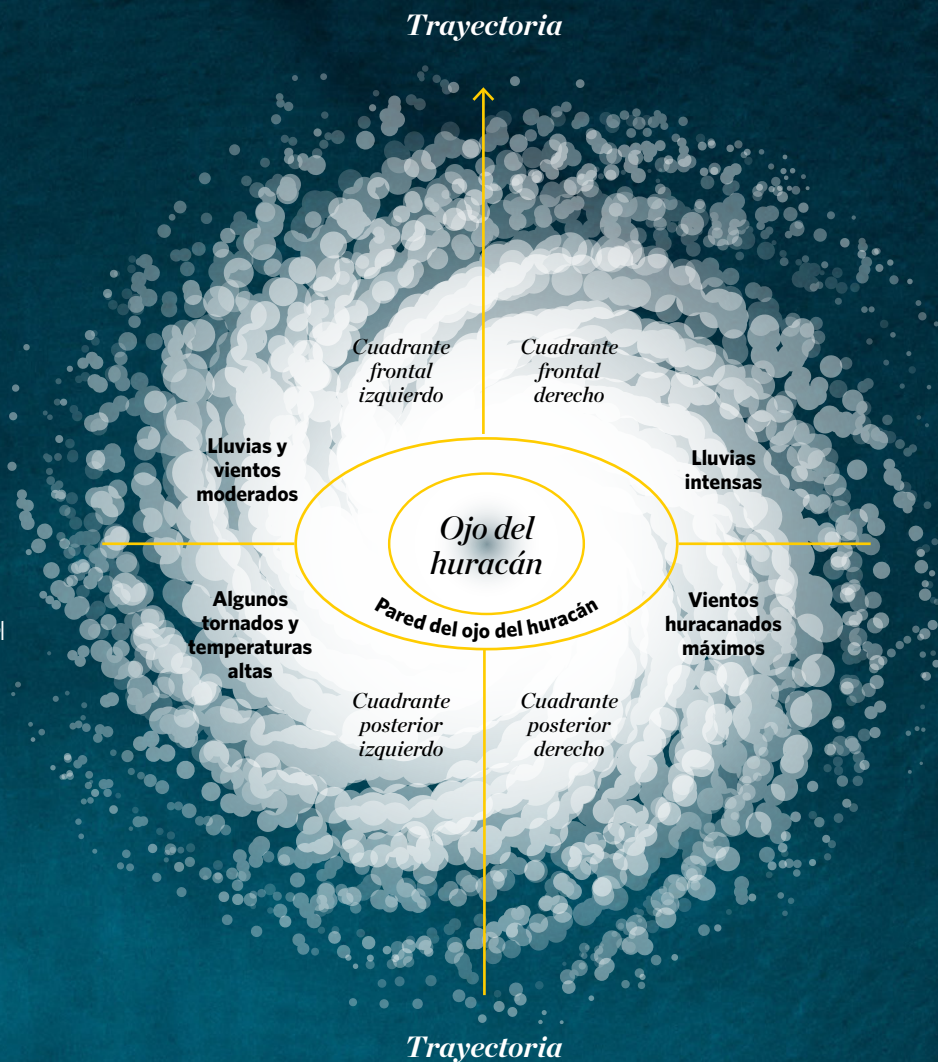
El desarrollo costero y la acuicultura han fragmentado los sistemas costeros, incluyendo los manglares. La fragmentación afecta la estructura de la vegetación y los flujos hidrológicos, lo que los hace más susceptibles a los daños causados por fenómenos naturales como tsunamis y huracanes. En el Caribe, los manglares ubicados cerca de las áreas pobladas y dentro de la trayectoria habitual de las tormentas y los huracanes, son más propensos a sufrir daños debido al debilitamiento de su estructura (MEA, 2005).



Ubicación de los manglares en relación con la trayectoria de los huracanes y la distancia al mar

La vulnerabilidad de los manglares de sufrir pérdidas o daños por huracanes está influenciada por su ubicación en relación con la trayectoria de un huracán, su exposición a mar abierto, y su distancia desde el centro del huracán (Baldwin, Egnotovitch, Ford y Platt, 2001; Platt, Doren y Armentano, 2000).

La posición de un manglar en relación con la trayectoria de un huracán tiene un efecto significativo en la intensidad de los daños a la vegetación. En el hemisferio norte, la presión ejercida por los vientos y las olas en el lado derecho de un huracán puede ser hasta 25% mayor que la ejercida en el lado izquierdo (Stanturf *et al.*, 2007). Por lo tanto, la mayoría de los huracanes causan más daños al lado derecho y al frente de la trayectoria de su ojo. Se ha observado que, en los cuadrantes ubicados a la derecha de la trayectoria del huracán, el daño causado por huracanes de categoría 1 es similar al daño causado por huracanes de categoría 4 (NASA, 2017). De acuerdo con Novlan y Gray (1974), en el Caribe, los manglares más afectados serán los que están ubicados en las paredes del ojo y en los cuadrantes frontal y posterior derecho durante el paso de un huracán (Figura 9). La severidad del daño disminuye a medida que aumenta la distancia hasta la trayectoria del ojo del huracán (Dahal *et al.*, 2014; Carrillo *et al.*, 2008; Long *et al.*, 2016).



La ubicación de los manglares en relación con mar abierto también es un factor determinante del daño. Los manglares ubicados en la costa y adyacentes a aguas abiertas sufrirán los mayores daños por las olas y marejadas ciclónicas (Carrillo *et al.*, 2008; Long *et al.*, 2016). Los manglares ubicados en la parte terrestre del sistema por lo general están compuestos por especies con sistemas de raíz poco desarrolladas, como *Conocarpus erectus* y *Laguncularia racemosa*. Por lo tanto, son más vulnerables a los fuertes vientos y se han observado daños severos (Long *et al.*, 2016).

Figura 9. Diagrama de las zonas de un huracán. En el hemisferio norte, los cuadrantes de la derecha representan los vientos y lluvias más fuertes del huracán.

Adaptado de Javier Robles Toral.

Frecuencia de los huracanes

Los manglares en el Golfo de México y el Caribe se han adaptado para ser resistentes y resilientes a huracanes de categoría 1 y 2, y se pueden recuperar de manera natural en menos de cinco años (Danielson *et al.*, 2017), pero la recuperación puede tomar más tiempo (hasta veinte años) cuando los manglares son impactados por huracanes mayores de categoría 3 o superior (Imbert, 2018). Un incremento en la frecuencia y/o severidad de los huracanes, como la que

se ha observado en años recientes (Kossin, 2020), puede interrumpir la recuperación natural de los manglares y generar una acumulación de daños (Taillie, 2020). Los manglares impactados de manera frecuente tendrán una mayor mortalidad de árboles, ramas rotas y defoliación, lo que resulta en una mayor descomposición de materia orgánica, mayor formación de suelo y suelo más compacto (Snedaker, 1995; Lang'at *et al.*, 2014). Estas condiciones del suelo estratificado, junto con el agua estancada, pueden entorpecer la regeneración natural de los manglares (Sherman *et al.*, 2000; Cahoon *et al.*, 2003).

Fotografía aérea de Punta Gorda, en la costa del Golfo de México de Florida, en el extremo norte del puerto de Charlotte, cerca de la desembocadura del río Peace. © Carlton Ward Jr.





4

Acciones para restaurar o reparar los daños

Como se señaló anteriormente, los manglares se pueden recuperar de manera natural tras un huracán. Sin embargo, esta recuperación puede tomar varios años, lo que deja a los manglares vulnerables a daños adicionales por tormentas mientras están en el proceso de recuperación. La restauración activa y reparación de los manglares tras el daño causado por un huracán puede acelerar su recuperación y mejorar su resiliencia a futuros huracanes. En esta sección describimos técnicas comunes para reparar y restaurar los manglares. Si bien discutimos la restauración y recuperación de los manglares en el contexto de solventar el daño causado por los huracanes, muchas de las técnicas descritas en esta sección también se pueden aplicar para restaurar manglares que no fueron dañados específicamente por un huracán. En efecto, existe un creciente interés e inversión en la restauración ecológica de los ecosistemas de manglar (REM) (Mckee y Faulkner, 2000; Balke *et al.*, 2014; Dittmann *et al.*, 2019).

El tipo de restauración y reparación de manglar necesaria dependerá del tipo y magnitud de la perturbación, así como del contexto ambiental en el que ocurra. En todos los escenarios, se recomienda aplicar un conjunto de acciones y procedimientos para garantizar la recuperación exitosa de un manglar (Twilley y Rivera, 2005). Existen cuatro pasos principales en la etapa de diseño (Field, 1999, Teutli-Hernández *et al.*, 2020):

- 1 Caracterizar las condiciones físicas y ecológicas del lugar.
- 2 Identificar los factores que regulan la dinámica del lugar.
- 3 Identificar las causas de degradación.
- 4 Ubicar la fuente de semillas y plántulas.

Mangrove roots grow from tidal sand flats along the coast of Warderick Wells Cay in the Exuma Cays Land and Sea Park, The Bahamas. © Jeff Yonover.

Enfoques para la restauración de manglares

Rehabilitación hidrológica

Remoción de sedimento, creación y mantenimiento de canales para la recuperación del flujo de agua.



Rehabilitación topográfica

Modificación del nivel del suelo de acuerdo con el nivel del mar.



Reforestación

Sembrar plántulas de mangle. Solo se recomienda cuando las condiciones hidrológicas y topográficas son adecuadas para el crecimiento de mangles.



Figura 10. Enfoques comunes para la restauración de manglares.

