UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Plan de restauración ecológica de dunas costeras invadidas por ´ *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA PRESENTADO POR:

Carolyn Gineth Castañeda Poveda

COMO REQUISITO PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRÍA EN RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

Julio 2026

Cozumel | Julio 2026

PLAN DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

Plan de restauración ecológica de dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia

Carolyn Gineth Castañeda Poveda

MSc. en Restauración Ecológica

HOJA DE APROBACIÓN POR EL COMITÉ DE TFM

Plan de restauración ecológica de dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia

por

Carolyn Gineth Castañeda Poveda

como requisito para optar al grado de Maestría en Restauración Ecológica

Comisión del Trabajo Final de Maestría:

Dra. Regina Pérez Domínguez

Codirección:

Dr. Diego Francisco Angulo Pérez

Miembro de comité:

Dra. María Inés Yáñez Diaz

Miembro de comité:
Dra. Renata Aidé Valdes Alameda

Director de la Maestría en Restauración Ecológica:

José Manuel Mata Balderas

HOJA DE DECLARACIÓN DE LOS LUGARES EN DONDE SE DESARROLLÓ EL TRABAJO

Plan de restauración ecológica de dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia

Este trabajo fue realizado en el marco de la Maestría en Ciencias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con actividades de campo desarrolladas en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia, Cozumel, Quintana Roo, México, bajo la dirección de la Dra. Regina Pérez Domínguez y la codirección del Dr. Diego Francisco Angulo Pérez.

Dirección del trabajo:

Dra. Regina Pérez Domínguez

Codirección:

Dr. Diego Francisco Angulo Pérez

DEDICATORIA

Esta obra está dedicada a todas las personas soñadoras que cuidan la naturaleza con amor, compromiso y esperanza; a quienes con un pequeño acto contribuyen en la restauración ecológica como una oportunidad para sanar ecosistemas, recuperar la vida y reconstruir el vínculo socioecológico. Restaurar implica comprender, respetar y valorar profundamente cada forma de vida, es también un proceso holístico de aprendizaje, lleno de retos, experiencias y transformaciones constantes, que requiere tiempo, paciencia y dedicación, pero que demuestra que incluso los esfuerzos más pequeños pueden convertirse en semillas de cambio y contribuir al renacimiento de los ecosistemas. Que este libro sea un pequeño aporte para inspirar a más personas a cuidar, restaurar y valorar el mundo natural, entendiendo que cada acción realizada con amor puede dejar una huella positiva para las generaciones presentes y futuras.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO 1
INTRODUCCIÓN 2
Antecedentes 6
Contexto del parque y área de estudio 8
Marco normativo legal 14
Objetivos 16
Metas ecológicas 17
Metas técnicas y sociales 17
MODELO DE RESTAURACIÓN PROPUESTO 18
Fase 1. Diagnóstico y selección de sitios 21
Fase 2. Selección de especies y propagación 25
Fase 3. Intervención y revegetación 27
Componente transversal de monitoreo, evaluación y adaptación 32
Temporalidad del proceso de restauración 35
Estructura operativa 36
Participación social y educación ambiental 38
BENEFICIOS Y PROYECCIÓN DEL PLAN DE RESTAURACIÓN 44
AGRADECIMIENTOS 46
REFERENCIAS 48

RESUMEN EJECUTIVO

La invasión de *Scaevola taccada* en el ecosistema de duna costera Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia, en Cozumel, afecta la estructura, composición y funcionalidad de este ecosistema. Esta especie exótica ha desplazado a la vegetación nativa, alterando procesos ecológicos y reduciendo la capacidad del sistema para proveer servicios ecosistémicos. Dado que las dunas costeras contribuyen a la protección del litoral, la regulación de la erosión y la provisión de hábitat para diversas especies, su degradación incrementa la vulnerabilidad ambiental y compromete su integridad ecológica, así como los beneficios que aportan a la sociedad.

Figura 1. Invasión de *Scaevola taccada.* Parque estatal Laguna Colombia.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

Frente a este escenario, el presente plan tiene como objetivo orientar y sistematizar acciones de restauración en las dunas costeras invadidas por *S. taccada* dentro del área de estudio. Para ello, se propone un modelo organizado en tres fases operativas: (1) diagnóstico y selección de sitios, (2) selección de especies y propagación y (3) intervención, estabilización y revegetación, complementadas por un componente transversal de monitoreo, evaluación y manejo adaptativo que acompaña todo el proceso de restauración. Su implementación favorecerá la recuperación de la cobertura vegetal nativa, la estabilización del sistema dunar y el restablecimiento de procesos ecológicos, contribuyendo a la mejora de los servicios ecosistémicos y al fortalecimiento de la gestión del área protegida mediante información técnica, toma de decisiones basada en evidencia y participación social. En conjunto, el plan constituye una herramienta para la conservación y recuperación del sistema dunar, fortaleciendo su resiliencia y favoreciendo la continuidad de las acciones de restauración.

INTRODUCCIÓN

Las dunas costeras son ecosistemas dinámicos formados por la acumulación de arena transportada por el viento a partir de sedimentos de origen marino, localizados en la parte alta de la playa y situados detrás de la línea de pleamar máxima (Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022). Estas geoformas constituyen una zona de transición entre los ambientes marino y terrestre, donde interactúan procesos físicos como el oleaje, las corrientes marinas y el régimen de vientos, así como procesos biológicos mediados por la vegetación a condiciones de salinidad, movilidad del sustrato y escasez de nutrientes (Canales & Llanquimán, 2021; Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022).

La retención de arena por parte de la vegetación y otros obstáculos naturales favorece la estabilización progresiva del sustrato y el desarrollo de una zonificación característica desde la playa hacia el interior. En este gradiente se distinguen las dunas embrionarias, ubicadas más próximas a la línea de costa y dominadas por especies pioneras; las dunas frontales, donde aumenta la acumulación de sedimentos y se establece una vegetación más densa; y las dunas estabilizadas, caracterizadas por una mayor cobertura vegetal, menor movilidad del sustrato y comunidades más consolidadas. Esta zonificación determina la composición florística, la estructura y el funcionamiento ecológico del ecosistema (Figura 2) (Canales & Llanquimán, 2021; Mendoza et al., 2022).

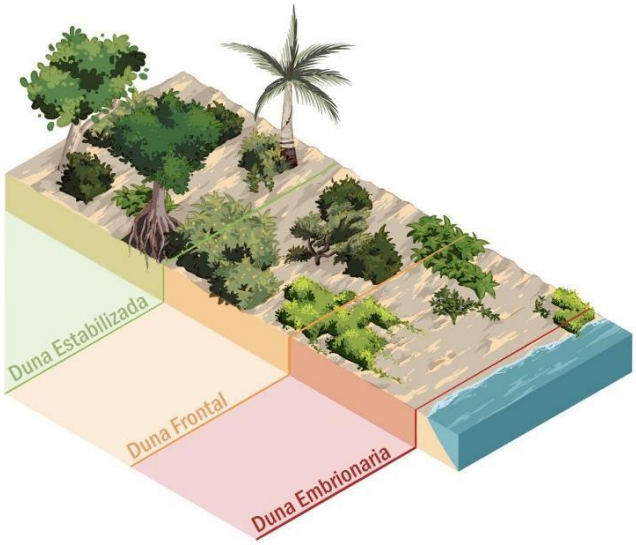

Figura 2. Zonificación de la duna costera.
Elaborado por Hania Gisell Castañeda Poveda

Además de su importancia ecológica, las dunas costeras proporcionan servicios ecosistémicos de regulación, soporte y culturales. Como servicios de regulación, funcionan como barreras naturales frente a fenómenos hidrometeorológicos, amortiguando el impacto del oleaje, tormentas y vientos intensos, lo que reduce la erosión costera, protege la infraestructura litoral y favorece la retención de sedimentos, contribuyendo al equilibrio

geomorfológico y a la protección de ecosistemas costeros asociados (Cervantes et al., 2020; Quiroz & Cervantes, 2022; Mendoza et al., 2022). Como servicios de soporte, las dunas mantienen hábitats que promueven la biodiversidad, la sucesión ecológica y la conectividad del paisaje costero, además de servir como refugio para diversas especies de fauna (Rodríguez et al., 2018; Mendoza et al., 2022).

En el ámbito cultural, poseen valor paisajístico, recreativo y turístico, además de contribuir a la educación ambiental, la investigación científica y la sensibilización sobre la conservación de los ecosistemas costeros (Blanco & Rodríguez, 2020; Cervantes et al., 2020). Sin embargo, su carácter dinámico las hace sensibles a perturbaciones naturales y antrópicas, por lo que su conservación y restauración son necesarias para mantener su estructura, funcionalidad y capacidad de adaptación frente a los cambios ambientales (Canales & Llanquimán, 2021; Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022).

A pesar de su relevancia ecológica y socioeconómica, las dunas costeras enfrentan múltiples amenazas asociadas principalmente a la urbanización y al desarrollo turístico no planificado, lo que ha promovido la fragmentación del ecosistema, la remoción de vegetación nativa y la alteración de la dinámica sedimentaria natural (Figura 3) (Cervantes et al., 2020). La ocupación intensiva de la franja costera, la construcción de infraestructura y el tránsito vehicular incrementan la movilidad del sedimento y la vulnerabilidad del litoral frente a eventos que causan daño a la duna costera, como huracanes, tormentas tropicales, marejadas ciclónicas y vientos fríos, reduciendo la capacidad del sistema para mantener sus procesos de regulación y equilibrio sedimentario (Quiroz & Cervantes, 2022; Mendoza et al., 2022).

A estas presiones se suma la introducción y expansión de especies exóticas invasoras, que modifican la composición y estructura de la vegetación nativa, alteran los procesos sucesionales y comprometen la estabilidad del ecosistema dunar (Mendoza et al., 2022). En conjunto, estas perturbaciones contribuyen a la pérdida de biodiversidad y a la disminución de los servicios ecosistémicos asociados a la protección costera y al valor paisajístico de estos ambientes (Figura 3) (Rodríguez et al., 2018; Cervantes et al., 2020).

Figura 3. Duna afectada por actividades antrópicas. Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

Las invasiones biológicas generan daños ecológicos a escala global al alterar la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas. La introducción y establecimiento de especies exóticas modifica interacciones bióticas, ciclos de nutrientes y trayectorias sucesionales, provocando el desplazamiento de especies nativas y la pérdida de biodiversidad (Estanga, 2018; Van Wilgen et al., 2020). En ecosistemas insulares, la vulnerabilidad es mayor debido a su aislamiento evolutivo y limitada resiliencia ecológica (Muñoz et al., 2025). En las dunas costeras, las plantas exóticas invasoras representan una amenaza al alterar la dinámica del sustrato, competir con la vegetación nativa y afectar los procesos de regeneración natural, comprometiendo la provisión de servicios ecosistémicos y la estabilidad del ecosistema a largo plazo (Castillo et al., 2022; Mendoza et al., 2022).

En el Caribe, *Scaevola taccada* (Gaertn.) Roxb. es reconocida como una especie exótica invasora originaria del Indo-Pacífico, introducida como ornamental, lo que facilitó su naturalización en ecosistemas costeros (Figura 4) (Swensen et al., 2024). En diversas islas caribeñas, como Puerto Rico y Bahamas, se ha documentado la formación de poblaciones densas que desplazan a la vegetación nativa, reducen la disponibilidad de espacio para especies locales y modifican la estructura del sistema dunar (Finkle & Elliot, 2011; Swensen et al., 2024). En México, su primer registro formal en ambientes naturales ocurrió en Cozumel, Quintana Roo, dentro de la Reserva de la Biosfera Isla Cozumel, evidenciando establecimiento y reproducción activa (Castillo et al., 2021). Posteriormente, se ha reportado su presencia en otras zonas de la Península de Yucatán, representando un riesgo para la flora característica de las dunas y para la conservación de estos ecosistemas costeros (Castillo et al., 2022).

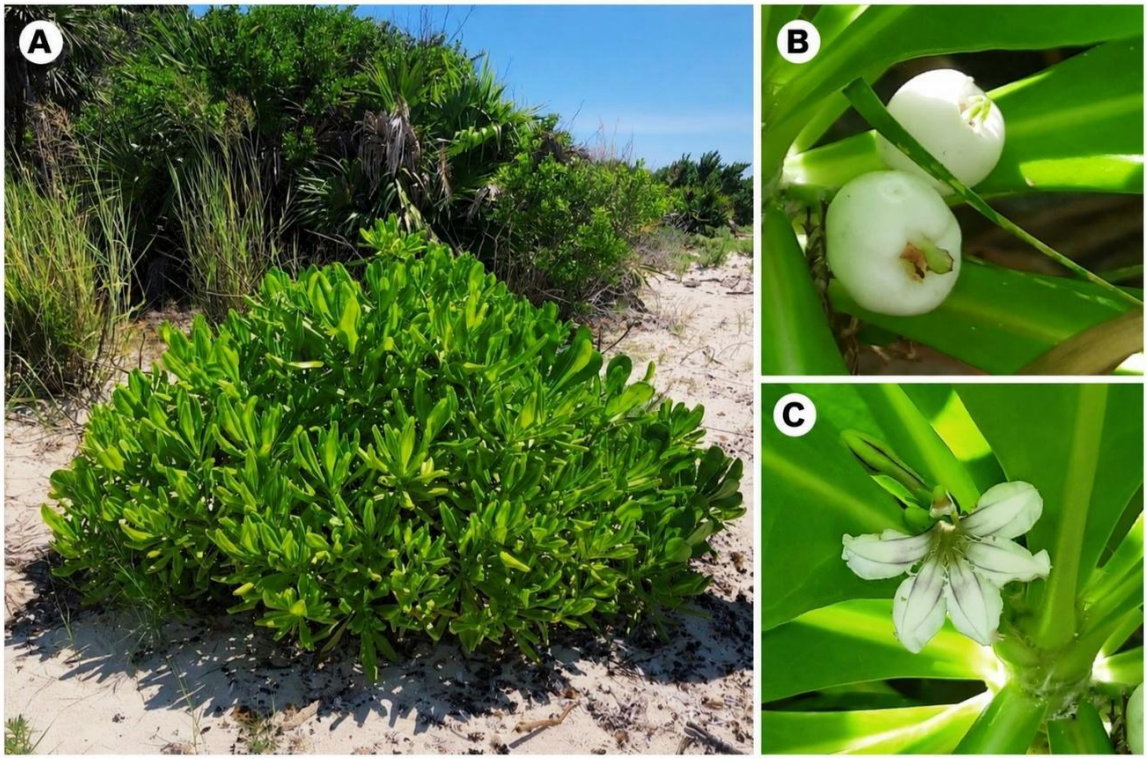

Figura 4. Morfología de *Scaevola taccada*. (A) Hábito de crecimiento arbustivo característico de la especie en ecosistemas de dunas costeras; (B) fruto carnoso de color blanco, de forma globosa; y (C) flor blanca zigomorfa con corola en forma de abanico, rasgo distintivo de la especie.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda.

