

GUÍA DE MONITOREO DE ÁREAS DE RESTAURACIÓN DE MANGLAR:

UN ENFOQUE ESPACIO TEMPORAL



Medio Ambiente

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



CONABIO

COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

Sistema de Monitoreo de los Manglares de México

COORDINACIÓN DE SISTEMAS, MONITOREO E INFORMACIÓN GEOESPACIAL



CRÉDITOS



Medio Ambiente
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



CONABIO
COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

María Teresa Rodríguez Zúñiga • José Alberto Alcántara Maya
Inder Tecuapetla Gómez • María Isabel Cruz López
Ricardo Domínguez Varela (WWF México)

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación está financiada en parte por el World Wildlife Fund Inc. (WWF) con el apoyo del Bezos Earth Fund. Queremos agradecer a Edgar Villeda Chávez, Samuel Velázquez Salazar, Luis Valderrama Landeros y Carlos Troche Souza colaboradores del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México, especialmente Berenice Vázquez Balderas y Fernanda Tonalli Ramírez Aguilera (WWF México) por la revisión del escrito para su mejora. Así mismo, agradecemos la colaboración y el valioso apoyo con la logística y acompañamiento de nuestros compañeros de la CONANP Víctor Hugo Vázquez Moran y Oscar Rosas Aceves, asignados a la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales Nayarit, así como a Coral Mascote Maldonado y Claudia Marisol Durán Miranda de WWF México, y el acompañamiento y retroalimentación de Francisco Flores de Santiago de la UNAM. Diseño y diagramación: Rafael Ríos Rodríguez.



CONANP
COMISIÓN NACIONAL
DE ÁREAS NATURALES
PROTEGIDAS



ÍNDICE

- ▶ **INTRODUCCIÓN**

- ▶ **ANTECEDENTES DE LA RESTAURACIÓN Y MANEJO ADAPTATIVO**



- ▶ **1. ALGUNOS CRITERIOS A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DE ÁREAS**

- ▶ **1.1 Coberturas históricas en el área a restaurar**

- ▶ *Revisión de imágenes históricas - Google Earth*
 - ▶ *Cartografía histórica*

- ▶ **1.2 Dinámica hidrosedimentaria**

- ▶ *Caracterización general del sitio de interés*
 - ▶ *Precipitación y temperatura*
 - ▶ *Régimen hidrológico*
 - ▶ *Niveles de agua subterránea*
 - ▶ *Modelos hidráulicos*



- ▶ **2. MONITOREO ESPACIAL**

- ▶ **2.1 Ámbitos de la restauración y necesidades del monitoreo espacial**

- ▶ **2.2 Preparación de la información satelital**

- ▶ *Obtención de insumos satelitales y preprocesamiento*
 - ▶ *Identificación de las temporadas climáticas*
 - ▶ *Generación de compuestos*

- ▶ **2.3 Monitoreo a través de cartografía**

- ▶ *Generación del mapa de la línea base*
 - ▶ *Actualización del mapa de la línea base*
 - ▶ *Detección de cambios*

- ▶ **2.4 Monitoreo a través de índices de vegetación**

- ▶ *Índices propuestos*
 - ▶ *Tendencias de incremento o pérdida de verdor*
 - ▶ *Plataforma para la visualización índices de vegetación y nubes de puntos*
 - ▶ *Herramientas de visualización*

- ▶ **2.5 Monitoreo a través de modelos hidrodinámicos**

- ▶ *Estaciones hidrométricas*
 - ▶ *Escalas graduadas*
 - ▶ *Estadal y cámara fotográfica*
 - ▶ *Escalas y cámaras trampa*
 - ▶ *Sensores barométricos (HOB0)*
 - ▶ *Monitoreo de agua subterránea (piezometría)*
 - ▶ *Monitoreo mediante modelos hidráulicos*

- ▶ **CONSIDERACIONES FINALES**

- ▶ **LISTA DE SIGLAS UTILIZADAS**

- ▶ **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Desde hace algunos años, el tema de la restauración de ecosistemas ha cobrado gran relevancia debido a la crisis ambiental mundial que enfrentamos. En este sentido, muchos países forman parte de los diversos convenios existentes para alcanzar las metas de restauración.

En la actualidad, específicamente el tema de la restauración de manglares se encuentra en una importante coyuntura, debido a que las metas ambientales para estos ecosistemas son de la más alta prioridad en el ámbito mundial, derivadas del importante papel que juegan estos ecosistemas en la mitigación del cambio climático.