Las acciones de restauración que se realizan comúnmente se pueden agrupar en tres enfoques, resumidos en la Figura 10.

Acciones involucradas en la rehabilitación hidrológica



DRAGADO DE CANALES



REHABILITACIÓN DE LOS CANALES DE AGUA



APERTURA DE NUEVOS CANALES

Los objetivos de la rehabilitación hidrológica y topográfica son iniciar o acelerar la recuperación de las condiciones ambientales, hidrológicas y fisicoquímicas que permiten el establecimiento de vegetación y el retorno a un ecosistema estable ecológica y funcionalmente (SER, 2002). Sin embargo, la regeneración natural desempeña un rol importante. Los manglares se recuperaron de manera natural en Guanaja, Honduras, veinte años después del impacto del huracán Mitch en 1998, con resultados similares a los de los proyectos de reforestación en la misma área (Fickert, 2020). Se recomienda que todos los proyectos de restauración involucren a partes interesadas locales en la restauración, pues la comprensión comunitaria del propósito y valor del proyecto mejora el éxito de mismo a largo plazo (TNC, 2021). Por el contrario, la mala gestión y una consideración limitada de los factores ecológicos son las principales razones para el fracaso de los proyectos de restauración (Teutli-Hernández, 2017; Beck *et al.*, 2020).

Rehabilitación hidrológica

El principal objetivo de la rehabilitación hidrológica es reestablecer los flujos hidrológicos, que son esenciales para mantener

la salinidad, temperatura, turbidez y concentraciones de oxígeno disuelto del agua, así como para la dispersión de propágulos y semillas desde áreas saludables hacia el lugar de restauración. La restauración hidrológica incluye despejar los cauces de agua y los canales naturales, excavar nuevos canales y realizar mantenimiento a los canales existentes (Teutli-Hernández *et al.*, 2020) (Figura 11).

La rehabilitación hidrológica empieza con la caracterización del lugar empleando imágenes aéreas y valoraciones topográficas para identificar áreas en las que se han alterado los flujos de agua, las rutas de los flujos naturales (de agua dulce o marina), las posibles trayectorias de nuevos canales, y los canales que necesitan mantenimiento (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Dragado de canales

El dragado es la remoción de sedimentos y restos depositados durante la tormenta para recuperar la capacidad de drenaje y optimizar la circulación de agua de un lugar a otro. Es necesario remover todo el material orgánico e inorgánico que obstruya la circulación de agua mientras se conservan las características originales de los canales (ancho, profundidad, extensión y dirección, entre otras). Es esencial mantener todo el

Figura 11. Acciones involucradas en la rehabilitación hidrológica de los manglares (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.

1

Identificar los flujos de agua

Mediante imágenes aéreas, estudios in situ y conocimiento de las comunidades locales.

2

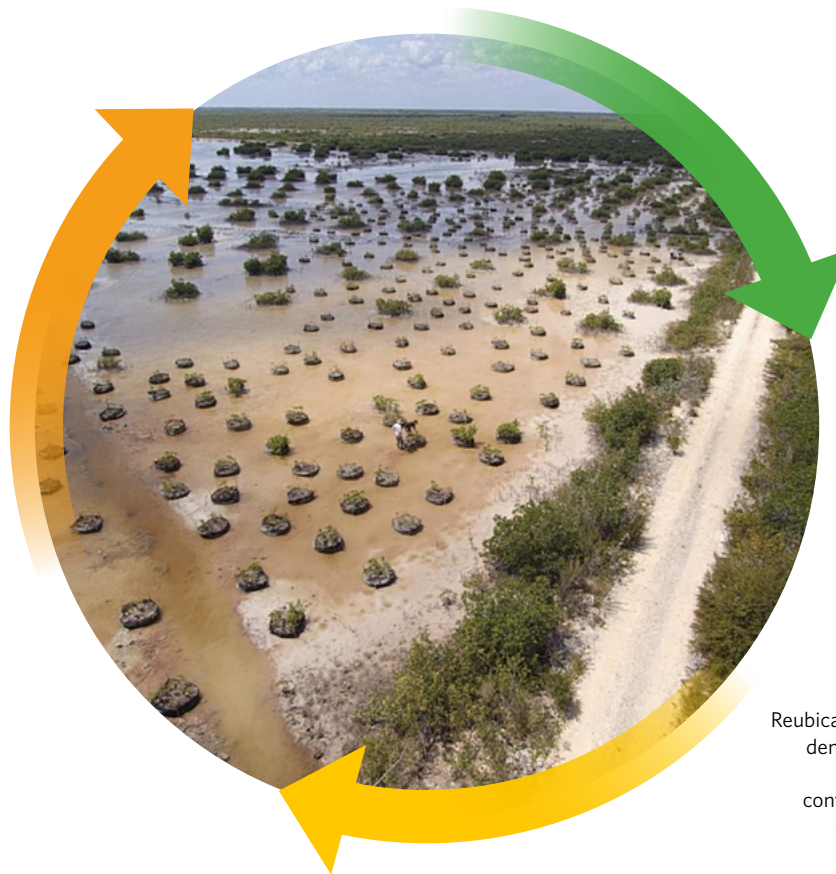
Liberación de obstáculos

Remoción del material que obstruye el flujo de agua y rehabilitación de los canales de acuerdo con las características.

3

Reubicación de materia orgánica

Reubicación de material orgánico dentro del lugar del proyecto. El material orgánico debe continuar descomponiéndose y proporcionar nutrientes.



material removido de los canales dentro del área a restaurar, pues este material dragado contribuye de manera considerable al almacenamiento de carbono (Teutli-Hernández *et al.*, 2020) (Figura 12). Es preciso ubicar el material orgánico e inorgánico dragado a los costados de los canales para minimizar la erosión, mejorar el flujo de agua y mejorar la dispersión de propágulos.

En algunos casos, el dragado es suficiente para recuperar la hidrología del lugar y las condiciones físicas y químicas del agua y de los sedimentos, lo que permite la supervivencia de los individuos y facilita el establecimiento de vegetación (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Rehabilitación de cruces de agua

La construcción de vías que alteran las características hidrológicas de los humeda-

les costeros ha sido una de las principales causas de degradación de los manglares y de disminución de su resiliencia ante huracanes, principalmente debido a la pérdida de conectividad hidrológica y las entradas limitadas de agua dulce (Lewis III, 2005; Wemple *et al.*, 2017; Teutli-Hernández y Herrera-Silveira, 2018). Las alcantarillas de agua diseñadas correctamente permiten que los flujos de agua conecten los humedales. Sin embargo, la mayoría de estos conductos no cumplen con los requisitos mínimos para permitir un intercambio adecuado de agua. Adaptar las alcantarillas ya existentes puede ser suficiente para que permitan un intercambio de agua adecuado entre los manglares bien conservados y los manglares alterados.

Teutli-Hernández *et al.* (2020) sugieren que las alcantarillas tengan una forma de V en ambos lados, que se amplíe inmediatamente debajo de la vía hacia los canales. Las líneas divergentes de la V deben tener

Figura 12. Procesos para el dragado de canales naturales (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografía cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.



SALIDAS EN FORMA DE V



LADOS DE CINCO METROS



INTERCONECCIÓN EN FORMA DE Y

una longitud de al menos cinco metros, una profundidad mínima de un metro, y conectarse con canales nuevos o naturales en forma similar a una Y. Esta adaptación en la estructura de la alcantarilla permite una mejor circulación de agua, así como un mayor rango de flujo de agua, incluso cuando hay mareas bajas o incrementos en el hidropériodo, como en el caso de los huracanes (Figura 13).

Apertura de nuevos canales

La apertura de nuevos canales en áreas degradadas se debe considerar solo cuando el dragado de canales naturales no es suficiente para la recuperación del flujo hidrológico, o cuando no se identificaron canales naturales. Por ejemplo, la apertura de un nuevo canal puede ser apropiada cuando la topografía del terreno se elevó por la deposición de sedimento e hizo que los canales se llenaran de sedimentos

(Ramasubramanian y Selvam, 2011; Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Para la excavación de estas vías de flujo, se recomienda usar un sistema de "redes", que permitan transportar el agua más eficientemente de un lugar a otro. El uso de redes garantiza el flujo continuo de agua sin causar un nuevo desbordamiento (Teutli-Hernández *et al.*, 2020). Lo idóneo es que este sistema de redes esté dispuesto en forma de zigzag, con un sistema de canales principales excavado a un ángulo de 45° a 90° con respecto de la fuente de agua, y un sistema de canales secundarios que se deben originar a un ángulo de 30° o 45° con respecto a su canal principal (UNEP-Nairobi Convention, USAID y WIOMSA, 2020) (Figura 14). La profundidad y pendiente de los canales dependerá del nivel de la marea, los flujos preferenciales y la información obtenida durante la caracterización del lugar. De nuevo, se recomienda que los sedimentos y demás material removido se mantenga dentro del perímetro del proyecto (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Figura 13. Características estructurales en la rehabilitación de cruces de agua (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.

Figura 14. Los nuevos canales permiten la rehabilitación hidrológica (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.