En el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia se confirmó la presencia de *S. taccada* mediante registros de campo realizados durante el desarrollo del presente plan de restauración. La expansión de esta especie altera la estructura de la duna costera y representa un riesgo para la integridad ecológica debido a la formación de poblaciones densa que desplazan a especies nativas como *Scaevola plumieri*, catalogada bajo la categoría de Protección Especial (Pr) en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010). Actualmente se identificaron aproximadamente tres parches remanentes de esta especie dentro del área de estudio, por lo que su conservación resulta prioritaria para mantener la composición florística característica de la duna.

Ante este escenario, la restauración ecológica se plantea como una estrategia necesaria para recuperar la composición florística nativa, restablecer procesos ecológicos y fortalecer la resiliencia del ecosistema. Para ello, se proponen acciones orientadas a favorecer la recuperación del sistema dunar, entre ellas el control de especies invasoras, la revegetación con especies nativas, el monitoreo adaptativo y la educación ambiental.

Antecedentes

La restauración ecológica se define como el proceso de recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o transformado, con el propósito de restablecer su integridad ecológica como la capacidad del sistema para mantener su biodiversidad, procesos ecológicos y resiliencia frente a disturbios (SER, 2004). En América Latina, los enfoques metodológicos han enfatizado que la restauración debe fundamentarse en principios ecológicos como la sucesión, la referencia ecológica y la gestión adaptativa, incorporando además dimensiones sociales y de gobernanza ambiental (Vargas, 2007; Barrera & Valdés, 2007).

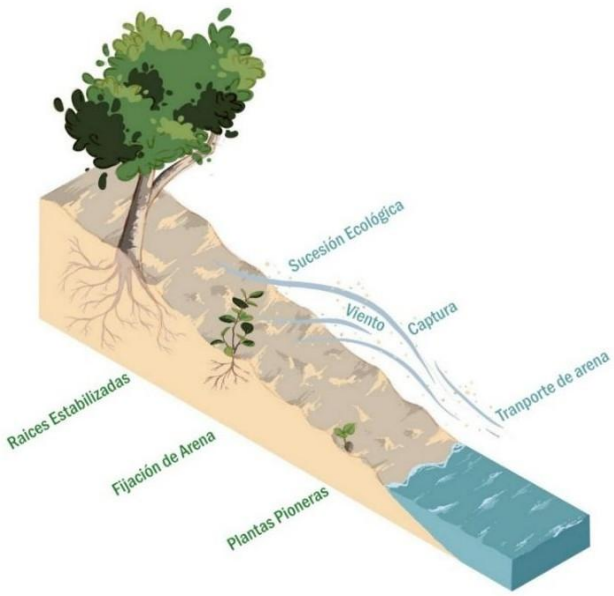

Figura 5. Dinámica de formación de dunas costeras. Elaborado por Hania Gisell Castañeda Poveda

En el caso de las dunas costeras, la restauración requiere comprender la dinámica natural de estos sistemas, los cuales se forman y evolucionan a partir de la interacción continua entre procesos atmosféricos, marinos y biológicos. El transporte eólico de sedimentos desde la playa hacia el interior, junto con la colonización por especies pioneras, genera una retroalimentación positiva entre la vegetación y la acumulación de arena, favoreciendo la estabilización progresiva del sustrato y la transición hacia estadios sucesionales más complejos (Figura 5) (Rodríguez et al., 2018; Quiroz & Cervantes, 2022; Mendoza et al., 2022).

Esta dinámica refleja la resiliencia del sistema, permite su capacidad para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder su estructura y funciones esenciales, manteniendo un equilibrio dinámico basado en el balance entre el aporte de sedimentos, la cobertura vegetal y el régimen de disturbios (Cervantes et al., 2020; Quiroz & Cervantes, 2022). Sin embargo, eventos hidrometeorológicos como tormentas y huracanes pueden reiniciar fases tempranas de la sucesión, evidenciando su carácter cíclico y no lineal,

mientras que alteraciones como la urbanización, el tránsito o las invasiones biológicas reducen la cobertura vegetal, afectan la captura de arena y disminuyen la capacidad de autorregulación del sistema, incrementando su vulnerabilidad (Rodríguez et al., 2020; Mendoza et al., 2022).

La restauración de dunas costeras comprende la recuperación de la cobertura vegetal y el restablecimiento de la interacción entre los procesos físicos y biológicos que sostienen la funcionalidad del sistema (Rodríguez et al., 2018; Mendoza et al., 2022). En la Península de Yucatán, los lineamientos técnicos destacan el uso de especies nativas adaptadas a condiciones de salinidad, sequía y enterramiento, así como evitar intervenciones que alteren la dinámica natural de la duna (Mendoza et al., 2022). Conforme a principios internacionales, la restauración debe orientarse al restablecimiento de la integridad ecológica del ecosistema de referencia y a su autosostenibilidad a largo plazo, integrando diagnóstico, definición de metas y evaluación continua (Calva & Pavón, 2018; Gann et al., 2019).

Los ecosistemas insulares en el Caribe presentan una vulnerabilidad particular frente a las invasiones biológicas debido a su aislamiento evolutivo, alto endemismo y redes ecológicas simplificadas (Pyšek et al., 2020; Muñoz et al., 2025). Las especies que evolucionan en islas suelen experimentar menor presión competitiva, lo que aumenta su susceptibilidad ante especies exóticas con ventajas funcionales (Van Wilgen et al., 2020; Muñoz et al., 2025). Estas invasiones pueden alterar la composición de las comunidades, modificar interacciones bióticas y reducir la biodiversidad nativa; factores como el tamaño de la isla, el grado de aislamiento y la intensidad de las actividades humanas influyen en la probabilidad de establecimiento y expansión de especies invasoras, incrementando la presión sobre ecosistemas como las dunas (Pyšek et al., 2020; Muñoz et al., 2025).

Figura 6. Sistema de duna costera conservado. Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

El control de especies invasoras se integra como componente de la restauración ecológica de las dunas costeras, constituyendo una medida orientada a remover presiones que limitan la recuperación del sistema y a favorecer la reactivación de procesos sucesionales naturales (Gann et al., 2019). En dunas costeras, el manejo de especies exóticas debe considerar la estructura y composición de la vegetación, así como su influencia sobre la dinámica sedimentaria (Collantes et al., 2018; Rodríguez et al., 2018). En el caso de *Scaevola taccada*, especie naturalizada en la Península de Yucatán (Castillo et al., 2021, 2022), su alta capacidad de propagación y dominancia puede modificar la estructura vegetal y afectar la funcionalidad del ecosistema, lo que refuerza la necesidad de estrategias de manejo orientadas a restablecer la vegetación nativa y la dinámica natural de la duna.

Contexto del parque y área de estudio

El Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia, conocido como Punta Sur, se localiza en el extremo sur de la isla de Cozumel, Quintana Roo, en el Caribe mexicano (Figura 7). Esta área natural protegida forma parte de la Isla de Cozumel, fue decretada en 1996 bajo la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica, con una superficie aproximada de 1,113.54 ha, e incorporada posteriormente al Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Isla de Cozumel (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 1996; Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002; CONANP, 2018). Su cercanía y conectividad con otras áreas protegidas de la isla refuerzan su papel en la conservación de los ecosistemas costeros y marinos del Caribe mexicano (CONANP, 2018).

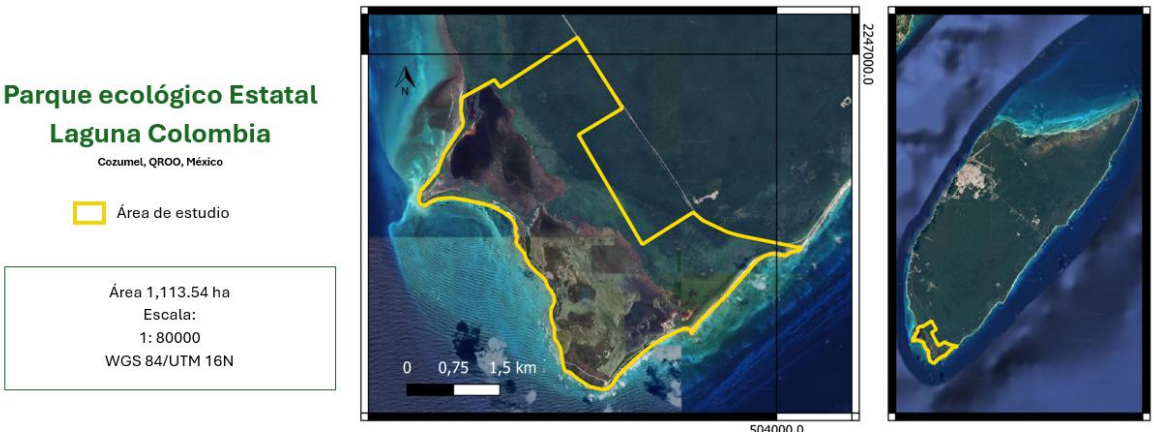

Figura 7. Mapa ubicación del área de estudio. Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia. Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

El clima de la isla es cálido húmedo con lluvias en verano (Am W(i)), según la clasificación de Köppen modificada por García (1973). La temperatura media anual es de 25.5 °C y la precipitación promedio alcanza los 1,570 mm, concentrándose entre agosto y octubre (INE-SEMARNAP, 1998; Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2002). Se distinguen una temporada de lluvias de mayo a octubre, un periodo relativamente seco de febrero a mayo y una temporada de vientos fríos entre noviembre y febrero. La dinámica atmosférica está influenciada por los vientos alisios del este y sureste y por ciclones tropicales entre junio y noviembre, que contribuyen a la redistribución de sedimentos y a la dinámica ecológica costera (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011; González, 2024)

Desde el punto de vista geomorfológico e hidrológico, Cozumel presenta un relieve plano de origen kárstico con rocas calcáreas del terciario y depósitos cuaternarios asociados a médanos, dunas y manglares (Figura 8) (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011). La isla carece de corrientes superficiales permanentes, por lo que su sistema hídrico depende de la infiltración y del flujo subterráneo hacia el acuífero costero. En el sur se ubica el sistema lagunar del Área Natural Protegida Laguna Colombia, donde se encuentra la laguna Colombia Chunchaka'ab y X'tancun, separado del mar Caribe por las dunas que regulan el intercambio hidrodinámico (Gobierno del Estado de Quintana Roo,

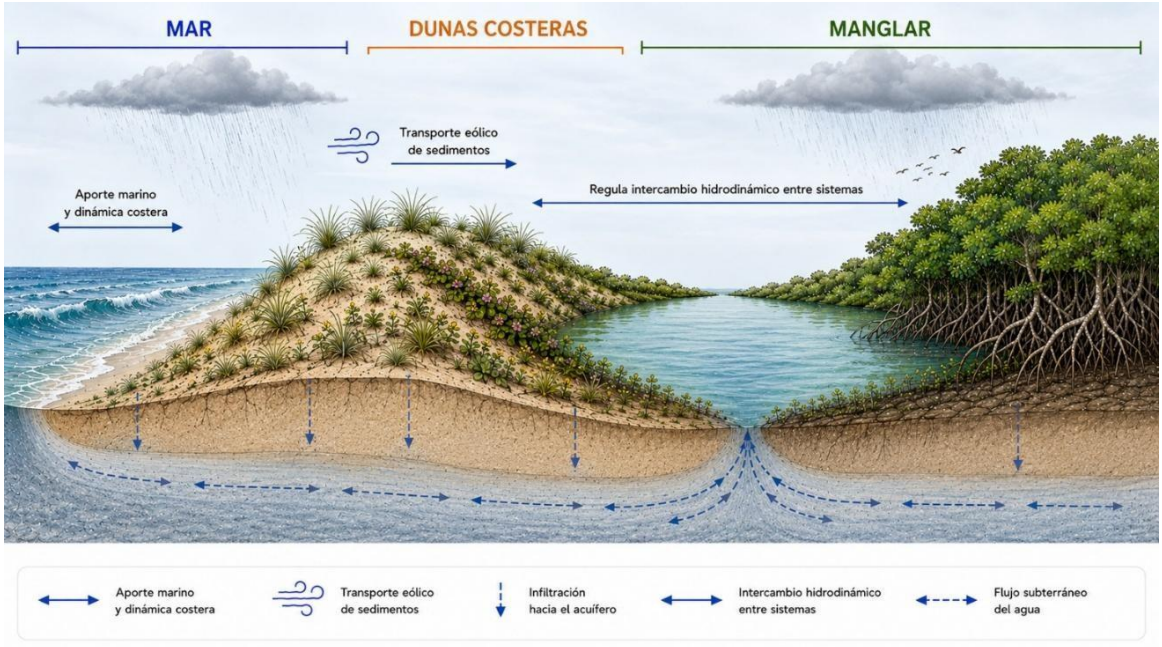

Figura 8. Relación geomorfológica entre el manglar y las dunas costeras.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

Las barras arenosas y depósitos cuaternarios de la franja costera del área protegida han originado sistemas de dunas formados por arenas calcáreas y fragmentos de conchas acumulados por acción eólica y marina (Seingier et al., 2009; Mendoza et al., 2022). Estos sistemas se desarrollan sobre suelos arenosos recientes, principalmente Regosoles, con bajo contenido de materia orgánica y alta presencia de carbonatos (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011). En contraste, las zonas de manglar y lagunas presentan suelos hidromórficos como Histosoles, Gleysoles y Solonchaks, asociados a saturación hídrica y alta salinidad. La combinación de suelos someros, salinidad elevada y dinámica sedimentaria costera determina la estructura y distribución de la vegetación costera del área protegida.

Tabla 1. Lista de especies de plantas según el gradiente litoral. Las especies se organizan según su presencia en duna embrionaria, frontal y estabilizada. El asterisco (*) indica afinidad adicional: a la izquierda, hacia duna embrionaria; a la derecha, hacia duna estabilizada. Se incluye la categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT: (Pr) = sujeta a protección especial; (A) = amenazada.