En este tema de restauración de ecosistemas, los desarrolladores de proyectos se benefician de saber qué teorías explican los patrones y procesos en un ecosistema específico, y los científicos necesitan una visión general de la evidencia empírica que respalda las teorías actuales. De tal forma que, el fortalecimiento de los vínculos entre la práctica de la restauración y la ciencia beneficia a ambas áreas. Sin embargo, aunque existe mucha información sobre la teoría y la práctica de la restauración de ecosistemas, ésta se encuentra dispersa en diversas fuentes como artículos científicos, libros, reportes y otras fuentes, lo que dificulta la ejecución de proyectos ágiles y exitosos. Como menciona Heger *et al.* (2022), hay una falta de enfoques sintéticos y de vínculos entre la teoría y la práctica ecológica relacionadas con la restauración y, ante las frecuentes

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



convocatorias para realizar acciones de restauración, existe una necesidad urgente de integración del conocimiento en los proyectos de restauración mediante mecanismos de fácil acceso y comprensibles por un público amplio. Se reconoce que en este proceso la tecnología de teledetección, como herramienta avanzada de monitoreo y análisis, desempeña un papel clave en el monitoreo de la restauración ecológica (Wang *et al.* 2024).

El objetivo de esta publicación es fortalecer y acelerar el aprendizaje en el tema espacial, tanto para la formulación como para el monitoreo de proyectos de restauración de manglares, mediante la incorporación sistemática de tecnologías digitales (plataformas, drones, sensores remotos, etc.) que permitan verificar los avances de la restauración o bien realizar adaptaciones en el manejo del área que conlleve a mejores resultados.

La guía pretende aportar información complementaria a la comúnmente abordada en otras guías de restauración de manglares, como las desarrolladas por Teutli *et al.* (2020 y 2021), al integrar la parte espacial tanto en la definición de las áreas a restaurar, así como para el monitoreo. Está dirigida a un público amplio, con distintos niveles de conocimiento e intereses sobre el tema de la restauración de los manglares; algunas secciones son más técnicas, por lo que a lo largo de la obra se informa al usuario sobre otros documentos o herramientas que puede utilizar para profundizar en el tema.



Antecedentes de la restauración y manejo adaptativo

Ante la crítica situación de degradación de prácticamente todos los ecosistemas a nivel mundial, actualmente la restauración ecológica juega un papel fundamental; se trata de un conjunto de acciones que ayudan a la recuperación de un ecosistema que ha sido afectado (Keenleyside 2014) para que, en la medida de lo posible, se restablezcan sus condiciones naturales para seguir proporcionando bienes y servicios ecosistémicos (CONABIO-WWF 2024).

En este sentido, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el periodo comprendido entre 2021 y 2030 como el Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas y emitió diez principios (**FIGURA 1.**), con el propósito de guiar las acciones de restauración en un contexto global. Esta Declaratoria y los Principios básicos para la restauración de los ecosistemas¹ tienen por objetivo atender la imperiosa necesidad de detener, prevenir y revertir la degradación de los ecosistemas, y de restaurar de manera efectiva los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos que han sido degradados en todo el mundo.

Para fortalecer esta importante iniciativa mundial, esta guía aporta algunas herramientas que apoyan a la aplicación de los principios mencionados. En el contexto de esta guía se

El manejo adaptativo de ecosistemas se refiere a la acción de evaluar periódicamente los resultados y, si es necesario, implementar adecuaciones para mejorar los resultados finales del proyecto.

Si las acciones de un proyecto no están logrando los resultados esperados, es porque: a) los supuestos estaban errados, b) las acciones fueron mal ejecutadas, c) las condiciones en el sitio del proyecto cambiaron, d) el monitoreo ha tenido algunas fallas, o bien una combinación de estas circunstancias.

La adaptación involucra cambiar los supuestos y las intervenciones.

IMPACTOS DE VISITANTES,
Material de Trabajo 6.10.
https://nmssanctuaries.blob.core.windows.net/sanctuaries-prod/media/archive/management/pdfs/Day6_H10_AdaptMgmt_esp.pdf

.....

¹ <https://www.decadeonrestoration.org/es/publications/principios-para-la-restauracion-de-los-ecosistemas-como-guia-para-el-decenio-de-las>

considera de suma importancia revisar los siguientes principios que sin duda permitirán generar cada vez más y mejores proyectos de restauración de manglares:



FIGURA 1.