El posicionamiento y distribución de los canales debe ser similar a la configuración natural del lugar



Depositar el material extraído en las orillas de los canales para evitar su expansión



Combinar una disposición en zigzag con otros canales para incrementar la heterogeneidad



CONTROL DE SEDIMENTO



ACONDICIONAMIENTO DEL CENTRO DE DISPERSIÓN

Rehabilitación topográfica

Las características hidrológicas de los manglares están estrechamente relacionadas con la microtopografía del lugar y, a su vez, ambas determinan el establecimiento de especies y la estructura de la vegetación (Pérez-Ceballos *et al.*, 2017). Como se explicó en la sección 2, los cambios en la topografía pueden tener dos efectos: (i) una mayor elevación, lo que reduce los flujos de agua y los intercambios de sales y nutrientes y resulta en cambios en las características físicas y químicas de los sedimentos, y (ii) un nivel topográfico más bajo, lo que eleva los niveles de inundación y permite que superen con mayor facilidad la altura de las plántulas, cosa que evita su establecimiento y supervivencia (Flores-Verdugo *et al.*, 2010).

El objetivo de la rehabilitación topográfica es adaptar el nivel del suelo en relación con el nivel medio del mar. En la mayoría de los casos, es posible usar un cuerpo de agua cercano y manglares que estén en buena condición como referencia. La nivelación se puede realizar mediante la remoción de sedimentos para reducir la altura del terreno o mediante el establecimiento de centros de dispersión –plataformas elevadas o terrazas– para permitir el establecimiento

de las plántulas (Teutli-Hernández *et al.*, 2020) (Figura 15).

Remoción de sedimentos

La remoción de sedimentos y de material orgánico e inorgánico tiene como objetivo nivelar el sitio al reducir la elevación del suelo (Teutli-Hernández *et al.*, 2020). Cuando se combina esto con el mantenimiento de los pasos de agua, el dragado de los canales naturales, y la creación de nuevos canales, esta acción incrementa la resiliencia del sistema de manglar y fomenta la repoblación por parte de diferentes especies, lo que favorece la diversidad funcional, el proceso de sucesión secundaria y proporciona una mayor probabilidad de recuperación después de un impacto natural o antropogénico (Zedler, 2005).

Se recomienda que el sedimento removido se use para crear centros de dispersión o para rellenar lugares con niveles más bajos. Estos lugares que reciben el sedimento deben ser identificados mediante un estudio topográfico del terreno que luego se use para crear un modelo digital de elevación. Este modelo digital de elevación se puede usar para crear una red de flujos preferenciales y para identificar las vías de flujo históricas (Figura 16) (Teutli, 2005; Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Figura 15. Acciones involucradas en la rehabilitación topográfica de los manglares (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria- CINVESTAV.



Identificación de áreas con nivel topográfico bajo mediante la creación de modelos y mapas topográficos



Relleno y transferencia de sedimento y material orgánico a áreas con niveles topográficos bajos



Se recomienda la organización de los miembros de la comunidad para esta actividad

Preparación de centros de dispersión

La creación de centros de dispersión consiste en la construcción de plataformas elevadas para contrarrestar los períodos de altas inundaciones y flujos de marea (Thivakaran, 2017). La forma de estas plataformas puede ser circular, cuadrada o irregular, y se deben construir con el sedimento dragado en el lugar. Estas plataformas facilitan el establecimiento de semillas y propágulos con el objetivo de inducir la regeneración natural o preparar el lugar para la reintroducción artificial (Figura 17) (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

El uso de centros de dispersión para la restauración ecológica puede producir

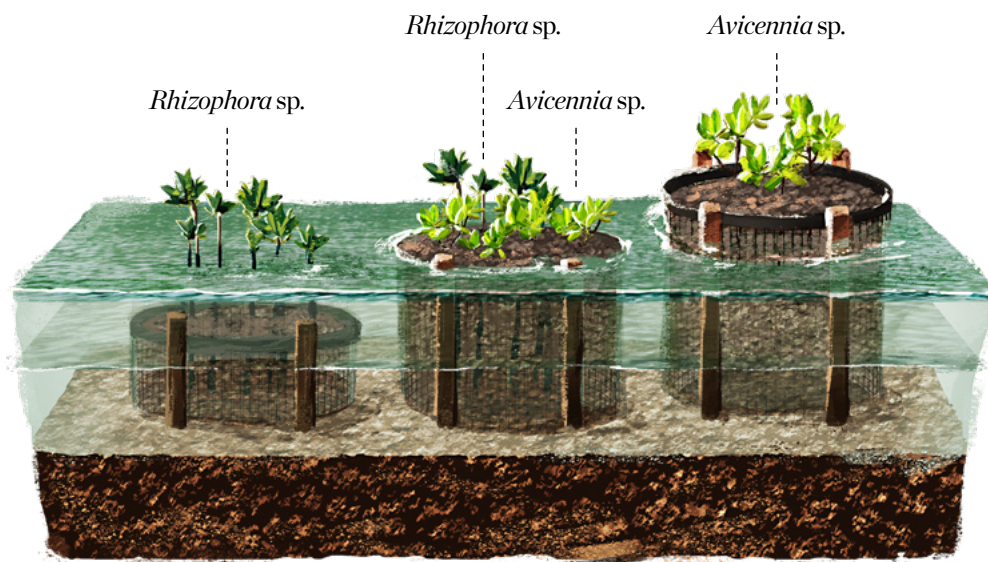
mejores resultados que otras acciones, pues estos promueven una mayor supervivencia a un menor costo económico (Febles-Patrón *et al.*, 2009; Thivakaran *et al.*, 2018). Es importante tener en cuenta que la cantidad, el espaciamiento y las características de los centros de dispersión dependerán de las condiciones del área a restaurar y de los objetivos y metas de la restauración (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

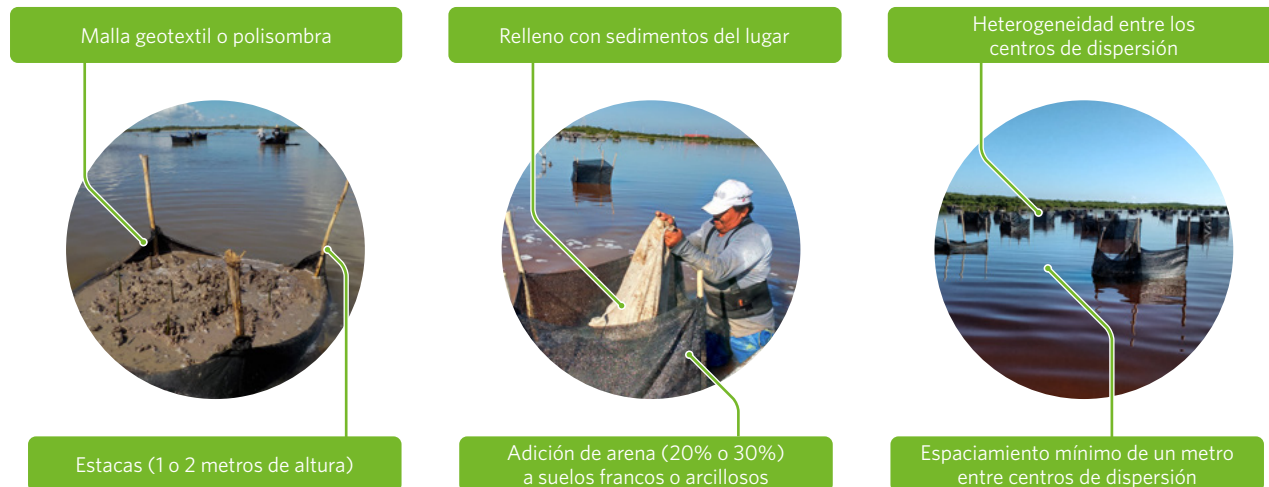
Los centros de dispersión deben tener diferentes alturas para permitir el establecimiento de diferentes especies. Los centros de dispersión se pueden crear, en parte, mediante la reutilización de material de otras áreas del mismo lugar, siempre y cuando este sea permeable y no se lo lleve el agua (Figura 18) (Thivakaran *et al.*, 2018).

Figura 16. Remoción de sedimentos durante la rehabilitación topográfica (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.

Figura 17. Ilustración de centros de dispersión con diferentes niveles topográficos para generar heterogeneidad en el paisaje (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).





Reforestación

Una de las técnicas más usadas para la restauración de los manglares ha sido la reforestación, mediante el uso de propágulos o plántulas cultivadas en viveros. Sin embargo, mucha de la información generada hasta la fecha proviene de ensayo y error que se ha enfocado en especies limitadas. Las pautas para la reforestación de manglares bajo diferentes condiciones no están claras, lo que ha hecho que resulte desafiante medir su efectividad en comparación con otros enfoques (Elster, 2000; Teutli-Hernández, 2017; Fickert, 2020).

La reforestación solo se debe emplear cuando la dispersión natural de semillas y propágulos es insuficiente (Teutli-Hernández *et al.*, 2020), pues esta puede reducir la probabilidad de supervivencia. Así mismo, los esfuerzos de reforestación solo se deben realizar *después* de evaluar y garantizar que las condiciones hidrológicas, sedimentológicas y topográficas del lugar sean adecuadas para sostener el ecosistema. Si estas condiciones no son adecuadas, se deben llevar a cabo las acciones apropiadas de rehabilitación antes de la siembra, pues la supervivencia de las nuevas plántulas y plantas requiere un ecosistema funcional. Estas acciones de rehabilitación pueden ser suficientes para permitir la recuperación del ecosistema, en cuyo caso la reforestación no sería necesaria.

Los viveros son una alternativa costosa para sustentar la reforestación, pues implican sembrar plántulas durante todo el año, independientemente del ciclo natural de la especie. Adicionalmente, se ha observado que las plántulas provenientes de viveros pueden sufrir estrés fisiológico, lo que reduce su supervivencia.