Duna embrionaria	Duna frontal	Duna estabilizada
Ambrosia hispida	**Canavalia rosea*	*Bravaisia berlandieriana*
Batis maritima	**Euphorbia mesembryanthemifolia*	*Capraria biflora L.*
Cakile edentula	*Alternanthera flavescens**	*Coccoloba uvifera*
Sesuvium portulacastrum	*Ernodea littoralis**	*Cordia sebestena*
Sporobolus virginicus	*Hymenocallis littoralis**	*Stylosanthes hamata*
Tribulus cistoides	*Lantana involucrata**	*Eustoma exaltatum*
Uniola paniculata (Pr)	*Metastelma schlechtendalii**	*Melanthera nivea*
	*Scaevola plumieri (Pr)**	*Metopium brownei*
	Suriana marítima (A)	*Opuntia stricta*
	*Cassytha filiformis**	*Pithecellobium keyense*
	Tournefortia gnaphalodes (A)	*Randia aculeata L.*
		Sideroxylon americanum
		Spermacoce verticillata
		Tephrosia cineria
		Thrinax radiata (A)
		Erithalis fruticosa

La vegetación del parque está dominada por comunidades adaptadas a ambientes costeros, caracterizados por suelos arenosos pobres en nutrientes, alta insolación, salinidad y exposición constante a vientos marinos (Tabla 1) (Rodríguez et al., 2018; Quiroz &

Cervantes, 2022). Dentro del complejo dunar se distinguen comunidades que estructuran la cobertura vegetal de la franja litoral y cumplen funciones ecológicas como la estabilización del sustrato, la retención de sedimentos y la protección frente a la erosión costera (Seingier et al., 2009; Mendoza et al., 2025; Ovando et al., 2020). Entre las especies características se encuentran *Ipomoea pes-caprae, Canavalia rosea, Sesuvium portulacastrum, Suriana maritima, Tournefortia gnaphalodes* y *Coccoloba uvifera,* además de gramíneas halófitas como *Distichlis spicata* y *Sporobolus virginicus*.

De acuerdo con el programa de manejo del área natural protegida, la vegetación asociada al sistema de dunas cubre aproximadamente 79.16 ha, lo que representa cerca del 6.54 % de la superficie total del parque, distribuyéndose principalmente en la franja oriental y suroeste del área protegida (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011). Estas áreas dunares presentan una marcada influencia de procesos eólicos y marinos que condicionan la composición y estructura de la vegetación. Entre las dunas y los manglares se desarrolla una comunidad de transición conocida localmente como chi'ital, dominada por la palma *Thrinax radiata*, que funciona como ecotono entre ambos ecosistemas, aportando conectividad ecológica y estabilidad del paisaje, y ocupa aproximadamente 15.17 ha dentro del parque (Figura 9) (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011).

Figura. 9. Zona de transición (chi'ital) entre el sistema de duna costera.
Elaborado por Grecia Nefertari Flores Martínez

Sin embargo, en diversos sectores del parque la vegetación nativa de dunas se encuentra alterada por la presencia de especies exóticas invasoras, particularmente *Casuarina equisetifolia y Scaevola taccada*. Esta última, originaria del Indo-Pacífico e introducida en distintas regiones tropicales como planta ornamental, presenta una elevada capacidad de dispersión y crecimiento, formando matorrales densos que desplazan a la flora nativa y modifican la estructura y composición de las comunidades vegetales costeras (Pyšek et al., 2020; Castillo et al., 2021).

En el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia se ha registrado la presencia de S. taccada con alrededor de 84 parches y una cobertura total aproximada de 998 m², cuyo establecimiento podría comprometer la composición y dinámica del ecosistema si no se implementan acciones de contención y reducción (Figura 10). En este sentido, el control se integra dentro de las acciones de restauración ecológica por medio de la recuperación de la integridad ecológica y funcional de las dunas costeras requiere que permita implementar acciones, monitorear resultados y ajustar decisiones (Gann et al., 2019). Considerando la variabilidad de estos sistemas y el comportamiento de las especies invasoras, este enfoque favorece la evaluación continua de las estrategias de control y la recuperación progresiva (Quiroz & Cervantes, 2022; Mendoza et al., 2022).

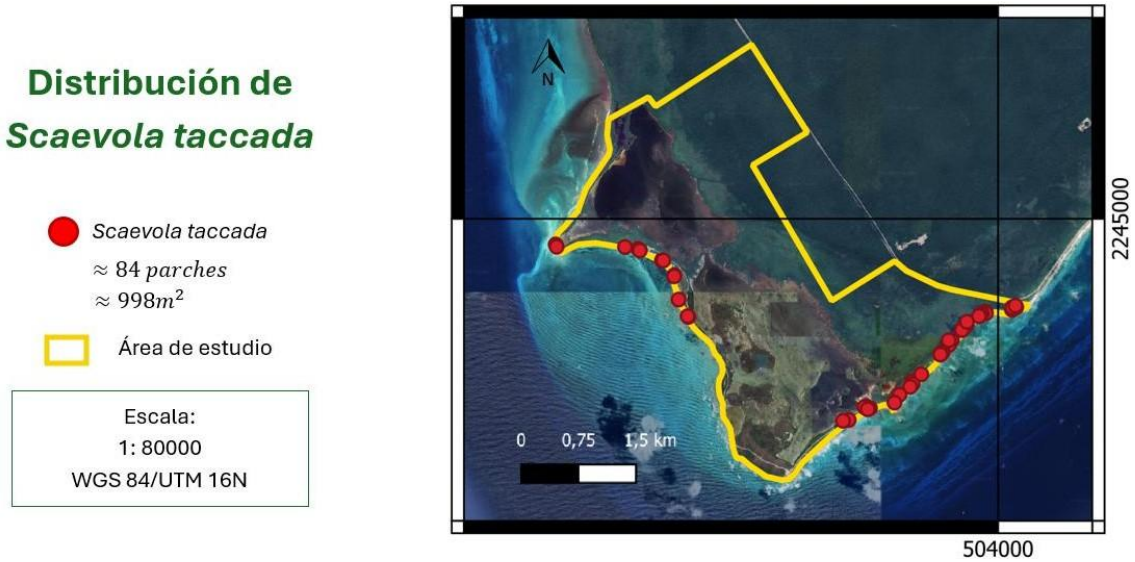

Figura 10. Mapa de distribución de *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia. Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

En la isla de Cozumel se han documentado 241 especies de vertebrados, de las cuales 28 corresponden a mamíferos, 186 a aves, 21 a reptiles y 6 a anfibios; mientras que dentro del área natural protegida se han registrado al menos 136 especies de vertebrados (Figura 11) (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011).

La diversidad de ecosistemas del parque, incluyendo dunas costeras, manglares y sistemas lagunares, favorece la presencia de fauna asociada a ambientes costeros y humedales. Entre las especies representativas destacan el vireo de Cozumel (*Vireo bairdi*), el mapache pigmeo (*Procyon pygmaeus*) y diversos roedores insulares, cuya distribución restringida resalta la importancia de estos ecosistemas para la conservación de la biodiversidad regional (MacGregor et al., 2020; Subdirección de Ecología, 2021). Asimismo, las dunas costeras proporcionan refugio y zonas de alimentación para reptiles, pequeños mamíferos y aves, mientras que las playas adyacentes funcionan como áreas de migración y anidación para tortugas marinas y aves playeras (Figura 11) (Cuevas & Guzmán, 2014; Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022).

Figura 11. Uso de las dunas costeras por distintos grupos faunísticos.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

En conjunto, el sistema costero del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia constituye un mosaico de ecosistemas interconectados donde las dunas costeras desempeñan un papel clave en la protección de la línea de costa, la estabilización de sedimentos y la conservación de la biodiversidad (Seingier et al., 2009; Mendoza et al., 2022). Estas comunidades albergan una alta diversidad de flora y fauna y contribuyen a la resiliencia del ecosistema frente a huracanes y tormentas tropicales. Sin embargo, la expansión de especies invasoras y las alteraciones de la cobertura vegetal pueden afectar la estructura del hábitat y los procesos ecológicos, evidenciando la necesidad de implementar acciones de manejo y restauración orientadas a recuperar la vegetación nativa y mantener la funcionalidad ecológica del parque.

Marco normativo legal

El marco normativo que sustenta la conservación y restauración ecológica en México se basa en instrumentos legales y de política pública orientados a la protección de los ecosistemas y al uso sustentable de los recursos naturales. A nivel nacional, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece las bases para la preservación, restauración y manejo de Áreas Naturales Protegidas, reconociendo la restauración como una estrategia para la recuperación de ecosistemas degradados (SEMARNAT, 2018). Asimismo, la Ley General de Vida Silvestre y la NOM-059-SEMARNAT-2010 contribuyen a la conservación de la biodiversidad mediante la protección de especies y la definición de categorías de riesgo (SEMARNAT, 2010).

De manera complementaria, el Programa Nacional de Restauración Ambiental 2025–2030 establece lineamientos estratégicos para la recuperación de ecosistemas prioritarios, incluidos los costeros (SEMARNAT, 2025). A nivel estatal, Quintana Roo cuenta con instrumentos de gestión ambiental y ordenamiento ecológico que permiten articular estos lineamientos en la administración y conservación de sus Áreas Naturales Protegidas (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011).

En este contexto, los programas de manejo de las ANP constituyen instrumentos rectores para la planeación y ejecución de acciones de conservación y restauración. Derivados de la LGEEPA, establecen la zonificación, los usos permitidos y las estrategias de manejo, integrando criterios ecológicos y sociales para orientar la restauración en ecosistemas

afectados por disturbios, incluyendo problemáticas como la fragmentación del hábitat, la presión turística y la presencia de especies exóticas invasoras (Cervantes et al., 2020; Pyšek et al., 2020).

La restauración ecológica se ha consolidado como una prioridad en la política ambiental nacional, orientada a revertir procesos de degradación mediante enfoques integrales que consideran tanto la biodiversidad como los servicios ecosistémicos (SEMARNAT, 2025). En el caso del Área Natural Protegida Laguna Colombia (Parque Ecológico Punta Sur), el programa de manejo reconoce a las dunas costeras como un componente clave para la estabilidad del sistema, debido a su función en la protección del litoral, la retención de sedimentos y su papel como hábitat (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2011). Asimismo, establece la necesidad de implementar acciones de restauración en áreas degradadas, incluyendo la rehabilitación de sitios perturbados y el manejo de factores de degradación como las especies invasoras.

Bajo este marco, el presente proyecto se alinea con dichos lineamientos al enfocarse en el control de *Scaevola taccada* y en la restauración de la vegetación de duna costera mediante especies nativas. Con ello, contribuye al restablecimiento de la estructura, funcionalidad y resiliencia del ecosistema, articulando el marco legal, los instrumentos de planeación y el conocimiento científico para fortalecer la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el área natural protegida.

Figura 12. Zona norte del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia.
Elaborado por Jesús Benavides Andrade.

Objetivos

El proyecto tiene como objetivo general restaurar las dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia, mediante la implementación de acciones de control de la especie invasora y la recuperación de la vegetación nativa, con el propósito de restablecer la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema. Este proceso busca favorecer la recuperación de procesos ecológicos clave, como la sucesión vegetal y la estabilización del sustrato, contribuyendo a la resiliencia del sistema y a la conservación de los servicios ecosistémicos asociados a las dunas costeras.

En este contexto, el presente plan de restauración ecológica tiene como finalidad servir como instrumento metodológico para orientar y sistematizar la implementación de acciones de restauración en dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* dentro del área de estudio. A través de este plan, se establecen lineamientos técnicos para el control de la especie invasora, la recuperación de la vegetación nativa y el restablecimiento de procesos ecológicos clave, facilitando la toma de decisiones, el seguimiento de las acciones y la evaluación de los resultados en el tiempo.

Con base en el objetivo planteado, se establecen los **objetivos específicos**, los cuales orientan las acciones necesarias para la restauración ecológica de las dunas costeras invadidas, abordando tanto el diagnóstico del sistema como la implementación y evaluación de las estrategias de intervención, los cuales se describen a continuación:

- Caracterizar el estado actual de las dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el área de estudio.
- Diseñar e implementar estrategias de control y manejo de *Scaevola taccada*, considerando su distribución, abundancia y capacidad de regeneración.
- Implementar un sistema de monitoreo ecológico que permita evaluar la respuesta del ecosistema a las acciones de restauración
- Generar información técnica y metodológica que contribuya a la gestión del área natural protegida y que pueda ser replicable en otros ecosistemas de dunas costeras afectados por especies invasora

Metas ecológicas

Con el fin de evaluar la efectividad de las acciones de restauración ecológica, se establecen las siguientes metas ecológicas cuantificables, se describen a continuación:

- **Reducir la cobertura** de *Scaevola taccada* en **≥ 70 %** en las áreas intervenidas.
- **Incrementar la cobertura** de vegetación nativa hasta **≥ 60 %.**
- **Aumentar la riqueza de especies nativas vegetales en ≥ 30 %** respecto a la línea base.
- **Lograr una supervivencia ≥ 70 %** de las especies nativas plantadas.
- **Lograr la estabilización del sustrato en ≥ 70 %** de las áreas intervenidas.

Metas técnicas y sociales

Con el fin de fortalecer la implementación y sostenibilidad del proyecto, se establecen las siguientes metas sociales orientadas a la toma de decisiones, la generación de información y la participación de actores clave:

- Fortalecer la **coordinación interinstitucional** entre el área natural protegida, instituciones académicas y organizaciones locales y turísticas para la implementación y seguimiento de acciones de restauración ecológica.
- Promover la **participación de actores** en actividades de restauración, monitoreo y mantenimiento, fomentando la apropiación social del proyecto.
- **Implementar estrategias de educación y sensibilización ambiental** dirigidas a visitantes, comunidades locales y personal del ANP, enfocadas en la importancia de las dunas costeras y el impacto de las especies invasoras.
- **Generar y sistematizar información técnica y científica** que contribuya a la toma de decisiones y al fortalecimiento de la gestión adaptativa dentro del área natural protegida.
- **Impulsar la vinculación con programas en materia de restauración ecológica**, favoreciendo la continuidad y escalabilidad de las acciones implementadas.

MODELO DE RESTAURACIÓN PROPUESTO

El modelo de restauración propuesto para las dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* se fundamenta en un enfoque integral que combina estrategias de intervención directa con procesos de regeneración natural, para poder recuperar la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema. Este modelo reconoce la complejidad de los sistemas de duna costera y la necesidad de aplicar enfoques flexibles que respondan tanto al grado de degradación como a la capacidad de resiliencia del sistema, integrando acciones de control, estabilización y revegetación dentro de un esquema adaptativo de restauración (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022).

En este contexto, la restauración ecológica se plantea mediante la combinación de restauración activa y pasiva, como una estrategia que maximiza la eficiencia y sostenibilidad del proceso. La restauración activa constituye el eje principal del modelo, al enfocarse en la eliminación de la especie invasora y en la reintroducción de especies nativas propias de la vegetación de duna costera. Estas acciones permiten acelerar la recuperación de la cobertura vegetal y restablecer procesos ecológicos clave, como la estabilización del sustrato y la sucesión vegetal (Mendoza et al., 2022).