Principios para la restauración de los ecosistemas como guía para el Decenio de las Naciones Unidas 2021-2030.

En la actualidad, a nivel mundial son muchos los esfuerzos por restaurar los ecosistemas, en especial los manglares porque acumulan cantidades significativas de dióxido de carbono en relación con otros tipos de ecosistemas, debido a esto se ha reconocido su importante rol en la mitigación al cambio climático (Alongi 2020).

Si bien, aún son muchos los aspectos por comprender relacionados con los procesos de recuperación de los sitios afectados,

en México hay importantes avances, por ejemplo, en 2011 la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) planteó la necesidad de no solo reforestar las zonas degradadas de manglar como la única opción, sino la importancia de realizar acciones para la recuperación de la hidrología, el aporte de sedimentos, la normalización de parámetros ambientales como la salinidad, temperatura de agua y oxígeno disuelto en el agua, entre otros, de una forma muy específica para cada zona deteriorada, como acciones previas para el establecimiento natural o asistido de nuevos individuos de manglar (CONAFOR 2011). Afortunadamente, el enfoque del restablecimiento de la conectividad entre los manglares y otros ecosistemas marino costeros cobra cada vez más relevancia.

La comunidad científica reconoce que el grado de éxito de los proyectos de restauración varía significativamente a nivel mundial, advirtiendo el poco esfuerzo para mapear, monitorear y comparar resultados y/o experiencias que permitan obtener mejores resultados (Alexandris *et al.* 2013). Bajo este contexto, se considera importante realizar las siguientes acciones en los proyectos de restauración, que en conjunto aportarán información para realizar adaptaciones oportunas que conlleven a mejores resultados:

- 1) Elaborar mapas que registren la línea base de distribución y extensión del ecosistema en el área de restauración, que permitan el monitoreo espacial de los cambios cuantitativos en las coberturas de suelo y vegetación.
- 2) Realizar análisis periódicos de índices de vegetación que proporcionen información para hacer un seguimiento continuo.
- 3) Realizar el monitoreo hidrosedimentario que permita conocer la dinámica de estos aspectos previo y posterior a las acciones del proyecto.



El éxito de la restauración consiste en alcanzar las condiciones adecuadas para el establecimiento, la supervivencia, el crecimiento, la reproducción de los individuos de manglar, así como el regreso de la fauna y como objetivo final, el restablecimiento de los procesos y servicios ecosistémicos del sitio.

- 4) Realizar el monitoreo espacialmente explícito de otros aspectos *in situ* como referencias fotográficas y registro de flora y fauna, que permitan tener una idea más concreta de indicios de la recuperación ecológica de las áreas.

En México, diversos grupos de trabajo realizan actividades para monitorear el avance de sus sitios en restauración, por ejemplo, evalúan la estructura de los individuos y los efectos benéficos en las comunidades vegetales y humanas, otros realizan vuelos con drones obteniendo fotografías de cámaras RGB para realizar un seguimiento puntual, algunos otros monitorean la recuperación de grupos de fauna (Arceo-Carranza *et al.* 2016, López Rasgado *et al.* 2022). Sin embargo, los resultados de estos esfuerzos generalmente son de acceso público limitado. La poca difusión de la información incide en la baja velocidad tanto del aprendizaje como en el avance del conocimiento basado en experiencias. Un esfuerzo para mejorar la situación es el Sistema Nacional de Información para la Restauración Ambiental (SNIRA) implementado por la CONABIO².

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



2 <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/snira>



1. Algunos criterios a considerar en la selección de áreas

Los bosques de manglar desempeñan un papel importante en la mitigación y adaptación al cambio climático, mundialmente reconocido como solución climática natural (Wartman *et al.* 2025) y se identifica, que es primordial contar con estrategias cada vez más eficaces de restauración del ecosistema. En el contexto de esta guía se propone la revisión de al menos tres aspectos espaciales cruciales para la selección de áreas, para ejecutar acciones de restauración, previo a la asignación de recursos financieros:

- 1) Coberturas históricas de manglar y otros tipos de vegetación en el área a restaurar.
- 2) Dinámica hidrosedimentaria.
- 3) Conectividad entre ecosistemas marino costeros.

1.1 Coberturas históricas en el área a restaurar

El reconocimiento de las coberturas del suelo que históricamente han estado presentes en la zona a restaurar es un proceso fundamental para el éxito de las acciones de restauración, lo ideal sería que este reconocimiento lo realizaran tanto quienes ejecutarán el proyecto, así como por quienes lo financiarán, para verificar por ambas partes la conveniencia de la selección de las áreas.