Las plántulas y plantas deben mantenerse y monitorearse durante al menos cinco años debido a la mortalidad relativamente alta de las plántulas recién sembradas en viveros. El primer año es el más crucial para la supervivencia, pues las raíces aún no están establecidas con firmeza y las plántulas pueden ser arrancadas por olas modestas o vientos moderados e irse flotando. En ciertos casos, las plántulas recién sembradas pueden requerir protección ante las olas y corrientes hasta que desarrollen raíces y tallos fuertes, especialmente cuando se encuentran en los bordes externos del área del manglar o cuando están expuestas a aguas más abiertas. Esto se puede lograr mediante la construcción de un rompeolas provisional. *Solo* se debe construir un rompeolas temporal después de confirmar que las características del lugar son apropiadas para ello, y se debe retirar una vez se hayan establecido las plántulas para evitar alterar la hidrología y topografía del lugar.

Figura 18. Acondicionamiento de centros de dispersión (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).

Fotografías cortesía del Laboratorio de producción primaria-CINVESTAV.



5

Costos de la restauración de manglares

Entender los costos que suelen estar asociados con las acciones de restauración de manglares es importante para determinar la mejor manera de asignar dinero a los proyectos de restauración de manglares. El costo de la restauración de manglares varía ampliamente según el tipo y geografía de cada proyecto, debido a diferentes factores como:

- El tipo de acción de restauración (por ejemplo, dragado versus reforestación).
- El costo de los materiales y la mano de obra, que varía mucho de un país a otro.
- La distancia y accesibilidad al lugar de restauración del manglar.
- La tenencia de la tierra y los requisitos de permisos locales.
- Si la restauración requiere maquinaria especializada o no.
- El alcance del monitoreo y el mantenimiento implementados tras la restauración pues, en la mayoría de los casos, el costo del monitoreo no se incluye en los costos de la restauración del manglar (Narayan *et al.*, 2019).

Plántulas de mangle negro, próximas a ser transportadas a un área de vivero, Haití. © Tim Calver.

Nos enfocamos en estimar el rango de los costos de proyectos de restauración de manglares en tres regiones: México, Florida y Las Bahamas. Para cada una de estas regiones, categorizamos los proyectos de restauración con el mayor detalle posible. En el caso de México, los proyectos de restauración de manglares se clasifican de acuerdo con uno o más de los tres enfoques generales para la restauración de manglares: (i) rehabilitación hidrológica; (ii) rehabilitación topográfica; y/o (iii) reforestación. En el caso de Florida y Las Bahamas, los proyectos de restauración de manglares se clasifican de acuerdo con uno o más de las cinco acciones específicas realizadas para restaurar o reparar manglares: (i) rompeolas/espigones/escolleras; (ii) canales/transportes/alcantarillas; (iii) excavación/relleno; (iv) siembra de manglares/humedales; y/o (v) nivelación/cambio del nivel del suelo.

En Florida y Las Bahamas, la categorización de proyectos se basa en la acción de restauración porque el costo de la restauración

está más fuertemente influenciado por la acción que por el enfoque y los objetivos más amplios. También existe una superposición considerable entre los enfoques de proyecto, pues a menudo están interrelacionados y son sinérgicos, y una o más de las acciones identificadas se podría usar para abordar uno o más de los enfoques de proyecto. Por ejemplo, la reforestación con plantas de mangle podría combinarse con otros métodos como cambiar el nivel del suelo en algunas áreas para alcanzar la elevación adecuada (rehabilitación topográfica) o crear canales a lo largo de un lugar para mejorar los flujos de marea (rehabilitación hidrológica). Sin embargo, en el caso de los proyectos de restauración en México, la información sobre las acciones de restauración no estaba disponible y, por lo tanto, clasificamos los proyectos según su enfoque de restauración. Antes de presentar un resumen de los costos de la restauración de manglares en cada región, resumimos brevemente el proceso empleado para identificar los proyectos relevantes en cada una de las tres regiones.

Un camino de madera serpentea a través de los manglares del parque nacional Lucayan en la isla Grand Bahama, Bahamas. © Shane Gross.





Identificar los costos de la restauración de manglares en México

Aunque se han implementado varios esfuerzos de restauración de manglares en México (tanto en el Golfo de México como en el Caribe mexicano), existe una falta de información pública sobre el costo de la restauración, pues los datos sobre los costos de la mayoría de los proyectos de restauración de manglares se encuentran en informes técnicos del gobierno y del sector privado, que no se comparten con el público.

Para estimar los costos de la restauración de manglares, se realizó una búsqueda sistemática de artículos e informes científicos de libre acceso, que están disponibles en línea y sin costo. Se recuperaron todos los artículos que mencionaban costos de restauración de

manglares en el Golfo de México, el Caribe mexicano y/o la cuenca del Caribe. A partir de esta búsqueda, se compilaron 26 fuentes de información sobre los costos de los proyectos de restauración de manglares, incluyendo 16 fuentes de México. Todos los costos de los proyectos de restauración de manglares identificados incluyen financiación para monitoreos que solo se realizaron durante la implementación de cada intervención. Los datos obtenidos se convirtieron a dólares estadounidenses (USD) usando los datos de tasa de cambio del Banco Mundial, y se ajustaron por inflación a USD de 2021 con base en datos publicados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

Fuente: Global Mangrove Partnership Dataset, World Atlas of Mangroves (Spalding, 2010). Creado con Natural Earth.

Identificar los costos de la restauración de manglares en México

Aunque se han implementado varios esfuerzos de restauración de manglares en México (tanto en el Golfo de México como en el Caribe mexicano), existe una falta de información pública sobre el costo de la restauración, pues los datos sobre los costos de la mayoría de los proyectos de restauración de manglares se encuentran en informes técnicos del gobierno y del sector privado, que no se comparten con el público.

Para estimar los costos de la restauración de manglares, se realizó una búsqueda sistemática de artículos e informes científicos de libre acceso, que están disponibles en línea y sin costo. Se recuperaron todos los artículos que mencionaban costos de restauración de manglares en el Golfo de México, el Caribe mexicano y/o la cuenca del Caribe. A partir de esta búsqueda, se compilaron 26 fuentes de información sobre los costos de los proyectos de restauración de manglares, incluyendo 16

fuentes de México. Todos los costos de los proyectos de restauración de manglares identificados incluyen financiación para monitoreos que solo se realizaron durante la implementación de cada intervención. Los datos obtenidos se convirtieron a dólares estadounidenses (USD) usando los datos de tasa de cambio del Banco Mundial, y se ajustaron por inflación a USD de 2021 con base en datos publicados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

Fuente: Global Mangrove Partnership Dataset, World Atlas of Mangroves (Spalding, 2010). Creado con Natural Earth.



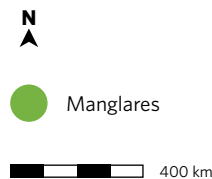


Identificar los costos de la restauración de manglares en Florida

Para identificar los costos de la restauración de manglares en Florida, se involucró a las partes interesadas locales y regionales entre julio y septiembre de 2021. Muchas de las partes interesadas ofrecieron voluntariamente información sobre sus proyectos de restauración de manglares previos y en curso. Esta participación resultó en la creación de una base de datos que contiene información sobre los costos de cerca de 80 proyectos de restauración de manglares, arrecifes de ostras y humedales que se implementaron en Florida entre 1991 y 2020. Muchas partes interesadas nos brindaron información sobre proyectos de restauración de humedales y de arrecifes de ostras porque estos a menudo

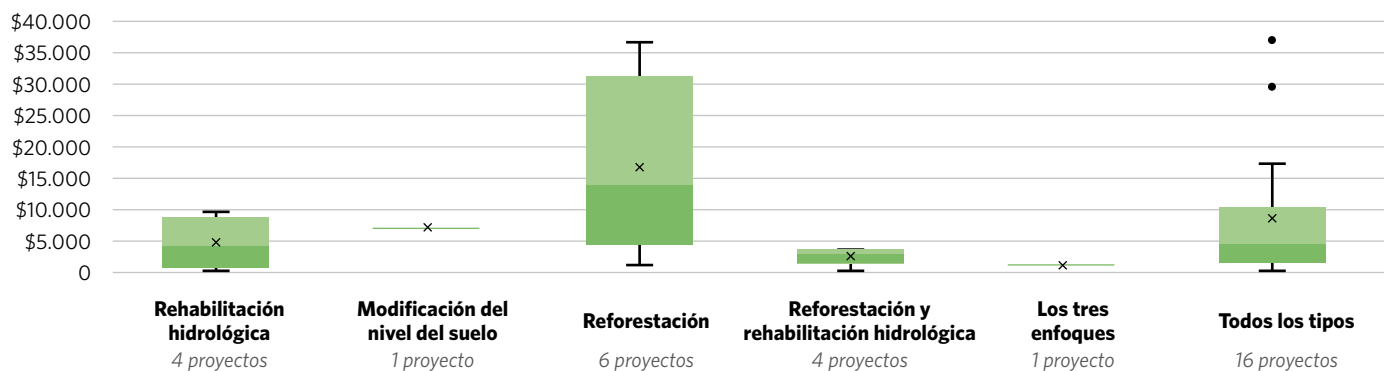
incluyen la restauración o reclutamiento de manglares como componente del proyecto, incluso si no es su objetivo principal.