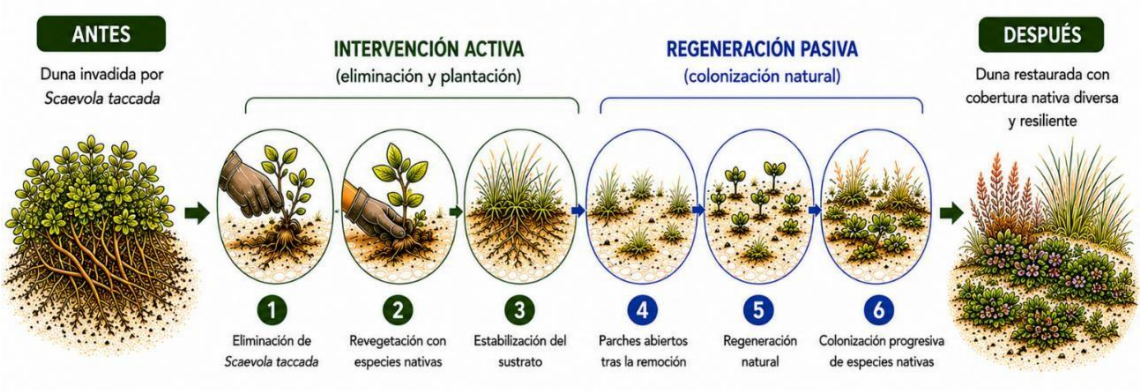

Figura 13. Combinación de restauración activa y pasiva.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

De manera complementaria, la restauración pasiva se incorpora en aquellos espacios donde, tras la remoción de la especie invasora, no se alcanza una cobertura total mediante la plantación (Figura 13). Estos parches abiertos representan oportunidades para la regeneración natural, siempre que se hayan reducido las presiones que limitaban el establecimiento de la vegetación. Así, se favorece la colonización progresiva de especies

nativas y se reduce la necesidad de intervención intensiva en toda la superficie (Calva & Pavón, 2018; Gann et al., 2019). En conjunto, la combinación de ambos enfoques permite una recuperación más eficiente, resiliente y sostenible en el tiempo.

Figura 14. Fases del modelo de restauración ecológica.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

El modelo se estructura en tres fases interrelacionadas que permiten abordar de manera progresiva y adaptativa la restauración del ecosistema (Figura 14). La primera fase corresponde al diagnóstico, selección de sitios, establecimiento de vivero y definición del sitio piloto. En esta etapa se evalúan las condiciones geomorfológicas, bióticas y de disturbio mediante herramientas como el Índice de Aptitud del Sitio (IAS), lo que permite identificar áreas prioritarias de intervención. Asimismo, se establece un vivero para la propagación de especies nativas y se define un sitio piloto donde se implementarán y evaluarán las acciones de restauración.

La segunda fase se enfoca en la propagación de especies nativas, considerando el gradiente litoral y las condiciones específicas de cada sitio. La selección de especies se realiza con base en su distribución natural y en los requerimientos ecológicos asociados a su establecimiento y desarrollo, incluyendo características del sustrato, disponibilidad de humedad, exposición al viento y condiciones de iluminación.

La tercera fase comprende la remoción de *S. taccada* y la implementación simultánea de acciones de estabilización y revegetación. En esta etapa se elimina la especie invasora y se realiza la plantación de especies nativas para recuperar la cobertura vegetal y estabilizar el sustrato. De manera paralela, se promueve la restauración pasiva en los espacios no revegetados, facilitando la regeneración natural y el establecimiento de especies propias del ecosistema. Esta integración permite avanzar en la recuperación funcional del ecosistema, incluyendo procesos como la sucesión vegetal, la retención de sedimentos, la recuperación de hábitats y la conectividad ecológica (Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022).

El monitoreo, la evaluación y el manejo adaptativo constituyen un componente transversal del plan de restauración. A través de este componente se evalúa la efectividad de las acciones implementadas mediante indicadores ecológicos como la cobertura vegetal, la supervivencia de las especies plantadas, la regeneración natural y la posible reinvasión de la especie invasora. Este seguimiento permite documentar la respuesta del ecosistema a las intervenciones, ajustar las estrategias implementadas y asegurar la sostenibilidad del proceso de restauración en el tiempo (Gann et al., 2019).

Dentro del enfoque propuesto, las acciones de control de la especie invasora, estabilización del sustrato y revegetación se conciben como procesos interrelacionados que actúan de manera complementaria. La remoción de *S. taccada* elimina la presión sobre la vegetación nativa; sin embargo, puede generar superficies expuestas susceptibles a la erosión o reinvasión (Cervantes et al., 2020). Por ello, esta acción se acompaña de medidas de estabilización y revegetación con especies nativas, orientadas a recuperar la estructura del sistema y restablecer procesos ecológicos clave.

La revegetación favorece la fijación de sedimentos, la sucesión vegetal y la regeneración natural, mientras que el manejo adaptativo permite ajustar las estrategias de intervención a partir del monitoreo y la evaluación continua de los resultados (Figura 15) (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022). En conjunto, estas acciones se integran en un esquema flexible que combina intervención dirigida y procesos naturales para promover la recuperación progresiva de la funcionalidad y resiliencia de las dunas costeras.

Figura 15. Manejo adaptativo aplicado al proceso de restauración ecológica.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

Fase 1. Diagnóstico y selección de sitios

La fase 1 corresponde al diagnóstico, selección de sitios y planeación inicial, estableciendo las bases para la implementación del proceso de restauración ecológica. En esta etapa se evalúan las condiciones ambientales, geomorfológicas y el grado de perturbación del sistema de duna costera para identificar áreas prioritarias de intervención. Asimismo, se establecen la delimitación del sitio piloto y la planificación de la infraestructura de apoyo. Esta fase permite generar una línea base para evaluar los cambios en el tiempo y orientar la toma de decisiones bajo un enfoque adaptativo.

La selección del sitio piloto se realiza mediante la evaluación de variables ecológicas, físicas y operativas que permiten identificar un área representativa y viable para la implementación inicial del modelo de restauración. Entre los criterios considerados se incluyen la cobertura de *Scaevola taccada,* la presencia de vegetación nativa y la accesibilidad, permitiendo seleccionar el área con mayor potencial de recuperación (Figura 16) (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022).

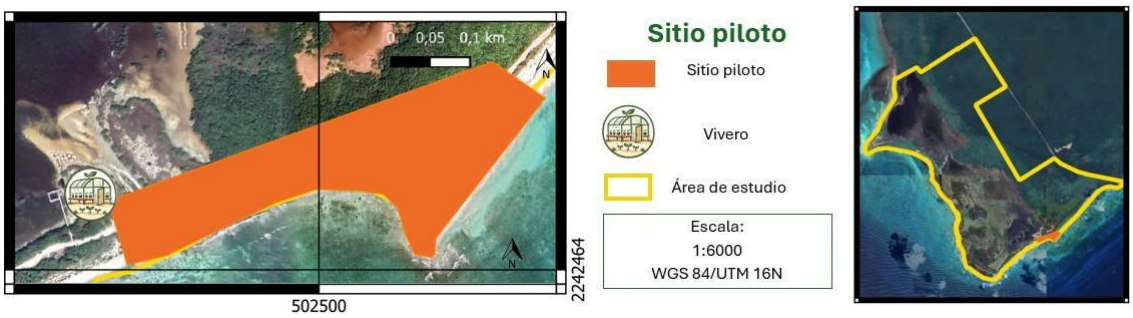

Figura 16. Mapa de sitio piloto.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

La delimitación del sitio piloto permite aplicar de manera controlada las técnicas de restauración, establecer parcelas de monitoreo y generar información sobre la respuesta del ecosistema. La implementación inicial permite evaluar y ajustar las técnicas propuestas bajo los principios del manejo adaptativo (SER, 2004; Gann et al., 2019). Con base en los resultados obtenidos, las estrategias podrán replicarse y escalarse progresivamente hacia otros parches invadidos por *S. taccada* dentro del área de estudio, priorizando aquellos con mayor aptitud para la restauración de acuerdo con los criterios establecidos. Asimismo, el sitio piloto permite estimar requerimientos operativos y generar información técnica que fortalezca la replicabilidad de las acciones.

La selección de los sitios de restauración se realiza mediante un proceso de priorización basado en el Índice de Aptitud del Sitio (IAS), que integra variables organizadas en tres componentes: geomorfológico, biótico y de disturbio antrópico (Figura 17; Tabla 2). El componente geomorfológico considera la altura relativa de la duna, indicadores de erosión, estabilidad del sustrato, textura del suelo y humedad superficial; el componente biótico incluye la cobertura vegetal total, la riqueza de especies nativas y la cobertura de *S. taccada*; mientras que el componente de disturbio antrópico incorpora el nivel de pisoteo, la presencia de residuos sólidos y la proximidad a infraestructura. Estas variables se evalúan mediante escalas ordinales y se ponderan según su relevancia ecológica (40 %, 35 % y 25 %, respectivamente), permitiendo clasificar según su aptitud para la restauración.

$$IAS = (CG \times 0.40) + (CB \times 0.35) + (DA \times 0.25)$$

Figura 17. Ecuación del Índice de Aptitud del Sitio (IAS), donde IAS corresponde al índice de aptitud del sitio; CG al puntaje de la condición geomorfológica; CB al puntaje de la condición biótica; y DA al puntaje ajustado de disturbio.

Tabla 2. Tabla de variables del Aptitud del Sitio (IAS)

Variables del Aptitud del Sitio (IAS)			
Componente geomorfológico (40%)			
Variable	**1**	**2**	**3**
Altura relativa de la duna	<10 m	10–30 m	>30 m
Indicado de erosión	≥2	1	0
Estabilidad del sustrato	>25 cm	15–25 cm	<15 cm
Textura del suelo	bola estable	bola débil	no forma bola
Humedad superficial	Alta	Intermedia	baja
Componente biótico (35%)			
Cobertura vegetal total	>70%	30–70%	<30%
Riqueza de especies nativas	Baja	Media	Alta
Cobertura de *Scaevola taccada*	>60%	30–60%	<30%
Componente de antrópico (25%)			
Pisoteo	Baja	Media	Alta
Residuos sólidos	0	1–3	>10
Proximidad a infraestructura	>30 m	15–30 m	<5 m

Estas variables se integran mediante un esquema de evaluación multicriterio, que permite asignar valores ponderados y clasificar los sitios en categorías de aptitud (alta, media o baja) para la restauración (Mendoza et al., 2022; Manzanilla et al., 2023). Este enfoque facilita la identificación de áreas prioritarias y proporciona una base técnica transparente y reproducible para la toma de decisiones (Gann et al., 2019; SICA, 2021). En consecuencia, la adecuada selección de sitios incrementa la eficiencia del proceso de restauración, favorece la conectividad ecológica y potencia procesos como la regeneración natural y la estabilidad del sistema dunar (Clewell & Aronson, 2013; Cervantes et al., 2020).

Como parte de la planeación operativa, se diseña un vivero para la producción de plantas nativas, ubicado en una zona de transición entre duna y manglar, con una superficie aproximada de 64 m². Esta infraestructura permite asegurar la disponibilidad de material vegetal en cantidad y calidad adecuadas, lo cual es fundamental para el éxito de las acciones de restauración (Gann et al., 2019). El vivero se estructura mediante mesas de propagación elevadas, lo que permite mantener las plantas separadas del suelo en un área propensa a inundaciones, favoreciendo el drenaje y reduciendo la incidencia de patógenos. Asimismo, se incorpora malla sombra al 70% para regular la radiación solar durante las primeras etapas de desarrollo, minimizando el estrés hídrico y térmico y favoreciendo el crecimiento de especies adaptadas a ambientes costeros (Mendoza et al., 2022).

En cuanto a su organización interna, el vivero se divide en áreas funcionales que optimizan el proceso de producción, incluyendo un área de trabajo, semillero, pre-trasplante y crecimiento. Adicionalmente, se contempla un área de sanidad vegetal, un espacio de educación ambiental y un sistema de captación de agua para el uso eficiente del recurso hídrico. Esta organización permite controlar las distintas etapas del desarrollo de las plantas, mejorar su calidad fisiológica y aumentar su probabilidad de supervivencia en campo, fortaleciendo así la eficiencia del proceso de restauración (Figura 18) (Gann et al., 2019).

Figura 18. Plano del vivero, conformado por ocho áreas funcionales destinadas a las diferentes etapas de manejo de plantas. El área 3, correspondiente al área de crecimiento, se encuentra subdividida en los sectores A y B. Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

Considerando una superficie total de 64 m² y la distribución de áreas funcionales destinadas a la propagación y crecimiento de plantas, el vivero presenta una capacidad estimada de producción de entre 300 individuos por ciclo aproximadamente, dependiendo de las especies propagadas. Dado que la revegetación contempla una superficie aproximada de 998 m² con una densidad de plantación de un individuo por metro cuadrado, la producción de material vegetal se plantea de manera escalonada durante los primeros años del proyecto. Esta estrategia permite abastecer progresivamente las actividades de revegetación, disponer de plantas para reposición de individuos muertos y optimizar el uso de la infraestructura disponible.

Fase 2. Selección de especies y propagación

La fase 2 corresponde a la selección de especies y la propagación de material vegetal, constituyendo una etapa clave para asegurar la viabilidad ecológica de las acciones de restauración. En esta fase se definen especies nativas en función de su distribución dentro del gradiente litoral, sus características funcionales y su capacidad de adaptación a las condiciones del ecosistema de duna costera. Paralelamente, se desarrollan procesos de propagación en vivero para garantizar la disponibilidad de plantas en cantidad y calidad adecuadas para su establecimiento en campo. De esta manera, esta etapa articula la producción vegetal con las necesidades de los sitios de restauración, favoreciendo el éxito de la revegetación y la recuperación de la funcionalidad del ecosistema.

La selección de especies se fundamenta en la información generada en la fase 1, particularmente en el diagnóstico. Bajo un enfoque ecológico-funcional, se consideran criterios de adecuación ecológica, factibilidad de propagación, rol funcional, capacidad de cobertura y adaptación a condiciones locales (Figura 19). Para ello, se evalúan el gradiente litoral, la exposición al viento, la salinidad, la movilidad del sustrato y la disponibilidad hídrica, factores que condicionan el establecimiento de la vegetación en dunas costeras (Cervantes et al., 2020; Mendoza et al., 2022). Asimismo, se priorizan especies con disponibilidad de propágulos, capacidad de producción en vivero, funciones asociadas a la fijación de sedimentos y la sucesión vegetal, así como formas de crecimiento que favorezcan la cobertura de parches abiertos

Figura 19. Criterios para considerar en la selección de especies en restauración de dunas costeras.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

Desde una perspectiva metodológica, la selección se realiza mediante un esquema multicriterio que integra la adecuación ecológica, el rol funcional, la capacidad de cobertura y la factibilidad de propagación en vivero, permitiendo priorizar especies para distintos tipos de sitios o parches intervenidos (SICA, 2021). Este proceso combina especies pioneras de rápida cobertura con especies estructurales que favorecen la estabilidad y resiliencia del sistema. De manera complementaria, se consideran aspectos operativos como la disponibilidad de propágulos y la supervivencia esperada en campo, asegurando la viabilidad técnica del proceso.