Revisión de imágenes históricas - Google Earth

Una primera aproximación espacial del área a restaurar, que resulta relativamente sencilla, es la revisión visual de las áreas mediante el uso de la herramienta de “Imágenes históricas” de la plataforma de acceso libre Google Earth Pro³ (**FIGURA 1.1**). La herramienta permite desplegar imágenes para algunas zonas desde la década de 1980, aunque muchas presentan baja resolución para esos años, no obstante, a partir del año 2000 en la mayoría de los casos son de alta resolución.

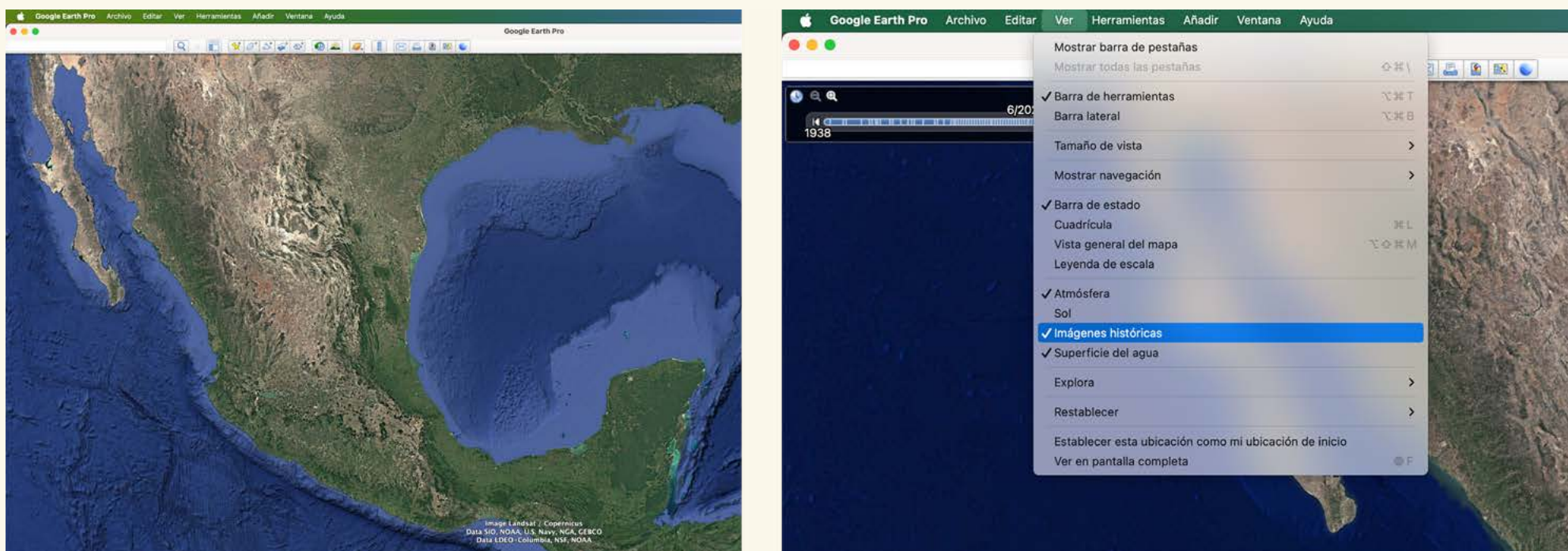


FIGURA 1.1

Acceso a la sección de “Imágenes históricas” en la plataforma Google Earth Pro, que permite tener un contexto histórico de la historia espacial general del área a restaurar.

La revisión en distintos periodos de tiempo en retrospectiva, permitirá identificar las áreas con presencia o ausencia de vegetación con características de manglar y su evolución

.....

³ <https://www.google.com/intl/es/earth/about/versions/#earth-pro>

durante el tiempo, así como de las coberturas adyacentes, en algunos casos incluso es posible detectar el probable origen de la afectación al manglar.

Como un apoyo para este proceso de revisión de las coberturas históricas, así como de otros elementos relevantes en las áreas a restaurar, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)⁴ generó visualizadores en la plataforma Leaflet que se alojarán en el sitio del “Observatorio de la Restauración de Manglares (ORM)”⁵ expresamente para el tema y que constituye el quinto componente del SMMM. Este sitio en línea pone a disposición del público los mapas generados como parte del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM)⁶ (1 al 6 de la siguiente lista), así como cartografía de otras instituciones (9 y 10) que pueden ser de utilidad para el propósito de selección de las áreas a restaurar; la información disponible sobre la cobertura de manglares abarca al menos los últimos 50 años.