Para proporcionar información más confiable sobre el costo de restauración de manglares, se filtraron algunos datos de la base de datos. Se eliminaron los proyectos de restauración que se enfocaban exclusivamente en los arrecifes de ostras o aquellos sin detalles discernibles con respecto al alcance del trabajo, el tamaño del proyecto o las fechas de finalización. Sin embargo, se consideró apropiado incluir los proyectos de restauración de humedales, pues a menudo resultaban en el reclutamiento natural de manglares. Varios socios de conservación indicaron que el reclutamiento natural de manglares es su método favorito de reforestación pues puede ser significativamente más exitoso que la siembra. La base de datos final contiene cerca de cuarenta proyectos de restauración de manglares y humedales. Los costos de los proyectos de restauración se convirtieron a costo unitario por hectárea, que se ajustó a costos de 2020 usando el índice de precios al consumidor de la Oficina de Estadísticas Laborales de EE.UU.



Fuente: Global Mangrove Partnership Dataset, World Atlas of Mangroves (Spalding, 2010). Creado con Natural Earth.

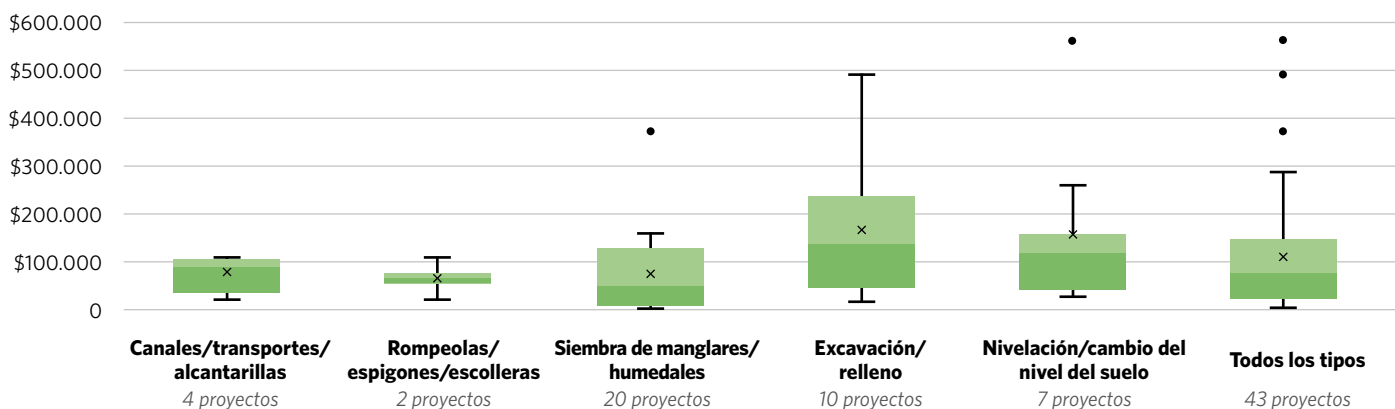
Identificar los costos de la restauración de manglares en Las Bahamas



En México, se identificaron 16 proyectos de restauración de manglares, y cerca de dos tercios (10) de estos se desarrollaron únicamente en Veracruz. Los costos de los proyectos documentados, resumidos por enfoque (topográfico, hidrológico o reforestación) (Figura 19) oscilaron entre USD 170 por hectárea y USD 37.000. Para la totalidad de proyectos, los costos

medios fueron de USD 8.500 por hectárea y los costos medianos fueron de USD 4.500. Los costos medios y medianos de los proyectos de restauración fueron más altos para los proyectos de reforestación, en los cuales los costos medios de los proyectos fueron de USD 16.700 por hectárea y los costos medianos fueron de USD 14.000 por hectárea.

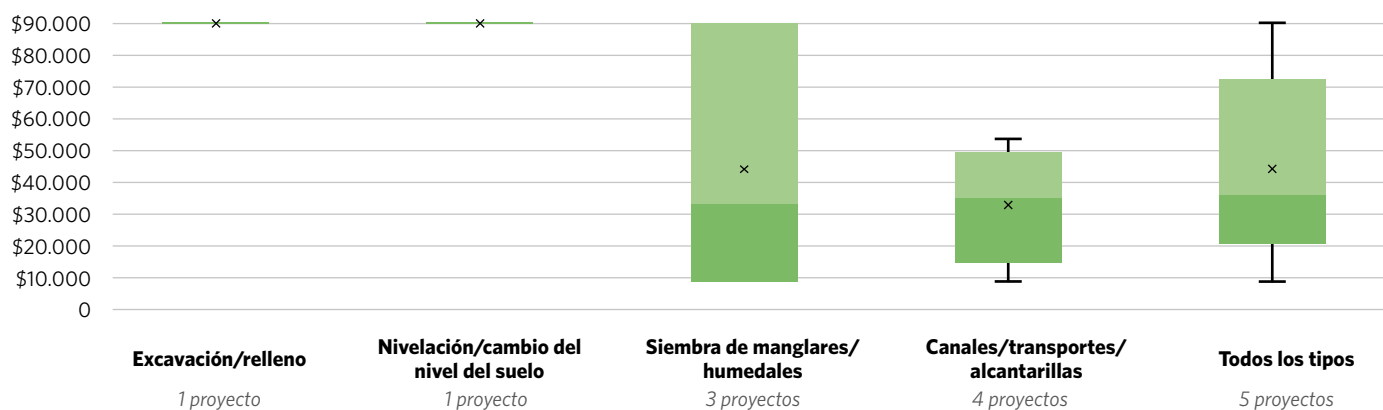
Figura 19. MCostos de la restauración de manglares para 16 proyectos en México resumidos por enfoque de proyecto y expresados en USD de 2020 por hectárea. Los costos medianos se denotan con un cambio de color y los costos medios se denotan con una X.



En México, se identificaron 16 proyectos de restauración de manglares, y cerca de dos tercios (10) de estos se desarrollaron únicamente en Veracruz. Los costos de los proyectos documentados, resumidos por enfoque (topográfico, hidrológico o reforestación) (Figura 19) oscilaron entre USD 170 por hectárea y USD 37.000.

Para la totalidad de proyectos, los costos medios fueron de USD 8.500 por hectárea y los costos medianos fueron de USD 4.500. Los costos medios y medianos de los proyectos de restauración fueron más altos para los proyectos de reforestación, en los cuales los costos medios de los proyectos fueron de USD 16.700 por hectárea y los costos medianos fueron de USD 14.000 por hectárea.

Figura 20. Costos de la restauración de manglares por actividad de restauración para 43 proyectos en Florida, expresados en USD de 2020 por hectárea. Los costos medianos se denotan con un cambio de color y los costos medios se denotan con una X.



Se identificaron cinco proyectos de restauración de manglares en Las Bahamas, y los costos documentados oscilan entre aproximadamente USD 8.000 por hectárea y USD 90.000 por hectárea, con un costo medio de USD 44.000 por hectárea y un costo mediano de USD 36.000 por hectárea (Figura 21). Cuatro de los cinco proyectos incluyeron la restauración de flujos hidrológicos en arroyos de marea obstruidos por vías y calzadas sin alcan-

tarillas, o por conductos que han sido afectados y en los cuales el flujo de agua es insuficiente para mantener el ecosistema en su estado previo a la construcción. Estos proyectos tuvieron costos de restauración más bajos, con una media de USD 33.000 por hectárea y un costo mediano de USD 35.000 por hectárea. En contraste, el proyecto de restauración que costó USD 90.000 por hectárea fue el único que incluyó excavación y relleno.

Figura 21. Costos de la restauración de manglares por actividad de restauración para 5 proyectos en Las Bahamas, expresados en USD de 2020 por hectárea. Los proyectos pueden tener múltiples actividades de restauración. Los costos medianos se denotan con un cambio de color y los costos medios se denotan con una X.

País	Número de proyectos	Costo mínimo por hectárea (USD de 2020)	Costo promedio por hectárea (USD de 2020)	Costo máximo por hectárea (USD de 2020)
México	16	\$170	\$4.500	\$37.000
Florida	43	\$500	\$77.000	\$562.000
Las Bahamas	5	\$8.000	\$36.000	\$90.000

En general, el costo de la restauración depende de las características del lugar, así como del tipo de acción que se implemente. Encontramos que el costo mediano por hectárea de la restauración de manglares para todos los proyectos fue: USD 4.500 en México (16 proyectos); USD 77.000 en Florida (43 proyectos); y USD 36.000 en Las Bahamas (5 proyectos). Estos costos están en línea con los rangos documentados en estudios previos (Tabla 1) (Narayan et al., 2019; Beck et al., 2020).

Varios factores contribuyen al amplio rango del costo de los proyectos en las tres

regiones. Encontramos que los proyectos de restauración de manglares en México usan mucha menos maquinaria y equipo pesado, incluso cuando se realiza restauración hidrológica y topográfica. En segundo lugar, los costos de la mano de obra varían bastante entre las regiones (por ejemplo, los costos de mano de obra en México son una décima parte de los costos de la mano de obra en Estados Unidos). Así mismo, los costos en especie proporcionados por voluntarios, socios y otros donantes por lo general no se tienen en cuenta en los costos totales de los proyectos.

Tabla 1. Resumen de proyectos y costos de restauración de manglares por país.

6

Consideraciones finales

Los manglares son ecosistemas valiosos que se extienden a lo largo de costas tropicales y subtropicales en todo el mundo. Además de los muchos otros servicios ecosistémicos que prestan, los manglares funcionan como línea de defensa vital contra las tormentas tropicales y los huracanes, al reducir las marejadas ciclónicas y disipar la energía de las olas durante las tormentas, lo que puede llevar a reducciones significativas de las inundaciones tierra adentro (Beck *et al.*, 2020). Como resultado, los ecosistemas de manglar pueden soportar graves daños, incluyendo pérdida de árboles y cambios en las condiciones del

sedimento y en la hidrología del ecosistema, entre otros.