La propagación de especies nativas se desarrolla en vivero bajo condiciones controladas, con el objetivo de producir material vegetal de alta calidad fisiológica para su establecimiento en campo (Figura 20). Se prioriza el uso de semillas recolectadas localmente para mantener la variabilidad genética y favorecer la adaptación de las plantas al sitio de restauración (Clewell & Aronson, 2013). La recolección se realiza en poblaciones naturales sanas, abarcando múltiples individuos para asegurar diversidad genética.

Figura 20. Proceso de propagación de especies nativas para restauración de dunas costeras.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido con IA

El proceso de propagación inicia con la selección y acondicionamiento de semillas, incluyendo tratamientos pregerminativos como escarificación o hidratación según la especie. La siembra se realiza en sustratos ligeros, drenantes y dominados por arena, replicando condiciones de las dunas costeras. Se emplean mezclas con alta proporción de

arena (70–90%), complementadas con materia orgánica y, en algunos casos, suelo local, lo que favorece la aireación radicular, reduce patógenos y promueve el desarrollo de plantas adaptadas a baja retención hídrica (Mendoza et al., 2022).

Durante la producción en vivero se realiza el seguimiento de indicadores de calidad para evaluar el desarrollo y optimizar el manejo. Se consideran variables como supervivencia, altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, desarrollo radicular, vigor y estado fitosanitario. El manejo hídrico se ajusta a los requerimientos de cada especie y a las condiciones ambientales, aplicando riego cuando los primeros dos a tres cm del sustrato presentan pérdida de humedad o en periodos de altas temperaturas y baja precipitación. Durante la germinación y establecimiento inicial se mantiene una humedad adecuada, evitando déficit o encharcamiento; posteriormente, la frecuencia de riego se reduce gradualmente para favorecer el endurecimiento y la adaptación a campo.

Las prácticas de manejo y monitoreo orientadas a fortalecer la resistencia de las plantas, el uso de malla sombra regula la radiación solar en etapas tempranas, y su reducción progresiva junto con la disminución del riego para la aclimatación, induciendo características propias de especies de dunas, lo que incrementa su supervivencia en campo (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022). Además, se complementa con un protocolo preventivo que ajusta el riego según los requerimientos de cada especie y el manejo fitosanitario incluye monitoreos periódicos para la detección temprana de plagas y enfermedades. El material vegetal se selecciona con base en criterios de calidad como vigor, desarrollo radicular y ausencia de daños fitosanitarios, asegurando que los individuos más aptos sean destinados a la revegetación y optimizando la restauración ecológica (Clewell & Aronson, 2013; Gann et al., 2019).

Fase 3. Intervención y revegetación

La fase 3 corresponde a la implementación de acciones directas en campo orientadas al control de la especie invasora, la estabilización del sistema de duna y la revegetación con especies nativas previamente seleccionadas. Esta etapa traduce los resultados del diagnóstico (fase 1) y de la planeación y producción vegetal (fase 2) en intervenciones concretas que buscan recuperar la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema. Las acciones se desarrollan de manera integrada y secuencial, iniciando con la remoción

de *Scaevola taccada*, seguida de la estabilización del sustrato para reducir la erosión y culminando con la revegetación de los parches intervenidos. Su implementación se realiza bajo un enfoque adaptativo.

La remoción de *S. taccada* se implementa mediante un enfoque de control orientado a reducir su cobertura y dominancia, minimizando impactos sobre el sustrato y la vegetación remanente mediante intervenciones selectivas en parches delimitados, priorizando áreas con mayor cobertura de la especie y baja cobertura nativa (Figura 21) (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022). El método principal consiste en la extracción manual de individuos, procurando la remoción completa del sistema radicular para disminuir el rebrote; en ejemplares de mayor tamaño se emplea el corte a ras de suelo, complementado con la extracción de raíces cuando es posible.

Figura 21. Secuencia de acciones de intervención y control para *Scaevola taccada.*
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido con IA

Estas acciones se realizan evitando la remoción excesiva de sedimento y la generación de superficies desnudas susceptibles a la erosión (Cervantes et al., 2020). El material vegetal se retira del sitio, eliminando estructuras reproductivas y priorizando su ejecución antes de la fructificación para maximizar su efectividad (Mendoza et al., 2022). Dado su alto potencial de regeneración, la remoción se complementa con seguimiento periódico para eliminar rebrotes y nuevos reclutamientos, reduciendo la probabilidad de reinvasión (Gann et al., 2019).

De manera transversal, el registro y control de la intervención se implementa para asegurar la trazabilidad y evaluación de las acciones realizadas. Este proceso incluye el uso de formatos estandarizados de campo para documentar la ubicación de los parches, superficie intervenida, intensidad de remoción, número de individuos retirados y volumen estimado de biomasa. Asimismo, se incorporan registros fotográficos antes, durante y después de la intervención. De forma complementaria, los sitios son georreferenciados mediante GPS, permitiendo la integración de la información en sistemas de información geográfica (SIG) para su análisis espacial y la toma de decisiones bajo un enfoque de manejo adaptativo (Gann et al., 2019).

Posterior a la remoción, la estabilización del sistema de duna constituye una etapa para reducir la erosión y favorecer condiciones adecuadas para el establecimiento de la vegetación. La eliminación de la cobertura invasora puede generar superficies expuestas con alta movilidad de sedimentos, por lo que se implementan medidas orientadas a la retención de arena y a la recuperación de la estabilidad superficial (Mendoza et al., 2022; Ley de Seoane et al., 2011). Estas acciones se diseñan considerando variables como la pendiente, la exposición al viento, la granulometría del sustrato y el grado de perturbación, priorizando estrategias de bajo impacto que imiten procesos naturales (Roig et al., 2017).

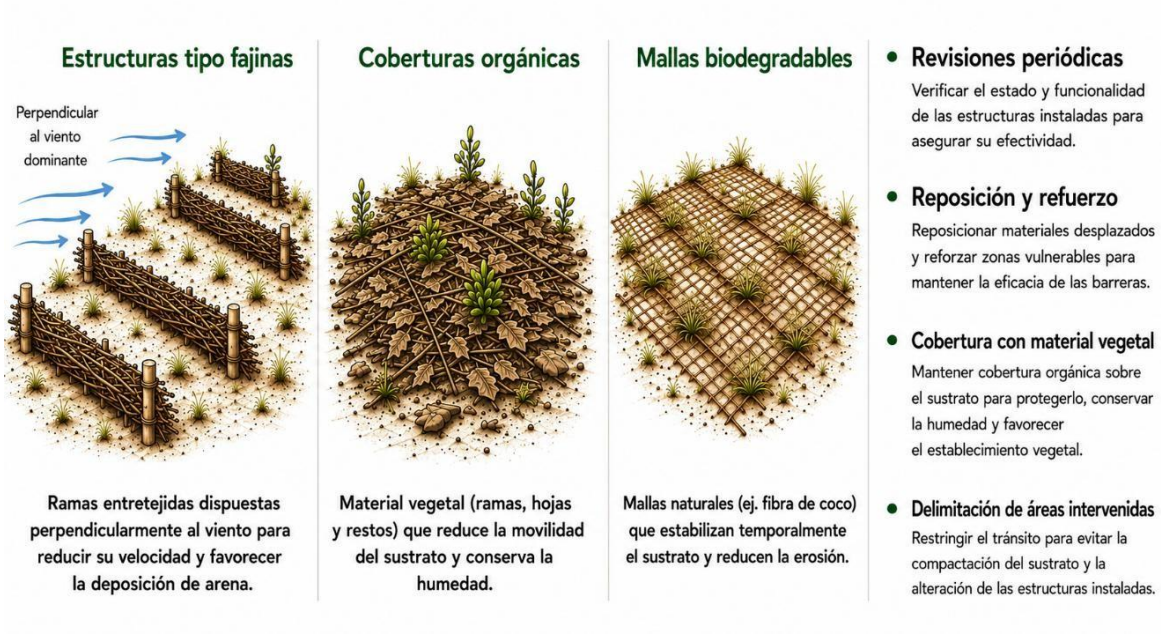

Figura 22. Barreras físicas temporales de estabilización de sustrato.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido con IA

Entre las principales medidas de estabilización se incluye la instalación de barreras físicas temporales elaboradas con materiales naturales, dispuestas perpendicularmente al viento dominante y, en algunos casos, en arreglos tipo cuadrícula, lo que permite reducir la velocidad del viento, favorecer la deposición de arena y generar microrelieves que facilitan el establecimiento vegetal; en zonas con mayor exposición pueden emplearse configuraciones más densas, así como estructuras tipo fajinas. De manera complementaria, se utilizan coberturas orgánicas y, en casos específicos, mallas biodegradables, por ejemplo, de fibra de coco, que contribuyen a estabilizar temporalmente el sustrato y a reducir la movilización de sedimentos sin generar impactos permanentes (Figura 22) (Ley de Seoane et al., 2011; Molina & Steffenino, 2018).

El mantenimiento de estas estructuras incluye revisiones periódicas para asegurar su funcionalidad, reposicionar materiales desplazados y reforzar zonas vulnerables, así como la implementación de medidas de protección del sustrato, como la cobertura con material vegetal y la delimitación de áreas intervenidas para restringir el tránsito, evitando la compactación y la alteración de las estructuras instaladas; en conjunto, estas acciones contribuyen a conservar la integridad superficial del suelo y a generar condiciones microambientales favorables para el establecimiento de la vegetación (Ley de Seoane et al., 2011; Gann et al., 2019)

La revegetación se realiza una vez que el sustrato ha sido estabilizado, mediante la plantación de especies nativas previamente seleccionadas y propagadas, cuya disposición responde a su distribución natural dentro del gradiente dunar y a sus características funcionales, combinando especies pioneras de rápida cobertura con especies estructurales que favorecen la consolidación del sistema. Las plántulas utilizadas son seleccionadas en vivero con base en criterios de calidad, priorizando individuos con sistema radicular bien desarrollado (cepellón firme), tallos lignificados y hojas sanas, con alturas aproximadas de 15–30 cm y una edad de 2–4 meses, además de haber pasado por un proceso de aclimatación progresiva a condiciones de alta radiación, viento y limitada disponibilidad de agua, lo que incrementa su probabilidad de supervivencia en campo.

Una vez establecidas en campo, las plantas son incorporadas al programa de monitoreo mediante el marcaje de individuos dentro de parcelas permanentes. Esto permite evaluar su respuesta al trasplante y generar información sobre su supervivencia y crecimiento durante las etapas iniciales de establecimiento. La plantación se lleva a cabo de forma manual, procurando minimizar la perturbación del sustrato y asegurar un adecuado contacto radicular. Durante las primeras semanas posteriores al trasplante podrán realizarse riegos de establecimiento cuando se presenten periodos prolongados de ausencia de precipitación (>15 días consecutivos sin lluvia) o cuando la humedad superficial del sustrato sea insuficiente para el establecimiento de las plantas (Mendoza et al., 2022).

Posteriormente, el mantenimiento incluye riegos de apoyo únicamente cuando se registren periodos de sequía prolongada superiores a 20–30 días sin precipitaciones significativas o cuando se observe marchitez generalizada en las plantas establecidas. Asimismo, se contempla el control de vegetación competidora, especialmente de rebrotes de *S. taccada*, la reposición de individuos muertos y el seguimiento de indicadores como supervivencia y crecimiento. En conjunto, estas acciones integran un enfoque adaptativo que contribuye a reducir la erosión, restablecer la cobertura vegetal y favorecer la recuperación progresiva de la estructura y funcionalidad del ecosistema de duna costera (Gann et al., 2019).

Figura 23. Actividad de Huellas con conciencia donde se realiza una plantación en el sitio piloto de *Hymenocallis littoralis* en un parche de *Scaevola taccada*, dirigido por Carolyn Gineth Casatañeda Poveda.
Elaborado por Fernando O'Farrill

Componente transversal de monitoreo, evaluación y adaptación

El monitoreo, la evaluación y el manejo adaptativo constituyen un componente transversal del plan de restauración, orientado a evaluar la efectividad de las intervenciones implementadas y favorecer la recuperación progresiva del ecosistema mediante la toma de decisiones basada en evidencia. No inicia de forma aislada, sino que se desarrolla en traslape con las fases anteriores, desde tercer trimestre del primer año, mediante la generación sistemática de información sobre la respuesta del sistema a las acciones de control, estabilización y revegetación. Bajo un enfoque de manejo adaptativo, integra el seguimiento de indicadores ecológicos con la evaluación continua de resultados, permitiendo identificar avances, limitaciones y oportunidades de mejora, así como ajustar oportunamente las estrategias de intervención de acuerdo con las condiciones de cada sitio y la dinámica del ecosistema (Gann et al., 2019).

El monitoreo se concibe como un proceso sistemático orientado a evaluar la respuesta del ecosistema mediante el seguimiento de variables relacionadas con la vegetación, la estabilidad del sustrato y la dinámica de la especie invasora. Para ello, se consideran indicadores estructurales y funcionales, incluyendo la supervivencia de las plantas (%), la altura de planta (cm), la cobertura vegetal total (%), la cobertura de *Scaevola taccada* (%) y la acumulación de sedimentos (cm). La cobertura vegetal y la cobertura de *S. taccada* se estiman mediante parcelas o transectos permanentes de monitoreo, y la acumulación de sedimentos se determina mediante estacas de referencia instaladas en campo para registrar los cambios en el nivel del sustrato a lo largo del tiempo.

Figura 24. Monitoreo de plántulas nativas en el vivero destinadas a las acciones de revegetación del sitio piloto de restauración, donadas por la empresa Asesoría Técnica y Estudios Costeros (ATEC).
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

De manera complementaria, se consideran indicadores relacionados con la recuperación de los procesos ecológicos y físicos del sistema, tales como la formación de microrelieves, la reducción de áreas de suelo desnudo, la capacidad de la vegetación para retener arena y la presencia de rebrotes de *S. taccada*, los cuales permiten evaluar la efectividad de las acciones de control y detectar oportunamente procesos de reinvasión (Mendoza et al., 2022).