Distribución de los manglares en México en 1970/1980:

- 1) Distribución de los manglares en México en 2005.
- 2) Distribución de los manglares en México en 2010.
- 3) Distribución de los manglares en México en 2015.

4 <https://www.gob.mx/conabio>

5 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/obsrestman>

6 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm>, en general la cartografía del SMMM tiene una escala de 1:50,000 y un área mínima cartografiable de una hectárea.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



- 4) Distribución de los manglares en México en 2020.
- 5) Distribución de manglar perturbado⁷ de México en 2020.
- 6) Tendencia del verdor en zonas de manglar en México durante el periodo 2020-2024.
- 7) Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica.
- 8) Sitios de estudio de manglar en México⁸, delimitados por el SMMM.
- 9) Áreas Naturales Protegidas Federales.
- 10) Sitios Ramsar.

La consulta de los mapas temáticos del observatorio es sencilla y permite, entre otras cosas:

- a. Verificar la presencia histórica de manglares en el área: Es importante para evitar la conversión de otras coberturas naturales del paisaje, que también juegan un papel relevante en distintos procesos ecológicos. Es relevante considerar el cambio “natural” de las coberturas bajo un contexto de cambio climático.
- b. Verificar la presencia de manglar perturbado: Los resultados plasmados en la cartografía del SMMM obedecen principalmente a la respuesta de los insumos satelitales utilizados, es posible que los grupos de trabajo locales cuenten con información adicional que permita reconocer características adicionales.

.....

- 7 Manglar perturbado: Incluye humedales conformados de parches de árboles o arbustos de manglar muerto o en regeneración. Esta categoría se refiere a la cubierta forestal perturbada por huracanes, tormentas, ciclones y por la construcción de infraestructura hidráulica, carreteras, caminos, entre otros.
- 8 Es un mapa base de posible utilidad para delimitar posibles patrones de procesos biológico-espaciales, en 160 sitios de características ambientales similares.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



En la etapa de diseño de los proyectos de restauración es indispensable considerar una etapa de selección y revisión de áreas, así como de las técnicas a utilizar de acuerdo con las características específicas del área a restaurar. La revisión previa de los sitios puede implicar el uso de recursos financieros adicionales, sin embargo, se trata de una inversión más que de un gasto.

- c. Conocer las tendencias de verdor del manglar: Se refiere a la revisión de información que permita de forma general la identificación del comportamiento de índices de vegetación que indiquen un deterioro del verdor de la vegetación en un periodo determinado.
- d. Saber si el área a restaurar está dentro de un sitio de protección: Si bien no es un factor decisivo para la determinación de las zonas a restaurar, la presencia de áreas de conservación da certidumbre, hasta cierto punto, del mantenimiento de las acciones a largo plazo.

El ORM estará en continua actualización con el propósito de que los usuarios cuenten con información vigente. Así mismo, es importante mencionar que la cartografía completa del SMMM, que actualmente cuenta con 260 mapas de diferentes temas (distribución y extensión, cambios, política pública, regionalización, sitios prioritarios, antropización y conectividad), se encuentra disponible en el geoportal de la Conabio⁹ en la sección de Biodiversidad/Monitoreo de manglares, que pueden ser de utilidad para el propósito de selección de áreas de manglar a restaurar.

Por otra parte, aunado a la revisión espacial y en caso de no haber evidencias de tocones de manglares u otro rasgo específico del ecosistema de manglar en campo, podrían realizarse estudios complementarios como análisis de suelo y palinológicos para constatar la presencia de manglares en el pasado en el área a restaurar, considerando la conveniencia de la selección del área en un contexto de cambio climático, como ya se mencionó.



Foto: J. Alberto Alcántara Maya

Para que la evaluación de los avances nacionales en materia de restauración del ecosistema sean precisos, es importante que en los proyectos de restauración de manglares se especifique, por una parte, la superficie de manglar que se espera recuperar y, por otra, la superficie que será intervenida con las acciones de restauración.

.....

⁹ <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

La revisión y verificación previa de las áreas a restaurar conducirá a una mayor eficiencia tanto en las acciones de restauración, así como en el uso de los recursos financieros, se tendrán más elementos para determinar la pertinencia de restaurar un área u otra.