Los investigadores en México han observado que los manglares de la Península de Yucatán son resilientes a las tormentas siempre y cuando estén en condición saludable antes del evento (Islebe *et al.*, 2009; Herrera-Silveira *et al.*, 2010). Cuando un manglar está saludable, el período promedio de recuperación natural es de entre 7 y 13 años. Sin embargo, cuando el manglar ya está degradado, el tiempo de recuperación puede exceder los veinte años y, en el peor de los casos, es posible que el manglar nunca se

Isla Blanca, Isla Mujeres, Quintana Roo. © Carlos Gustavo Blanco Matus/Concurso de Fotografía de TNC 2021.

recupere sin intervención humana. En todos los casos, el tiempo de recuperación se puede acortar si se implementan acciones de restauración inmediatas tras la tormenta. En el caso de los manglares saludables, los tiempos de recuperación se pueden reducir hasta en un 50% con la implementación de acciones de restauración tras la tormenta. Es importante tomar esto en consideración, especialmente si la frecuencia de las tormentas incrementa y el tiempo de recuperación entre tormentas disminuye, como predicen algunos investigadores.

Afortunadamente, implementar medidas de mitigación y restauración antes de la tormenta puede reducir el costo de reparar los daños a los manglares tras una tormenta. La restauración de los ecosistemas de manglar se ha implementado ampliamente en el Golfo de México y el Caribe desde la década de 1970. Con base en las experiencias aprendidas de estos proyectos de restauración de ecosistemas y en las técnicas citadas en este informe, recomendamos que cualquier proyecto de restauración incluya:

- 1 La identificación de áreas de manglar que presenten algún grado de deterioro (análisis espacial y de campo).
- 2 La implementación de acciones orientadas a la recuperación de estas áreas.
- 3 El monitoreo continuo del área restaurada usando imágenes satelitales o de drones y estudios de campo.

Como se discutió anteriormente, el costo de la restauración de manglares puede variar bastante de acuerdo con cada geografía y actividad de restauración.

En nuestras tres regiones prioritarias, documentamos un costo mediano de restauración de manglares por hectárea de USD 4.500 en México, USD 77.000 en Florida y USD 36.000 en Las Bahamas. Para los 64 proyectos de restauración de manglares que revisamos, los costos por hectárea oscilan entre USD 200 y USD 562.000.

En este informe, hemos revisado los daños potenciales que sufren los manglares como resultado de los huracanes y las acciones potenciales que se pueden realizar para restaurar los manglares dañados. Nuestro objetivo es que los profesionales y otras partes interesadas relevantes puedan usar esta información para comprender mejor la importancia de restaurar y reparar los manglares tanto antes como después de una tormenta. Es crucial entender qué acción de restauración es necesaria para garantizar el éxito del proyecto de restauración. Adicionalmente, el costo de la restauración puede ayudar a las personas a abogar por proyectos de restauración rentables. Los manglares pueden servir como una primera línea de defensa que resulta vital, pero solo si se mantienen, restauran y manejan empleando políticas y prácticas basadas en la ciencia.



Referencias

- Allen, J. A., Ewel, K. C., and Jack, J. (2001). Patterns of natural and anthropogenic disturbance of the mangroves on the Pacific Island of Kosrae. *Wetlands Ecology and Management*, 9(3), 291-301.
- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1-13.
- Baldwin, A., Egnotovitch, M., Ford, M., and Platt, W. (2001). Regeneration in fringe mangrove forests damaged by Hurricane Andrew. *Plant Ecology*, 157(2), 151-164.
- Balke, T., Herman, P. M., and Bouma, T. J. (2014). Critical transitions in disturbance driven ecosystems: Identifying windows of opportunity for recovery. *Journal of Ecology*, 102(3), 700-708.
- Beck, M. W., Heck, N., Narayan, S., Menéndez, P., Torres-Ortega, S., Losada, I. J., Way, M., Rogers, M., and McFarlane-Connelly, L. (2020). Reducing Caribbean Risk: Opportunities for Cost-Effective Mangrove Restoration and Insurance. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.
- Boose, E. R., Foster, D. R., Plotkin, A. B., and Hall, B. (2003). Geographical and historical variation in hurricanes across the Yucatan Peninsula. In A. Gómez-Pompa, M.F. Allen, S. L. Fedick, and J.J. Jiménez-Osornio (Eds.), *The lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface* (495-516). Haworth. New York, NY, EEUU.
- Cahoon, D. R., Hensel, P., Rybczyk, J., and Perez, B. C. (2002). Hurricane Mitch: impacts on mangrove sediment elevation dynamics and long-term mangrove sustainability. USGS Open File Report 03-184, p. 75.
- Cahoon, D. R., Hensel, P., Rybczyk, J., McKee, K. L., Proffitt, C. E., and Perez, B. C. (2003). Mass tree mortality leads to mangrove peat collapse at Bay Islands, Honduras after Hurricane Mitch. *Journal of Ecology*, 91, 1093-1105.
- Carrillo-Bastos, A., Elizalde-Rendón, E. M., Valle, N. T., y Ortiz, G. F. (2008). Adaptación ante disturbios naturales, manglar de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Foresta Veracruzana*, 10(1), 31-38.
- Check, E. (2005). Roots of recovery. *Nature*, 438, 910-911.
- Christensen, J. H., Kumar, K. K., and Aldrian, W. (2013). Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In T.F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, et al., (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., and Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN, 97.
- CONAGUA. (2021). Información Histórica. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., Van Der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., and Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158.
- Costanza, R., Mitsch, W. J., and Day Jr, J. W. (2006). A new vision for New Orleans and the Mississippi delta: applying ecological economics and ecological engineering. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(9), 465-472.
- Dahal, D., Liu, S., and Oeding, J. (2014). The Carbon Cycle and Hurricanes in the United States between 1900 and 2011. *Scientific Reports*, 4(1).
- Danielsen, F., Sorensen, M. K., Olwig, M. F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N. D., Hiraishi, T., Karunakaran, V. M., Rasmussen, M., Hansen, L. B., Quarto, A. and Suryadiputra, N. (2005). The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science*, 310(5748), 643-643.
- Danielson, T. M., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya E., Briceño, H., Travieso, R., Marx, B. D., Gaiser, E., and Farfán, L.M. (2017). Assessment of Everglades mangrove forest resilience: implications for above-ground net primary productivity and carbon dynamics. *Forest Ecology and Management*, 404, 115-125.
- Day, J. W., Boesch, D. F., Clairain, E. J., Kemp, G. P., Laska, S. B., Mitsch, W. J., Kenneth, O., Mashriqui, H., Reed, D. J., Shabman, L., Simenstad, C. A., Streever, B., Twilley, R. R., Watson, C. C., Wells, J. T., and Whigham, D. F. (2007). Restoration of the Mississippi Delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita. *Science*, 315(5819), 1679-1684.

- Dittmann, S., Mosley, L., Clanahan, M., Quinn, J., Crooks, S., Emmer, I., Thomson, S. M., and Seaman, R. (2019). Proof of concept for tidal re-connection as a blue carbon offset project. Goyder Institute for Water Research, Technical Report Series, (19/29).
- Elster, C. (2000). Reasons for reforestation success and failure with three mangrove species in Colombia. *Forest Ecology and Management*, 131(1-3), 201-214.
- FAO. (2007). The World's mangroves 1980-2005. FAO Forestry Paper 153. Rome. FAO.
- Febles-Patrón, J. L., Novelo-López, J., y Batllori-Sampedro, E. (2009). Pruebas de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México. *Madera y bosques*, 15(3), 65-86.
- Fickert, T. (2020). To Plant or Not to Plant, That Is the Question: Reforestation vs. Natural Regeneration of Hurricane-Disturbed Mangrove Forests in Guanaja (Honduras). *Forests*, 11(10), 1068.
- Field, C. D. (1999). Rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview. *Marine Pollution Bulletin*, 37(8-12), 383-392.
- Flores-Verdugo, F., Casasola, P., de la Lanza-Espino, G. y Agráz-Hernández, C. (2010). El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático. In A. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez, and J.L. Rojas-Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (p. 514). Gobierno del Estado de Tabasco. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Galeano, A., Urrego, L. E., Botero, V., and Bernal, G. (2017). Mangrove resilience to climate extreme events in a Colombian Caribbean Island. *Wetlands Ecology and Management*, 25(6), 743-760.
- Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., and Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. *Aquatic Botany*, 89(2), 237-250.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., and Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159.
- Herbert, D. A., Fownes, J. H., and Vitousek, P. M. (1999). Hurricane damage to a Hawaiian forest: nutrient supply rate affects resistance and resilience. *Ecology*, 80(3), 908-920.
- Herr, D., and Landis, E. (2016). Coastal blue carbon ecosystems. Opportunities for nationally determined contributions. Policy brief. Gland, Switzerland: IUCN. Washington, DC: TNC.
- Herrera-Silveira, J.A., Zaldivar-Jimenez, A., Teutli-Hernandez, C., Pérez-Ceballos, R., y Caamal-Sosa, J. (2010). Los manglares de Yucatán y el cambio climático global. In E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche-Gual, and G.J. Villalobos-Zapata (Eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino* (pp. 421-436). Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.
- Imbert, D. (2018). Hurricane disturbance and forest dynamics in east Caribbean mangroves. *Ecosphere*, 9 (7).
- Imbert, D., Labbe, P., and Rousteau, A. (1996). Hurricane damage and forest structure in Guadeloupe, French West Indies. *Journal of Tropical Ecology*, 663-680.
- Imbert, D., and Portecop J. (1986). Etude de la production de litière dans la mangrove de Guadeloupe (Antilles Françaises). *Acta Oecologica*, 7, 379-396.
- Imbert, D., and Rollet, B. (1989). Phytomasse aérienne et production primaire dans la mangrove du Grand Cul-de-sac Marin (Guadeloupe, Antilles Françaises). *Bulletin d'Ecologie*, 20, 27-39.
- Islebe, G. A., Torrescano-Valle, N., Valdez-Hernández, M., Tuz-Novelo, M., y Weissenberger, H. (2009). Efectos del impacto del huracán Dean en la vegetación del sureste de Quintana Roo, México. *Foresta Veracruzana*, 11(1), 1-6.
- IUCN. (2010). International Union for Conservation of Nature. <https://www.iucnredlist.org/>
- IUCN. (2020). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2019-3. <https://www.iucnredlist.org/>.
- Kathiresan, K., and Qasim, S. Z. (2005). *Biodiversity of mangrove ecosystems*. Hindustan Publishing: New Delhi, India.
- Knutson, T. R., McBride, J. L., Chan, J., Emanuel, K. A., Holland, G., Landsea, C. Held, I., Kossin, J. P., Srivastava, A. K., and Sugi, M. (2010). Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3, 157-163.
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Zhao, M., Tuleta, R. E., Bender, M., Vecchi, G. A., Villarini, G., and Chavas, D. (2015). Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *Journal of Climate*, 28, 7203-7224.