La frecuencia de monitoreo se ajusta a la dinámica del ecosistema y a la etapa de desarrollo de las acciones de restauración (Tabla 3). Durante el primer año posterior a la revegetación, la supervivencia de las plantas se evalúa a los 30, 90, 180 y 365 días posteriores a la plantación, mientras que la altura de planta y la cobertura de *S. taccada* se registran trimestralmente. Por su parte, la cobertura vegetal, la acumulación de sedimentos y el estado de las estructuras de estabilización se monitorean de forma semestral. A partir del segundo año, la frecuencia se reduce progresivamente conforme avanza el establecimiento de la vegetación. Adicionalmente, se realizan evaluaciones extraordinarias después de eventos extremos, como huracanes o tormentas tropicales, con el fin de identificar daños y definir medidas correctivas oportunas.

Tabla 3. Frecuencia de monitoreo de indicadores ecológicos

Indicador	**Año 1**	**Año 2**	**Año 3 (o más)**
Supervivencia (%)	30, 90,180, y 365 dias	Semestral	Anual
Altura de la planta (cm)	Trimestral	Semestral	Anual
Cobertura vegetal (%)	Semestral	Semestral	Anual
Cobertura de *Scaevola taccada*	Trimestral	Semestral	Semestral
Acumulación de sedimentos	Semestral	Semestral	Anual
Estado de estructuras de estabilización	Trimestral	Semestral	Semestral

De manera complementaria, se registra el esfuerzo operativo asociado a la implementación y mantenimiento de las acciones de restauración, con el fin de evaluar los recursos requeridos y apoyar la toma de decisiones. Este indicador se estima mediante el número de jornadas de trabajo realizadas, horas-hombre invertidas, personal participante, recorridos de monitoreo efectuados y actividades de mantenimiento o control de rebrotes ejecutadas durante cada periodo de evaluación. El seguimiento de esta información permite relacionar la respuesta del ecosistema con el nivel de intervención requerido y optimizar la planificación de recursos a lo largo del proyecto.

La evaluación del éxito de la restauración se basa en el seguimiento de los indicadores ecológicos y físicos definidos previamente, los cuales permiten valorar la recuperación progresiva de la estructura, composición y funcionalidad del sistema dunar. Entre los principales criterios se consideran la supervivencia de las plantas, el crecimiento de la vegetación, el incremento de la cobertura vegetal nativa, la acumulación de sedimentos y

la reducción de la cobertura de *S. taccada*. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados y orientar la toma de decisiones bajo un enfoque de manejo adaptativo, se establecen umbrales de desempeño clasificados en categorías de respuesta favorable, precaución y acción correctiva (Tabla 4).

Tabla 4. Umbrales de desempeño para el manejo adaptativo

Indicador	**Verde**	**Amarillo**	**Rojo**
Supervivencia (%)	>70%	50-70%	<50%
Altura de la planta (cm)	Crecimiento esperado	Crecimiento lento	Sin crecimiento
Cobertura vegetal (%)	>60%	30-59%	<30%
Acumulación de sedimentos (cm)	Estable o positiva	Negativa	Erosión continua

Los valores ubicados en la categoría verde indican que las acciones implementadas presentan una respuesta favorable y pueden mantenerse sin modificaciones significativas. Los valores en categoría amarilla sugieren la necesidad de incrementar la frecuencia de monitoreo y evaluar ajustes en las prácticas de manejo. Por su parte, los valores clasificados en categoría roja representan puntos de quiebre que requieren la implementación de medidas correctivas, tales como reposición de individuos, refuerzo de estructuras de estabilización, incremento temporal del riego de apoyo o intensificación del control de *S. taccada*, según corresponda.

Con base en la información generada, el manejo adaptativo integra el monitoreo, la evaluación y la toma de decisiones. Cuando los indicadores se encuentran por debajo de los umbrales establecidos, se implementan medidas correctivas para ajustar las estrategias de restauración. En conjunto, este enfoque dinámico reduce la incertidumbre y fortalece la resiliencia del ecosistema a mediano y largo plazo (Gann et al., 2019). Dado que la recuperación de las dunas costeras es un proceso de largo plazo, se recomienda mantener el monitoreo una vez finalizado el plan como parte de la gestión adaptativa del área, para evaluar la recuperación del ecosistema y orientar futuras decisiones de manejo.

Temporalidad del proceso de restauración

El plan de restauración se desarrolla en un horizonte de cuatro años, estructurado en tres fases operativas interrelacionadas, complementadas por un componente transversal de monitoreo, evaluación y manejo adaptativo (Figura 25).

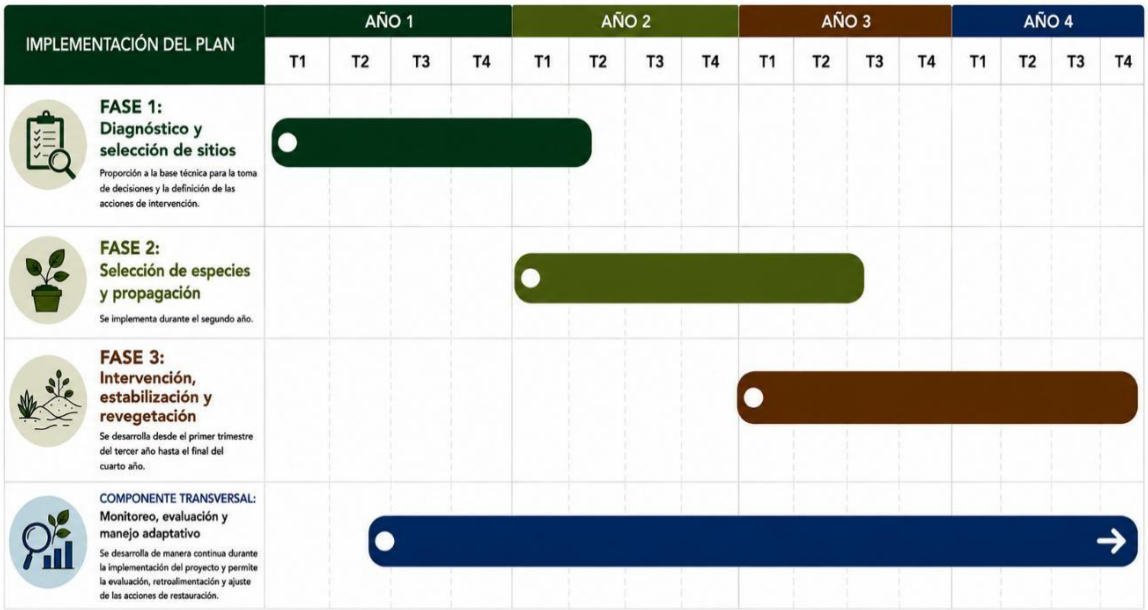

Figura 25. Cronograma de implementación del plan de restauración ecológica en dunas costeras. T1, T2, T3 y T4 corresponden a los trimestres de cada año: T1 (enero–marzo), T2 (abril–junio), T3 (julio–septiembre) y T4 (octubre–diciembre).
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

La fase 1, correspondiente al diagnóstico, selección de sitios y planeación operativa, se desarrolla desde el inicio del primer año hasta mediados del segundo año. Esta fase proporciona la base técnica para la toma de decisiones y la definición de las acciones de intervención.

La fase 2 se enfoca en la selección de especies y la propagación de material vegetal en vivero. Se implementa desde el inicio del segundo año hasta el tercer trimestre del tercer año, garantizando la disponibilidad de plantas con características adecuadas para su establecimiento en campo, así como de material vegetal para reposiciones, ampliación de las áreas revegetadas y sustitución de individuos que no sobrevivan durante las primeras etapas de la intervención.

La fase 3 comprende las acciones de control de Scaevola taccada, estabilización del sistema dunar, revegetación con especies nativas y mantenimiento inicial de las áreas intervenidas. Esta fase se desarrolla desde el primer trimestre del tercer año hasta el cuarto trimestre del cuarto año. Durante su implementación, la propagación en vivero continúa de manera paralela con el fin de garantizar la disponibilidad de material vegetal para reposiciones, ampliación de las áreas revegetadas y sustitución de individuos que no sobrevivan durante el establecimiento. Debido a la naturaleza dinámica de las dunas costeras y al riesgo de reinvasión, estas actividades se ejecutan de manera progresiva y pueden ajustarse de acuerdo con la respuesta del ecosistema.

El componente transversal de monitoreo, evaluación y manejo adaptativo se desarrolla desde el tercer trimestre del primer año, una vez establecida la línea base y definidas las primeras acciones, acompañando de forma continua el proyecto hasta el cuarto trimestre del cuarto año. Este componente permite dar seguimiento a la supervivencia y crecimiento de la vegetación nativa, la recuperación de la cobertura vegetal, la estabilidad del sistema dunar, facilitando ajustes oportunos que fortalezcan la restauración ecológica y la sostenibilidad del proyecto a largo plazo. Aunque el plan contempla cuatro años de implementación, se recomienda mantener el monitoreo posteriormente, después de la finalización de las fases como parte de la gestión adaptativa del área, para evaluar la recuperación del ecosistema y orientar decisiones de manejo futuras.

Estructura operativa

El desarrollo del plan de restauración requiere la participación de un equipo multidisciplinario que garantice la adecuada implementación de las actividades en cada una de sus fases. En este contexto, se contempla un coordinador técnico especializado en restauración ecológica, responsable de la planificación, supervisión y toma de decisiones bajo un enfoque de manejo adaptativo. A nivel operativo, se cuenta con el apoyo del personal del parque, incluyendo trabajadores de mantenimiento y construcción, junto con la formación de una brigada de campo encargada de ejecutar actividades de revegetación, mantenimiento y apoyo en el monitoreo. Se integra personal de vivero responsable de la propagación y manejo del material vegetal, así como voluntarios que participan en actividades específicas como la plantación, mantenimiento y monitoreo básico.

Para la implementación de las acciones es fundamental contar con insumos adecuados para las actividades en campo y vivero, seleccionados según los requerimientos de cada fase y priorizando materiales locales, de bajo impacto ambiental y compatibles con la dinámica de las dunas costeras. El control de la especie invasora requiere herramientas manuales para la remoción y recolección del material vegetal. Durante la estabilización del sistema dunar se emplean materiales orgánicos y estructuras biodegradables que favorecen la retención de sedimentos y la reducción de la erosión. La revegetación requiere plántulas producidas en vivero y herramientas básicas de plantación, mientras que la producción vegetal se apoya en sustratos arenosos, contenedores, malla sombra y sistemas de riego. Finalmente, el monitoreo utiliza instrumentos de medición, georreferenciación y registro que permiten documentar y evaluar el avance del proceso.

En términos económicos, la implementación del plan de restauración requiere recursos financieros. El presupuesto presentado corresponde a una estimación referencial para un horizonte de ejecución de cuatro años, considerando recursos humanos, materiales e insumos, transporte, operación y seguimiento técnico; el apoyo del personal del parque y la participación de voluntarios contribuyen a optimizar los recursos disponibles. Debido a la duración del proyecto, se incorpora una reserva presupuestal equivalente al 10 % del costo total estimado para cubrir contingencias e incrementos asociados a la inflación. No obstante, los costos pueden variar según la disponibilidad de materiales, la escala de intervención y las condiciones del sitio, por lo que se recomienda realizar ajustes presupuestales periódicos para mantener la viabilidad financiera del plan (Tabla 5).

Tabla 5. Presupuesto estimado de implementación

Etapa	**Costo estimado (MXN)**
Fase 1: Diagnostico y selección de sitios	$65.000
Fase 2: Selección de especies y propagación	$95.000
Fase 3: Intervención y revegetación	$185.000
Monitoreo evaluación y adaptación	$85.000
Subtotal	$430.000
Inflación y contingencias (10%)	$43.000
Total estimado	$473.000

La distribución presupuestal refleja los requerimientos operativos del proyecto. Los mayores costos se concentran durante las etapas de producción vegetal e intervención en campo, debido a las actividades de propagación, control de la especie invasora, instalación de estructuras de estabilización y revegetación. Por su parte, las fases de diagnóstico y monitoreo demandan principalmente recursos asociados a trabajo técnico, seguimiento de indicadores y evaluación de resultados.

En conjunto, esta estructura operativa favorece la coordinación entre los diferentes actores involucrados, optimiza el uso de los recursos humanos, materiales y financieros, y facilita la implementación ordenada de las acciones previstas en cada fase del plan. Asimismo, proporciona las condiciones necesarias para mantener la continuidad del monitoreo y fortalecer la toma de decisiones mediante un enfoque de manejo adaptativo.

Participación social y educación ambiental

La participación social y la educación ambiental constituyen componentes estratégicos al integrar el conocimiento con las dinámicas sociales vinculadas al territorio. La incorporación de actores locales, personal operativo y otros grupos de interés promueve la corresponsabilidad en el manejo del ecosistema y favorece el mantenimiento de las áreas restauradas una vez finalizada la intervención. Asimismo, la educación ambiental aumenta la comprensión de la importancia ecológica de las dunas costeras y promueve la apropiación social del proceso de restauración. La participación del sector privado, particularmente de empresas turísticas y hoteleras, resulta clave para ampliar el alcance de estas acciones y fomentar prácticas responsables en el manejo del ecosistema (Pérez et al., 2021; López et al., 2023).

El gobierno juega un papel central al articular la participación de instituciones, personal técnico, comunidades locales, sector privado y otros actores involucrados en la toma de decisiones, la ejecución de acciones y el seguimiento del proyecto. Esta coordinación favorece la ejecución de las actividades de restauración, monitoreo y mantenimiento, optimiza el uso de los recursos y facilita la detección temprana de nuevas invasiones o afectaciones en el ecosistema. fortaleciendo el manejo adaptativo y la permanencia de los resultados del proyecto (Jiménez et al., 2015; López et al., 2023).

En este marco, la vinculación con actores clave fortalece los procesos de educación ambiental y las acciones de restauración (Figura 26). Entre ellos se encuentran instituciones académicas, dependencias gubernamentales, organizaciones locales, personal del parque, sector privado, comunidad local, visitantes y turistas. La articulación entre estos actores permite integrar capacidades y recursos, mejorar las acciones de restauración y ampliar el cuidado y seguimiento de las áreas intervenidas, favoreciendo su conservación a largo plazo (Jiménez et al., 2015; Pérez et al., 2021; López et al., 2023).

Figura 26. Actores involucrados en el plan de restauración.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

L La sostenibilidad del proceso de restauración depende del compromiso continuo de los actores involucrados. Cuando la comunidad, el personal del parque, el sector turístico y los visitantes participan activamente en el cuidado de las dunas, aumenta la probabilidad de conservar las áreas restauradas, reducir las presiones antrópicas y dar continuidad a las acciones de monitoreo y mantenimiento más allá del horizonte de ejecución del proyecto.