- Kossin, J. P., Hall, T., and Knutson, T. (2017). Extreme storms. In DJ Wuebbles, DW Fahey, KA Hibbard, DJ Dokken, BC Stewart, and TK Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment* (Volume I, pp. 375-404). Washington, DC: U.S. Global Change Research Program.
- Kossin, J.P., Knapp, K.R., Olandor, T. L., and Velden, C.S. (2020). Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades. *PNAS*, 17(47), 11975-1180.
- Kovacs, J. M., Blanco-Correa, M., and Flores-Verdugo, F. (2001). A logistic regression model of hurricane impacts in a mangrove forest of the Mexican Pacific. *Journal of Coastal Research*, 17, 30-37.
- Krauss, K. W., and Osland, M. J. (2020). Tropical cyclones and the organization of mangrove forests: a review. *Annals of Botany*, 125(2), 213-234.
- Lang'at, J. K. S., Kairo, J. G., Mencuccini, M., Bouillon, S., Skov, M., and Waldron, S. (2014). Rapid losses of surface elevation following tree girdling and cutting in tropical mangroves. *PLoS One*, 9, e107868.
- Lewis III, R. R. (2005). Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering*, 24(4), 403-418.
- Lewis III, R. R., Milbrandt, E. C., Brown, B., Krauss, K. W., Rovai, A. S., Beever III, J. W., and Flynn, L. L. (2016). Stress in mangrove forests: Early detection and preemptive rehabilitation are essential for future successful worldwide mangrove forest management. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 764-771.
- Long, J., Giri, C., Primavera, J., and Trivedi, M. (2016). Damage and recovery assessment of the Philippines' mangroves following Super Typhoon Haiyan. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 734-743.
- Lugo, A. E., Cintron, G., Goenaga, C., Barrett, G. W., and Rosenberg, R. (1981). *Stress Effects on Natural Ecosystems*. John Wiley and Sons: Sussex, England.
- Lugo, A. E., and Snedaker, S. C. (1974). The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5(1), 39-64.
- Marois, D. E., and Mitsch, W. J. (2015). Coastal protection from tsunamis and cyclones provided by mangrove wetlands – a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11 (1), 71-83.
- Mazda, Y., Magi, M., Nanao, H., Kogo, M., Miyagi, T., Kanazawa, N., and Kobashi, D. (2002). Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetlands Ecology and Management*, 10(1), 1-9.
- McKee, K. L., and Faulkner, P. L. (2000). Restoration of biogeochemical function in mangrove forests. *Restoration Ecology*, 8(3), 247-259.
- Mendoza Carrillo, V. M. (2005). Estudio exploratorio de la ocurrencia de huracanes en el Golfo de México en el periodo 1970-2003. [Reporte]. Universidad Veracruzana.
- Menéndez, P., Losada, I.J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., and Beck, M.W. (2020) The Global Flood Protection Benefits of Mangroves. *Scientific Reports*, 10:4404.
- Milbrandt, E. C., Greenawalt Boswell, J. M., Sokoloff, P. D., and Bortone, S. A. (2006). Impact and response of southwest Florida mangroves to the 2004 hurricane season. *Estuaries and Coasts*, 29, 979-984.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystem and human well-being: A framework for assessment (Volume 4). Island Press: Washington. D.C, EE.UU.
- Narayan, S., Bitterwolf, S., Beck, M.W. (2019). The Costs of Mangrove and Reef Restoration Relative to Coastal Protection Structures in the Caribbean. Policy Brief. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.
- NASA. (2017). *Hurricanes and Tropical Storms*. https://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/features/index.html.
- Novlan, D.J., and Gray, W.M. (1974). Hurricane-spawned tornadoes. *Monthly Weather Review*, 102, 476-488.
- NPS (National Park Service). (2019) *Saffir-Simpson Hurricane Scale*. <https://www.nps.gov/articles/saffir-simpson-hurricane-scale.htm>
- Osland, M. J., Feher, L. C., López-Portillo, J., Day, R. H., Suman, D. O., Guzmán-Menéndez J. M., and Rivera-Monroy, J. M. (2018). Mangrove forests in a rapidly changing world: global change impacts and conservation opportunities along the Gulf of Mexico coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 214, 120-140.
- Paling, E.I., Kobryn, H.T., y Humphreys, G. (2008). Evaluación de la extensión del cambio de manglar causado por el ciclón Vance en el este del golfo de Exmouth, estuario del noroeste de Australia. *Costa. Shelf Sci.* 77 603-13
- Patricola, C. M., and Wehner, M. F. (2018). Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563, 339-346.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean J., Kauffman, J., Marbà, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., and Baldera, A. (2012). Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE* 7(9): e43542.

- Pérez-Ceballos, R., Echeverría-Ávila, S., Zaldívar-Jiménez, A., Zaldívar-Jiménez, T., and Herrera-Silveira, J. (2017). Contribution of microtopography and hydroperiod to the natural regeneration of *Avicennia germinans* in a restored mangrove forest. *Ciencias Marinas*, 43(1), 55-67.
- Peters, D. P., Lugo, A. E., Chapin III, F. S., Pickett, S. T., Duniway, M., Rocha, A. V., Swanson, F. J., Laney, C., and Jones, J. (2011). Cross system comparisons elucidate disturbance complexities and generalities. *Ecosphere*, 2(7), 1-26.
- Platt, W. J., Doren, R. F., and Armentano, T. V. (2000). Effects of Hurricane Andrew on stands of slash pine (*Pinus elliottii* var. *densa*) in the everglades region of south Florida (USA). *Plant Ecology*, 146(1), 43-60.
- Polidoro, B. A., Carpenter K. E., Collins, L., Duke, N. C., Ellison, A. M., Ellison, J. C., Farnsworth, E. J., Fernando E. S., Kathiresan, K., Koedam, N. E., Livingstone, S. R., Miyagi, T., Moore, G. E., Nam, V.N., Ong, J. E., Primavera, J.H., Salmo III, S.G, Sanciangco, J., Sukardjo, S., Wang, Y., and Hong Yong, J.W. (2010). The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. *PLoS ONE*, 5.
- Ramasubramanian, R., and Selvam, V. (2011). Restoration of Degraded Mangroves in Andhra Pradesh. In: Bhatt, J. R., Macintosh, D. J., Nayar, T. S., Pandey, C. N. and Nilaratna, B. P. Towards Conservation and Management of Mangrove Ecosystems in India. Gland, Switzerland: IUCN.
- Rodríguez-Ramírez A. y Reyes-Nivia, M. C. (2006). Evaluación rápida del impacto del huracán Beta sobre los ecosistemas marinos y costeros de la Isla de Providencia. In *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2005* (pp. 87-92). INVEMAR. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta.
- Ross, M. S., Ruiz, P. L., Sah, J. P., Reed, D. L., Walters, J., and Meeder, J. F. (2006). Early post-hurricane stand development in fringe mangrove forests of contrasting productivity. *Plant Ecology*, 185, 283-297.
- Roth, L.C. (1992). Hurricanes and mangrove regeneration: effects of Hurricane Joan, October 1988, on the vegetation of the Isla del Venado, Bluefields, Nicaragua. *Biotropica*, 24, 375-384.
- Sánchez González, D. (2011). Peligrosidad y exposición a los ciclones tropicales en ciudades del Golfo de México: El caso de Tampico. *Revista de Geografía Norte Grande*, (50), 151-170.
- Sánchez-Sánchez, O., and Islebe, G.A. (1999). Hurricane Gilbert and structural changes in a tropical forest of south-eastern Mexico. *Glob Ecol Biogeogr*. 8:29-38.
- Salazar-Vallejo, S. 2002. Huracanes y biodiversidad costera tropical. *Revista de Biología Tropical* 50 (2):415-428.
- Sherman, R. E., Fahey, T. J., and Battles, J. J. (2000). Small-scale disturbance and regeneration dynamics in a neotropical mangrove forest. *Journal of Ecology*, 88, 165-178.
- Sherman, R. E., Fahey, T. J., and Martínez, P. (2001). Hurricane impacts on a mangrove forest in the Dominican Republic: damage patterns and early recovery. *Biotropica*, 33 (3), 393-408.
- Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N., and Van der Stocken, T. (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, 12(1), 40-45.
- Sippo, J. Z., Lovelock, C. E., Santos, I. R., Sanders, C. J., and Maher, D. T. (2018). Mangrove mortality in a changing climate: an overview. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 215, 241-249.
- Smith, T. J., Anderson, G. H., Balentine, K., Tiling, G., Ward, G. A., and Whelan, K. R. (2009). Cumulative impacts of hurricanes on Florida mangrove ecosystems: sediment deposition, storm surges and vegetation. *Wetlands*, 29(1), 24-34.
- Smith T. J., Robblee M. B., Wanless H. R., and Doyle, T. W. (1994). Mangroves, hurricanes, and lightning strikes. *BioScience*, 44, 256-262.
- SMN. (2021). Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>.
- Snedaker, S. C. (1995). Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia*, 295, 43-49.
- Sobel, A. H., Camargo, S. J., Hall, T. M., Lee, C. Y., Tippet, M. K., and Wing, A. A. (2016). Human influence on tropical cyclone intensity. *Science*, 353, 242-246.
- Society for Ecological Restoration Science and Policy Working Group. (2002). The SER primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration: Washington, DC.
- Spalding, M. (2010). *World Atlas of Mangroves*. Routledge.
- Stanturf, J. A., Goodrick, S. L., and Outcalt, K. W. (2007). Disturbance and coastal forests: a strategic approach to forest management in hurricane impact zones. *Forest Ecology and Management*, 250(1-2), 119-135.