Las actividades de educación ambiental se integran al proyecto mediante el desarrollo de talleres y actividades participativas vinculadas directamente con las acciones de restauración (Figura 27). Estas actividades se implementarán de manera continua durante los cuatro años de ejecución del proyecto, con una frecuencia mínima semestral y en articulación con las jornadas de propagación, revegetación y monitoreo. Entre ellas se incluyen jornadas de sensibilización dirigidas a la comunidad local, visitantes, personal del parque y empresas hoteleras, enfocadas en la importancia ecológica de las dunas

costeras, los impactos de especies invasoras como *Scaevola taccada* y el papel de la vegetación nativa en la estabilización del sistema. Asimismo, se contemplan talleres prácticos de propagación en vivero que permitan a los participantes conocer los procesos de producción vegetal y su relación con la restauración ecológica (López et al., 2023).

Como parte del proyecto también se desarrollarán jornadas de restauración participativa, recorridos interpretativos en campo y materiales de divulgación, como señalética ambiental, infografías y contenidos digitales, orientados a fortalecer el conocimiento sobre las dunas costeras y promover buenas prácticas, especialmente en zonas con alta afluencia de visitantes. En conjunto, estas estrategias fortalecen la conciencia ambiental, incrementan la participación activa de los diferentes actores y consolidan su compromiso con la conservación de las dunas, contribuyendo a la sostenibilidad del proyecto a largo plazo (Pérez et al., 2021; López et al., 2023).

Figura 27. Actividades de educación ambiental y participación social desarrolladas con estudiantes de la Universidad de Quintana Roo (UQROO) en el diagnóstico del proyecto de restauración de dunas costeras. Dirigida por Carolyn Gineth Castañeda Poveda. Elaborado por José Antonio Díaz Chim.

Riesgos y contingencias

Figura 28. Duna afectada por viento "Norte".
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

La identificación y gestión de riesgos es fundamental en proyectos de restauración ecológica, especialmente en ecosistemas costeros con alta variabilidad ambiental (Gann et al., 2019). En dunas costeras, factores como eventos hidrometeorológicos, variabilidad climática y presiones antrópicas pueden afectar la estabilidad del sistema y la efectividad de las acciones (Frausto et al., 2016; Palafox & Gutiérrez, 2013). Un enfoque preventivo permite reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia del proceso (Mendoza et al., 2022), integrando el análisis de riesgos al manejo adaptativo para optimizar la toma de decisiones y el ajuste de estrategias.

Entre los principales factores de riesgo se encuentran las condiciones ambientales de las zonas costeras insulares como Cozumel, caracterizadas por una alta exposición a fenómenos climáticos y oceanográficos (Frausto et al., 2016). Los huracanes representan una de las perturbaciones más relevantes, ya que pueden provocar pérdida de vegetación, desplazamiento de sedimentos y daños en las estructuras de estabilización (Sánchez et al., 2012; Palafox & Gutiérrez, 2013). Asimismo, los periodos de sequía pueden afectar la supervivencia de las plantas introducidas, especialmente durante las etapas iniciales. De igual forma, los eventos de "nortes" y "sures" favorecen la movilidad de arena y dificultan el establecimiento de la vegetación (Figura 28) (Hesp, 2002). En conjunto, estos factores evidencian la necesidad de incorporarlos en la planificación y ejecución del proyecto (Legorreta et al., 2016; Mendoza et al., 2022).

Otro riesgo relevante es la reinvasión de especies exóticas, particularmente *Scaevola taccada,* cuya alta capacidad de dispersión y establecimiento le permite recolonizar rápidamente áreas intervenidas si no se mantiene un control continuo (Castillo et al., 2021; Castillo et al., 2022). En ambientes insulares como Cozumel, este riesgo compromete el establecimiento de la vegetación nativa y la recuperación del sistema (Muñoz et al., 2025). La presencia de bancos de semillas, rebrotes y la dispersión por viento o agua facilitan su reaparición incluso después de acciones de remoción (Estanga, 2018). Además, puede alterar procesos ecológicos como la polinización, afectando la dinámica del ecosistema (Swensen et al., 2024).

CATEGORÍA	RIESGO PRINCIPAL	POSIBLES IMPACTOS	MEDIDAS DE MITIGACIÓN
FACTORES AMBIENTALES Variabilidad y eventos climáticos propios de zonas costeras insulares.	**Huracanes y tormentas tropicales** Alta exposición a fenómenos hidrometeorológicos.	• Remoción de vegetación. • Desplazamiento de sedimentos. • Erosión del sistema dunar. • Afectación de estructuras de estabilización.	**Monitoreo climático permanente** • Dar seguimiento a pronósticos y alertas para anticipar eventos extremos. • Realizar monitoreos posteriores a eventos para evaluar daños y definir acciones correctivas. **Diseño e implementación de estructuras de estabilización** • Construir barreras, empalizadas y usar vegetación pionera para retener sedimentos y reducir la erosión. • Seleccionar materiales compatibles con la dinámica del ecosistema.
	Variabilidad climática y sequías Reducción de la humedad en el sustrato.	• Menor disponibilidad de humedad. • Disminución de la supervivencia de plantas, especialmente en etapas tempranas.	**Manejo de humedad** • Riesgos de apoyo en períodos de sequía. • Uso de mulch o cobertura para conservar la humedad del sustrato.
	Vientos fríos ("nortes" y "sures") Incremento de la desecación y movilidad de arena.	• Desecación del sustrato. • Movilidad de arena. • Dificultad para la estabilización del sistema y el establecimiento de la vegetación.	**Selección de especies y planificación adecuada** • Usar especies nativas tolerantes a estrés hídrico y vientos fuertes. • Programar actividades evitando períodos críticos.
FACTORES BIOLÓGICOS Riesgo de reinvasión de especies exóticas.	**Reinvasión de especies exóticas: *Scaevola taccada*** Alta capacidad de dispersión, establecimiento y competencia.	• Recolonización rápida de áreas intervenidas. • Competencia con especies nativas. • Alteración de procesos ecológicos (ej. polinización). • Compromiso de la recuperación del sistema dunar.	**Mantenimiento y manejo adaptativo** • Mantenimiento periódico de estructuras de estabilización y reposición de plantas. • Ajustar estrategias según la respuesta del sistema. **Control y monitoreo continuo** • Recorridos periódicos de inspección. • Eliminación de rebrotes e individuos. • Monitoreo constante de áreas restauradas. **Disposición adecuada del material vegetal** • Disponer correctamente el material removido para evitar su propagación. **Fortalecimiento de la vegetación nativa** • Aumentar la cobertura y diversidad de especies nativas para generar competencia y limitar el establecimiento de la invasora. **Manejo adaptativo** • Integrar monitoreos y análisis de resultados. • Implementar ajustes en la gestión del sistema para asegurar la efectividad.

Figura 29. Principales riesgos y medidas de mitigación en la restauración de dunas costeras.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda, asistido por IA

Frente a estos riesgos, se plantean medidas preventivas orientadas a reducir la vulnerabilidad del sistema y fortalecer la resiliencia del proceso de restauración (Figura

29). Estas acciones se incorporan desde la planificación, mediante la selección de especies nativas adecuadas, el uso de materiales compatibles con la dinámica del ecosistema y la programación de actividades en función de las condiciones climáticas, evitando periodos críticos (Gann et al., 2019; Mendoza et al., 2022). Asimismo, se recomienda mantener un monitoreo climático permanente mediante el seguimiento de pronósticos y alertas tempranas, lo que permite anticipar eventos extremos y ajustar oportunamente las acciones de manejo.

En relación con los riesgos ambientales, se prioriza la implementación de estructuras de estabilización como barreras, empalizadas y el uso de vegetación pionera, que favorecen la retención de sedimentos y reducen la erosión (Miller et al., 2001; Ley de Seoane et al., 2011). Estas acciones se complementan con el mantenimiento periódico de las estructuras, la reposición de plantas y monitoreos posteriores a eventos extremos para evaluar daños y definir medidas correctivas (Legorreta et al., 2016). En condiciones de sequía, también pueden implementarse riegos de apoyo y coberturas vegetales que contribuyan a conservar la humedad del sustrato y favorecer el establecimiento de la vegetación.

En cuanto al control de la reinvasión, las medidas preventivas incluyen recorridos periódicos de inspección, la eliminación de rebrotes y plántulas, y la disposición adecuada del material vegetal removido para evitar su propagación (Castillo et al., 2021; Pyšek et al., 2020). El fortalecimiento de la cobertura y diversidad de especies nativas también contribuye a generar competencia ecológica y limitar el establecimiento y expansión de la invasora. En conjunto, estas acciones se articulan con el monitoreo y el manejo adaptativo, permitiendo ajustar las estrategias en función de la respuesta del sistema y asegurar la continuidad de los avances en la restauración (Gann et al., 2019).

BENEFICIOS Y PROYECCIÓN DEL PLAN DE RESTAURACIÓN

El presente plan de restauración ecológica constituye una propuesta integral para la recuperación de las dunas costeras invadidas por *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Laguna Colombia, en la isla de Cozumel (Figura 30). Su implementación busca favorecer la recuperación de la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema, contribuyendo a la conservación de uno de los ambientes costeros más importantes de la isla. Asimismo, el plan proporciona una base técnica para orientar futuras acciones de restauración, fortalecer la gestión del área natural protegida y promover la conservación de los servicios ecosistémicos asociados a las dunas costeras.

Figura 30. Entrada del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia.
Elaborado por Carolyn Gineth Castañeda Poveda

La implementación del plan conlleva beneficios ecológicos orientados a la recuperación progresiva del sistema de duna costera. El establecimiento de especies nativas favorece la recuperación de la cobertura vegetal, la estabilización del sistema dunar y la disminución de procesos erosivos, generando condiciones favorables para la biodiversidad local. Estos cambios contribuyen a fortalecer la función del ecosistema como barrera natural frente a la erosión y al oleaje. Asimismo, favorecen la infiltración y protección del acuífero kárstico, mantienen hábitats para numerosas especies y benefician indirectamente ecosistemas asociados, como manglares y arrecifes, fortaleciendo la conectividad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la isla.

Se espera un incremento gradual de la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones ambientales. Si bien algunos beneficios, como el establecimiento de la vegetación y la estabilización inicial del sustrato, pueden observarse durante los primeros años de implementación, la recuperación de procesos ecológicos y servicios ecosistémicos más complejos constituye un proceso de mediano y largo plazo que continuará más allá del horizonte del proyecto.

Los beneficios del plan también se extienden al ámbito social al fortalecer la educación ambiental, la participación activa y la corresponsabilidad en la conservación de las dunas costeras. Estas acciones favorecen una mayor comprensión sobre la importancia ecológica del ecosistema entre la comunidad local, el personal del parque, los visitantes y el sector turístico, promoviendo el cuidado y uso responsable del territorio. Asimismo, su conservación contribuye al mantenimiento de servicios ecosistémicos esenciales, como la protección del acuífero que abastece de agua dulce a la isla y la conservación del paisaje costero, fortaleciendo el turismo de naturaleza. La apropiación social del proyecto favorece la continuidad de las acciones de conservación, contribuyendo a la sostenibilidad de la restauración y a la protección del área natural protegida a largo plazo.

El enfoque metodológico propuesto sienta las bases para la replicabilidad del proyecto en otros sistemas de duna costera del Caribe. La sistematización de la experiencia y la articulación entre actores permiten que este plan sirva como referencia para futuras iniciativas de restauración, contribuyendo al escalamiento de estrategias de conservación y al fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas costeros. De esta manera, el proyecto se posiciona como una contribución al manejo sostenible de estos ecosistemas y adaptación al cambio climático.

Figura 31. Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia.
Elaborado por Jesús Benavides Andrade.

AGRADECIMIENTOS

Antes de iniciar estos agradecimientos, deseo expresar que este libro representa no solo un trabajo académico, sino también un camino profundamente personal, lleno de aprendizajes, desafíos y experiencias que marcaron mi formación dentro de la restauración ecológica. A lo largo de esta travesía tuve la fortuna de encontrar personas e instituciones que, con su apoyo, conocimientos, confianza y compañía, hicieron posible la realización de este trabajo. Por ello, dedico las siguientes palabras con profunda gratitud a quienes dejaron una huella significativa en esta experiencia.

Agradezco profundamente a Dios por acompañarme y protegerme en cada paso de este camino, por darme fortaleza en los momentos difíciles, iluminar mi rumbo y permitirme llegar hasta aquí. Gracias por recordarme siempre la importancia de avanzar con fe, amor y esperanza.

A mis padres, Emilce Poveda Rojas y Rafael Fernando Castañeda, gracias por su amor incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, por motivarme a seguir adelante y por estar presentes a pesar de la distancia. Todo lo que soy también es gracias a ustedes. A mi hermana, Hania Gisell Castañeda Poveda, por acompañarme durante esta etapa y por aportar su talento en la elaboración de algunas de las ilustraciones de este libro. A mis tíos y a mis abuelitos, por su cariño, compañía y apoyo incondicional; gracias por sus palabras de aliento y por brindarme siempre amor, confianza y fortaleza.

Al Dr. Diego Francisco Angulo Pérez, por su orientación, confianza y acompañamiento a lo largo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones y enseñanzas fueron fundamentales para la construcción y fortalecimiento de este trabajo. A la Dra. Regina Pérez, por su guía, confianza y acompañamiento durante este proceso, incluso a través de la distancia. A la Dra. Laura Magdalena Scott Morales, por su asesoría, disposición y valiosas observaciones, así como por aportar perspectivas que enriquecieron significativamente el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, en particular a la Facultad de Ciencias Forestales y a sus profesores, por compartir sus conocimientos, enseñanzas y experiencias a lo largo de mi formación académica, contribuyendo significativamente a mi crecimiento

profesional y personal. A la Fundación de Parques y Museos de Cozumel, institución encargada de la administración del parque, y a sus directivos, el Dr. Jesús Benavides Andrade y el Biólogo Héctor González Cortez, por abrirme las puertas del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia y brindarme las facilidades necesarias para la realización de este proyecto. Mi más sincero agradecimiento a cada uno de los trabajadores del parque por su disposición, apoyo y compañía durante las jornadas de campo, por compartir sus experiencias y conocimientos, y por hacer de esta etapa una experiencia tan enriquecedora.

A la Universidad de Quintana Roo, por recibirme durante mi estancia académica y brindarme el aprendizaje, acompañamiento y las oportunidades necesarias para fortalecer mi formación profesional y contribuir al desarrollo de esta investigación. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo otorgado durante mis estudios de posgrado, permitiéndome desarrollar este proyecto y continuar mi camino dentro de la restauración ecológica.

A los estudiantes del Laboratorio de Diversidad Vegetal y Filogenética Integrativa de la Universidad de Quintana Roo, quienes participaron y me acompañaron durante las jornadas de campo, por su entusiasmo, esfuerzo, disposición y valiosa colaboración.