- Taillie, P. J., Román-Cuesta, R., Lagomasino, D., Cifuentes-Jara, M., Fatoyinbo, T., Ott, L. E., and Poulter, B. (2020). Widespread mangrove damage resulting from the 2017 Atlantic mega hurricane season. *Environmental Research Letters*, 15(6), 064010.
- Teutli-Hernández, C., and Herrera-Silveira, J. A. (2016). Mangrove restoration strategies of Mexico: Yucatan case. In E. Ceccon and Martínez-Garza (Eds.), *Experiencias Mexicanas en la Restauración de los Ecosistemas* (p. 484). UNAM/CRIM/UAEM/CONABIO.
- Teutli-Hernández, C. (2017). Una aproximación a la integración de escalas ecológicas para la restauración de ecosistemas de manglar. (Tesis doctoral). Universidad de Barcelona. 40p.
- Teutli-Hernández, C. and Herrera-Silveira, J. A. (2018). The success of hydrological rehabilitation in mangrove wetlands using box culverts across coastal roads in Northern Yucatan (SE, Mexico). In C. Makowski and Finkl (Eds.), *Threats to Mangrove Forests: Hazards, Vulnerability and Management* (pp. 607-619). Springer.
- Teutli-Hernández, C., Herrera-Silveira, J. A., Cisneros-de la Cruz, D. J. y Román-Cuesta, R. M. (2020). Guía para la restauración ecológica de manglares: Lecciones aprendidas. Proyecto, Mainstreaming wetlands into the Climate agenda: A multi-level approach (SWAMP). CIFOR/CINVESTAV-IPN/UNAM-SISAL/PMC.
- The Nature Conservancy (TNC). 2021. The Blue Guide to coastal resilience. Protecting coastal communities through nature-based solutions. A handbook for practitioners of disaster risk reduction. The Nature Conservancy. Arlington, VA.
- Thivakaran, G. A. (2017). Mangrove restoration: an overview of coastal afforestation in India. In: Kumar-Prusty, B.A., Chandra, R. and Azeez, P. A. Wetland science perspectives from South Asia. *Wetland Science*, 501-512.
- Thivakaran, G. A., Chandra, R., Thirumaran, G., Prabhu K., Behera, D. P., Parmer, D., and Barot, V. (2018). Assessment and monitoring of mangrove plantation (1300 ha) carried out by Deendayal Port Trust, Kandla. Final report. Gujarat Institute of Desert Ecology.
- Thomas, N., Lucas, R., Bunting, P., Hardy, A., Rosenqvist, A., and Simard, M. (2017). Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. *PLoS ONE*, 12(6), e0179302.
- Turner, M., Dale, V., and Everham, E. (1997). Fires, Hurricanes, and Volcanoes: Comparing Large Disturbances. *BioScience*, 47(11), 758-768.
- Twilley, R. R., and Rivera-Monroy, V. H. (2005). Developing performance measures of mangrove wetlands using simulation models of hydrology, nutrient biogeochemistry, and community dynamics. *Journal of Coastal Research*, 79-93.
- UN Atlas of the Oceans. 2016. *Facts*. <http://www.oceansatlas.org/facts/en/>.
- UNEP-Nairobi Convention, USAID and WIOMSA. (2020). Guidelines on Mangrove Ecosystem Restoration for the Western Indian Ocean Region. UNEP, Nairobi.
- Uriarte, M., Thompson, J., and Zimmerman, J.K. (2019). Hurricane María tripled stem breaks and doubled tree mortality relative to other major storms. *Nat Commun*, 10,1362.
- Vogt, J., Skóra, A., Feller, I. C., Piou, C., Coldren, G., and Berger, U. (2012). Investigating the role of impoundment and forest structure on the resistance and resilience of mangrove forests to hurricanes. *Aquatic Botany*, 97(1), 24-29.
- Wemple, B. C., Browning, T., Ziegler, A. D., Celi, J., Chun, K. P., Jaramillo, F., Leite, N.K., Ramchunder, S. J., Negishi J. N., Palomeque, X., and Sawyer, D. (2018). Ecohydrological disturbances associated with roads: Current knowledge, research needs, and management concerns with reference to the tropics. *Ecohydrology*, 11(3), e1881.
- Woodruff, J., Irish, J., and Camargo, S. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 504, 44-52.
- World Bank, The. 2016. Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs. World Bank Report, Washington, DC.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., y Day, R. H. (2014). Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y bosques*, 20(SPE), 39-75.
- Zedler, J. (2005). Ecological restoration: guidance from theory. *San Francisco Estuary and Watershed Science*, 3(2). 32 p.
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., Gao, Z. (2016). A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, 60, 442-452.

Apéndice

Tabla A1: Lista de los proyectos de restauración de manglares incluidos en el análisis de costos.

País	Enfoque/actividad de restauración	Año	Costos por hectárea (USD de 2020)
Golfo de México, México	Modificación del nivel del suelo	No disponible	\$6.964
Golfo de México, México	Rehabilitación hidrológica	No disponible	\$9.730
Golfo de México, México	Rehabilitación hidrológica	No disponible	\$170
Golfo de México, México	Rehabilitación hidrológica	No disponible	\$2.341
Golfo de México, México	Rehabilitación hidrológica	No disponible	\$5.708
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$1.158
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$29.292
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$36.652
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$10.577
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$5.354
Golfo de México, México	Reforestación	No disponible	\$17.352
Golfo de México, México	Reforestación y rehabilitación hidrológica	No disponible	\$3.687
Golfo de México, México	Reforestación y rehabilitación hidrológica	No disponible	\$3.722
Golfo de México, México	Reforestación y rehabilitación hidrológica	No disponible	\$1.203
Golfo de México, México	Reforestación y rehabilitación hidrológica	No disponible	\$2.072
Golfo de México, México	Reforestación, rehabilitación hidrológica y modificación del nivel del suelo	No disponible	\$1.243
Florida, EE.UU.	Canales/transportes/alcantarillas	2021	\$98.800
Florida, EE.UU.	Canales/transportes/alcantarillas	2021	\$111.150
Florida, EE.UU.	Canales/transportes/alcantarillas	2021	\$83.980
Florida, EE.UU.	Canales/transportes/alcantarillas	2006	\$17.095
Florida, EE.UU.	Rompeolas/espigones/escolleras	2016	\$53.159
Florida, EE.UU.	Rompeolas/espigones/escolleras	2015	\$76.869
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1991	\$132.812
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1992	\$8.825
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1992	\$158.856
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1994	\$112.983
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1996	\$159.749
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1998	\$54.653

Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	1999	\$75.012
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2005	\$141.509
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2006	\$373.099
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2007	\$37.768
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$1.256
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$66.112
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$15.701
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$1.960
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$5.583
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$628
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$104.677
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$502
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2019	\$44.074
Florida, EE.UU.	Siembra de manglares/humedales	2020	\$12.350
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$288.824
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$93.806
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$191.315
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$40.732
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$125.897
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$220.938
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2013	\$492.481
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2019	\$46.058
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2017	\$14.967
Florida, EE.UU.	Excavación/relleno	2014	\$148.927
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2017	\$157.315
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2008	\$38.467
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2010	\$148.050
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2010	\$561.795
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	1997	\$117.214
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2020	\$64.220
Florida, EE.UU.	Nivelación/cambio del nivel del suelo	2012	\$24.728
Las Bahamas	Excavación/relleno, Nivelación/cambio del nivel del suelo, Siembra de manglares/humedales	2013	\$90.073
Las Bahamas	Canales/transportes/alcantarillas, Siembra de manglares/humedales	2016-2022	\$8.486
Las Bahamas	Canales/transportes/alcantarillas	2021	\$53.846
Las Bahamas	Canales/transportes/alcantarillas	2021	\$35.955
Las Bahamas	Canales/transportes/alcantarillas, Siembra de manglares/humedales	No disponible	\$33.097

Daños a los manglares causados por huracanes

Técnicas y costos de restauración tras una tormenta



ESCUELA
NACIONAL DE
ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD
MÉRIDA



BUILDERS
INITIATIVE