A mis amigos Catalina Celis Cueto, Karen Valentina Ausique Delgado, Shirley Valentina Brun, Felipe López Cuevas, Isabel Reyes Cueto, Andrés Hernández, Aurora Puente, Stephanie Flores, Roberto Pineda, Carlos Rodríguez, Antonio Juventino Treviño Rodríguez, Dante Sosa, Janis Paulina Lara Patiño, José Luis Rodríguez Acosta, Nehemías Tec Sulub, Kevin Humberto Diaz Verduzco y Wilbert David Uhu Yam, gracias por acompañarme durante este camino, escucharme, brindarme ánimo en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada logro.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este libro y del plan de restauración de dunas costeras. Cada aprendizaje, conversación, consejo y muestra de apoyo dejó una huella importante en este recorrido, recordándome que la restauración ecológica no solo transforma ecosistemas, sino también a las personas que dedican su esfuerzo, conocimiento y corazón a cuidarlos.

REFERENCIAS

Ayuntamiento de Cozumel, Subdirección de Ecología. (2021). *Conocimientos y percepciones sobre la fauna silvestre de Cozumel*. Ayuntamiento de Cozumel.

Blanco Álvarez, D. A., & Rodríguez Villalba, M. (2020). *La bella y la bestia: Valoración de servicios ecosistémicos en una playa del Caribe colombiano*.

Barrera-Cataño, J. I., & Valdés-López, C. (2007). Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum, 12*(1), 11–24. Pontificia Universidad Javeriana.

Calva-Soto, K., & Pavón, N. P. (2018). La restauración ecológica en México: Una disciplina emergente en un país deteriorado. *Madera y Bosques, 24*(1), 2411135. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411135

Canales, J. y Llanquimán, F. (2021). *Dunas Costeras en la Patagonia Raúl Marín Balmaceda 2021*. Fundación Aysén Mira el Mar

Castillo-Campos, G., García-Franco, J. G., & Martínez, M. L. (2021). *First record of naturalization of Scaevola taccada* (Gaertn.) Roxb. (Goodeniaceae) in southeastern Mexico. *BioInvasions Records, 10*(2), 425–435. https://doi.org/10.3391/bir.2021.10.2.21

Castillo-Campos, G., Martínez, M. L., & García-Franco, J. G. (2022). La lechuga de mar, una planta invasora en las costas de la Península de Yucatán, México. *Desde el Herbario CICY, 14*, 17–21. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Cervantes, O., Espejel, I., Arellano, E., & Delhumeau, S. (2020). Servicios ecosistémicos de las dunas costeras mexicanas: Importancia ecológica y social. *Investigaciones Geográficas*, (102), 1–18.

Clewell, A. F., & Aronson, J. (2013). *Ecological restoration: Principles, values, and structure of an emerging profession* (2nd ed.). Island Press.

Collantes-Chávez-Costa, A., Alanís-Rodríguez, E., Yam-Uicab, O., López-Contreras, C., Sarmiento-Muñoz, T., & Tapia-Muñoz, J. L. (2018). *Composition, structure and diversity of coastal vegetation in the northeastern of Cozumel, Mexico / Composición, estructura y diversidad de la vegetación costera del noreste de Cozumel, México*. Universidad de Quintana Roo.

CONANP. (2018). *Programa de manejo del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Cuevas, E., & Guzmán-Hernández, V. (2014). *Las tortugas marinas de la isla de Cozumel, Quintana Roo*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

Estanga Mollica, M. E. (2018). *Importancia de las interacciones bióticas directas e indirectas en la invasión de plantas exóticas* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias].

Finkle, A. J., & Elliot, N. B. (2011). *Status of endemic Scaevola plumieri and invasive Scaevola taccada on San Salvador Island, Bahamas*. En J. E. Baxter & E. S. Cole (Eds.), *Proceedings of the 13th Symposium on the Natural History of the Bahamas* (pp. 46–51). Gerace Research Center.

Fondo de Desarrollo Verde para la región SICA. (2021). *Guía metodológica para la implementación de línea base de servicios ecosistémicos y la generación de índices de aptitud para prácticas de restauración de paisajes*. Programa Regional Fondo de Desarrollo Verde para la región del SICA (FDV).

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., González, E., Shaw, N., Decleer, K., & Dixon, K. W. (2019). *International principles and standards for the practice of ecological restoration (2nd ed.)*. Restoration Ecology, 27(S1), S1–S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gobierno del Estado de Quintana Roo. (1996). *Decreto por el que se establece como zona sujeta a conservación ecológica el área denominada Laguna Colombia, en el municipio de Cozumel, Quintana Roo*. Gobierno del Estado de Quintana Roo.

Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2002). *Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la región denominada Isla de Cozumel y su Área Marina de Influencia*.

Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2011). *Programa de manejo del Área Natural Protegida Zona Sujeta a Conservación Ecológica "Laguna Colombia" (Parque Ecológico Punta Sur), Cozumel, Quintana Roo*. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo

González Rodríguez, F. A. (2024). *Evaluación visual de un paisaje de manglar después de 18 años de su restauración, en el Parque Ecológico Punta Sur, Cozumel, México* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales.

Instituto Nacional de Ecología. (1996). *Programa de manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP).

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., & Martínez, M. L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(3), 777–789. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.05.011

Ley de Seoane, C., Navarro Pons, M., & Muñoz Pérez, J. J. (2011). *Métodos generales de restauración de sistemas dunares*.

Lopez-Castro, L. A., Pérez-Ramos, F. G., Argota-Pérez, G., & Rodríguez-Santiago, M. A. (2023). Educación ambiental en la restauración ecológica. *The Biologist (Lima)*, 22(1). https://doi.org/10.62430/rtb20242211756

MacGregor-Fors, I., Gómez-Martínez, M. A., García-Arroyo, M., Vázquez, L.-B., Vázquez-Domínguez, E., & Valenzuela-Galván, D. (2020). *Aves de la Tierra de las*

Golondrinas: Isla de Cozumel. Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. https://doi.org/10.26359/EPOMEX.CEMIE022021

Manzanilla-Quiñones, U., Delgado-Valerio, P., Pedraza-Santos, M. E., & Molina-Sánchez, A. (2023). Modelado de idoneidad ambiental en la identificación de sitios potenciales para la toma de datos dendrocronológicos. *Madera y Bosques, 23*(1), e2312464. https://doi.org/10.21829/myb.2023.29124

Mendoza-González, G., Martínez, M. L., Lithgow, D., Pérez-Maqueo, O., & Simonin, P. (2022). Coastal dune vegetation and ecosystem services in Mexico. *Journal of Coastal Research, 38*(2), 345–358.

Mendoza González, G., Aguirre Fierro, J. C., Badillo Alemán, M., Hernández Mendoza, V., Popoca Cruz, P. E., Téllez Valdés, O., Carnevali, G., & Chiappa Carrara, X. (2025). *Catálogo de vegetación de la duna costera de la península de Yucatán*. Instituto de Ecología, Sede Mérida, Universidad Nacional Autónoma de México.

Molina, B., & Steffenino, F. (2018). *Estabilización de dunas en playas de Maldonado, Uruguay*. En XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (IAHR), Buenos Aires, Argentina

Muñoz-Gallego, R., Correia, M., Costa, A., & Donoso, I. (2025). Islas: Los ecosistemas más vulnerables a las invasiones biológicas. *Ecosistemas, 34*(3), 2947. https://doi.org/10.7818/ECOS.2947

Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., & Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 91*, e912883. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883

Pérez, D. R., Pilustrelli, C. B., & Aragón, R. (2021). Restauración ecológica y educación ambiental: estrategias para la participación social. Ecología Austral, 31(2), 123–135.

Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., Dawson, W., Essl, F., Foxcroft, L. C., Genovesi, P., Jeschke, J. M., Kühn, I., Liebhold, A. M., Mandrak, N. E., Meyerson, L. A., Pauchard, A., Pergl, J., Roy, H. E., Seebens, H., & Richardson, D. M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. Biological Reviews, 95(6), 1511–1534. https://doi.org/xxxxx

Quiroz-Villanueva, J., & Cervantes, O. (2022). Coastal dune vegetation and ecological dynamics in the Mexican Caribbean. *Journal of Coastal Research*, 38(5), 1021–1032.

Rodríguez-Revelo, N., Espejel, I., Arredondo García, C., Ojeda-Revah, L., & Sánchez Vázquez, M. A. (2018). Environmental services of beaches and coastal sand dunes as a tool for their conservation

Rodríguez-Revelo, N., Espejel, I., Acéves-Calderón, P., Leyva, C., Ojeda-Revah, L., & Sánchez-Vázquez, M. A. (2020). *Análisis retrospectivo de la duna costera El Socorro, Baja California, México*.

Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., & Blázquez Salom, M. (2017). Restauración de sistemas dunares en las Islas Baleares (2000–2017): una visión crítica. Investigaciones Geográficas, (69), 119–136.

Seingier, G., Espejel, I., & Fermán Almada, J. L. (2009). Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. Investigaciones Geográficas, (68), 97–109.

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

Society for Ecological Restoration (SER). (2004). *The SER international primer on ecological restoration*. Society for Ecological Restoration International

Swensen, S. M., et al. (2024). Pollination interactions between the invasive *Scaevola taccada* and the native *Scaevola plumieri* in Puerto Rico. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1281797. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1281797

Van Wilgen, B. W., Measey, J., Richardson, D. M., Wilson, J. R., & Zengeya, T. A. (2020). Biological invasions in South Africa: An overview. En B. W. van Wilgen, J. Measey, D. M. Richardson, J. R. Wilson, & T. A. Zengeya (Eds.), *Biological invasions in South Africa* (Chapter 1). Spring

Vargas, O. (Ed.). (2007). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Grupo de Restauración Ecológica

LISTA DE TABLAS

Número	Título	Página
1	Lista de especies de plantas según el gradiente litoral	10
2	Tabla de variables del Aptitud del Sitio (IAS)	23
3	Frecuencia de monitoreo de indicadores ecológicos	33
4	Umbrales de desempeño para el manejo adaptativo	34
5	Presupuesto estimado de implementación	37

LISTA DE FIGURAS

Número	Título	Página
1	Invasión de *Scaevola taccada*	1
2	Zonificación de la duna costera	2
3	Duna afectada por actividades antrópicas	4
4	Morfología de *Scaevola taccada*	5
5	Dinámica de formación de dunas costera	6
6	Sistema de duna costera conservado	7
7	Mapa ubicación del área de estudio	8
8	Relación geomorfológica entre el manglar y las dunas costeras	9
9	Zona de transición (chi'ital) entre el sistema de duna costera	11
10	Mapa de distribución de *Scaevola taccada* en el Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia	12
11	Uso de las dunas costeras por distintos grupos faunísticos	13
12	Zona norte del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia	15
13	Combinación de restauración activa y pasiva	18
14	Fases del modelo de restauración ecológica	19
15	Manejo adaptativo aplicado al proceso de restauración ecológica	21
16	Mapa de sitio piloto	22
17	Ecuación del Índice de Aptitud del Sitio (IAS)	22
18	Plano del vivero	24
19	Criterios para considerar en la selección de especies en restauración de dunas costeras	25
20	Proceso de propagación de especies nativas para restauración de dunas costeras	26
21	Secuencia de acciones de intervención y control para *Scaevola taccada*	28
22	Barreras físicas temporales de estabilización de sustrato	29

23	Actividad de Huellas con conciencia donde se realiza una plantación en el sitio piloto de *Hymenocallis littoralis* en un parche de *Scaevola taccada*	31
24	Monitoreo de plántulas nativas en el vivero destinadas a las acciones de revegetación del sitio piloto de restauración	32
25	Cronograma de implementación del plan de restauración ecológica en dunas costeras	35
26	Actores involucrados en el plan de restauración	39
27	Actividades de educación ambiental y participación social desarrolladas con estudiantes de la Universidad de Quintana Roo (UQROO) en el diagnóstico del proyecto de restauración de dunas costeras.	40
28	Duna afectada por viento “Norte”	41
29	Principales riesgos y medidas de mitigación en la restauración de dunas costeras	42
30	Entrada del Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia	44
31	Parque Ecológico Estatal Laguna Colombia	45

ANEXO 1

Desglose presupuestal estimado del plan de restauración

Tabla 1. Presupuesto estimado para la Fase 1. Diagnóstico y caracterización.

Concepto	**Subtotal (MXN)**
Reconocimiento y caracterización del sitio	$18,000
Material de muestreo y monitoreo	$10,000
Equipo menor de campo	$7,000
Procesamiento y análisis de datos	$15,000
Elaboración cartográfica y análisis SIG	$15,000
Total	$65,000

Tabla 2. Presupuesto estimado para la Fase 2. Producción de plantas en vivero.

Concepto	**Subtotal (MXN)**
Bolsas y contenedores	$15,000
Sustrato y acondicionadores	$18,000
Sistema de riego y almacenamiento de agua	$20,000
Herramientas y equipo de vivero	$7,000
Producción y mantenimiento de plantas	$27,500
Monitoreo y control fitosanitario	$7,500
Total	$95,000

Tabla 3. Presupuesto estimado para la Fase 3. Control de *Scaevola taccada*, estabilización y revegetación.

Concepto	**Subtotal (MXN)**
Remoción de *Scaevola taccada*	$35,000
Disposición del material removido	$10,000
Barreras de estabilización y empalizadas	$35,000
Mallas biodegradables y materiales complementarios	$20,000
Transporte de plantas al sitio	$10,000
Revegetación y plantación	$30,000
Riegos de establecimiento y mantenimiento	$20,000
Reposición de individuos	$25,000
Total	$185,000

Tabla 4. Presupuesto estimado para el componente de monitoreo, evaluación y manejo adaptativo.

Concepto	**Subtotal (MXN)**
Monitoreo ecológico	$30,000
Seguimiento de supervivencia y crecimiento	$15,000
Monitoreo de reinvasión de Scaevola taccada	$10,000
Evaluación de estructuras de estabilización	$10,000
Educación ambiental y participación social	$10,000
Elaboración de informes técnicos	$10,000
Total	$85,000

Tabla 5. Resumen general del presupuesto.

Concepto	**Subtotal (MXN)**
Total Fase 1	$65,000
Total Fase 2	$95,000
Total Fase 3	$185,000
Monitoreo, evaluación y manejo adaptativo	$85,000
Subtotal	$430,000
Inflación y contingencias (10 %)	$43,000
TOTAL ESTIMADO DEL PROYECTO	$473,000

Los costos presentados corresponden a una estimación referencial elaborada para fines de planificación y pueden variar en función de la disponibilidad de materiales, costos de transporte, condiciones del sitio y ajustes derivados de la inflación durante el periodo de ejecución del proyecto.