Cartografía histórica

El reconocimiento de las coberturas del suelo que históricamente han estado presentes en la zona a restaurar es un proceso fundamental para el éxito de las acciones de restauración.

Una opción para realizar esta actividad sería elaborar la cartografía necesaria con una escala detallada, siempre y cuando los insumos a utilizar lo permitan, por ejemplo 1:20 000. No obstante, generar estos insumos desde cero podría involucrar tiempo y recursos adicionales.

Como una alternativa para desarrollar la línea base, se puede recurrir al uso de cartografía ya disponible, para acelerar el proceso de definición de las áreas y comienzo de las acciones de restauración del ecosistema. Si bien existen diversas fuentes de cartografía con diferentes características como la escala, la periodicidad, las clases utilizadas, etc., se sugiere utilizar la cartografía del SMMM que tiene a su cargo la CONABIO y que ya cuenta con un nuevo componente enfocado a la restauración de manglares (**FIGURA 1.2**).

La cartografía del SMMM es una fuente de información generada de forma sistemática que permite conocer la historia de la vegetación y usos de suelo de un sitio a largo de periodos amplios de tiempo¹⁰. Hasta el momento el SMMM cuenta con cinco



El involucramiento de las comunidades locales en todas las etapas del proyecto, incluyendo en la de selección de áreas es fundamental para generar proyectos integrales con los mayores beneficios sociales y ambientales.

.....

¹⁰ <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/extensionDist>

mapas correspondientes a la década de 1970/1980, 2005, 2010, 2015 y 2020, la que corresponde a 2025 se encuentra en proceso. Esta cartografía no es solo de manglares, también ofrece información de las coberturas y usos de suelo aledañas a los manglares de todo el país (**FIGURA 1.3**).



En cualquier proyecto de restauración se debe considerar que el objetivo final es que las áreas intervenidas al paso del tiempo no deberían requerir intervención humana, o bien mínima, para realizar y mantener sus funciones y servicios ecosistémicos.

FIGURA 1.2
Componentes del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.

ID	Clase		Descripción
1	Desarrollo antrópico		Incluye poblados, estanques acuícolas, granjas camaroneras, salineras, caminos y carreteras, así como obras de infraestructura hidráulica que incluye canales.
2	Agrícola-Pecuaría		Incluye las tierras utilizadas para agricultura de temporal, de riego y los pastizales dedicados a la actividad pecuaria. Esta categoría corresponde a coberturas antrópicas destinadas a la producción de alimento, así como los monocultivos perennes arbolados propios de cada región, y otros agroecosistemas. Incluye áreas agrícolas en descanso.
3	Otra vegetación		Incluye la vegetación arbustiva y arbórea de selvas bajas perennifolias y subperennifolias inundables y selva mediana subperennifolia inundables, diferentes tipos de vegetación secundaria arbórea y arbustiva y la vegetación secundaria herbácea.
4	Sin vegetación		Incluye las áreas sin vegetación aparente y con erosión, dunas costeras de arena y playas.
5	Manglar		Incluye humedales arbustivos y arbóreos conformados por la asociación vegetal de una o más especies de mangle: mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>), mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>), mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>), mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>), <i>Rhizophora harrisonii</i> y <i>Avicennia bicolor</i> .
6	Manglar perturbado		Incluye humedales conformados por parches de árboles o arbustos de manglar muerto o en regeneración. Esta categoría se refiere a la cubierta forestal perturbada por huracanes, tormentas, ciclones y por la construcción de infraestructura hidráulica, carreteras, caminos, entre otros.
7	Otros humedales		Incluye la vegetación hidrofita de Popal-Tular-Carrizal, además de pastizales inundables, vegetación hidrófita o halófila con individuos de mangle dispersos o en pequeños islotes y los terrenos salinos costeros con poca cubierta vegetal.
8	Cuerpos de agua		Incluye océanos, bahías, esteros, lagunas, ríos, presas, cenotes, aguadas.

FIGURA 1.3

Descripción de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo de la cartografía del SMMM.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.

Con la cartografía del SMMM se puede revisar la historia espacial de los manglares y áreas aledañas en un periodo de al menos 50 años, en prácticamente todas sus zonas de distribución, lo que da oportunidad para verificar y confirmar la presencia de manglares en décadas pasadas en las áreas seleccionadas para restaurar (**FIGURA 1.4**).

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



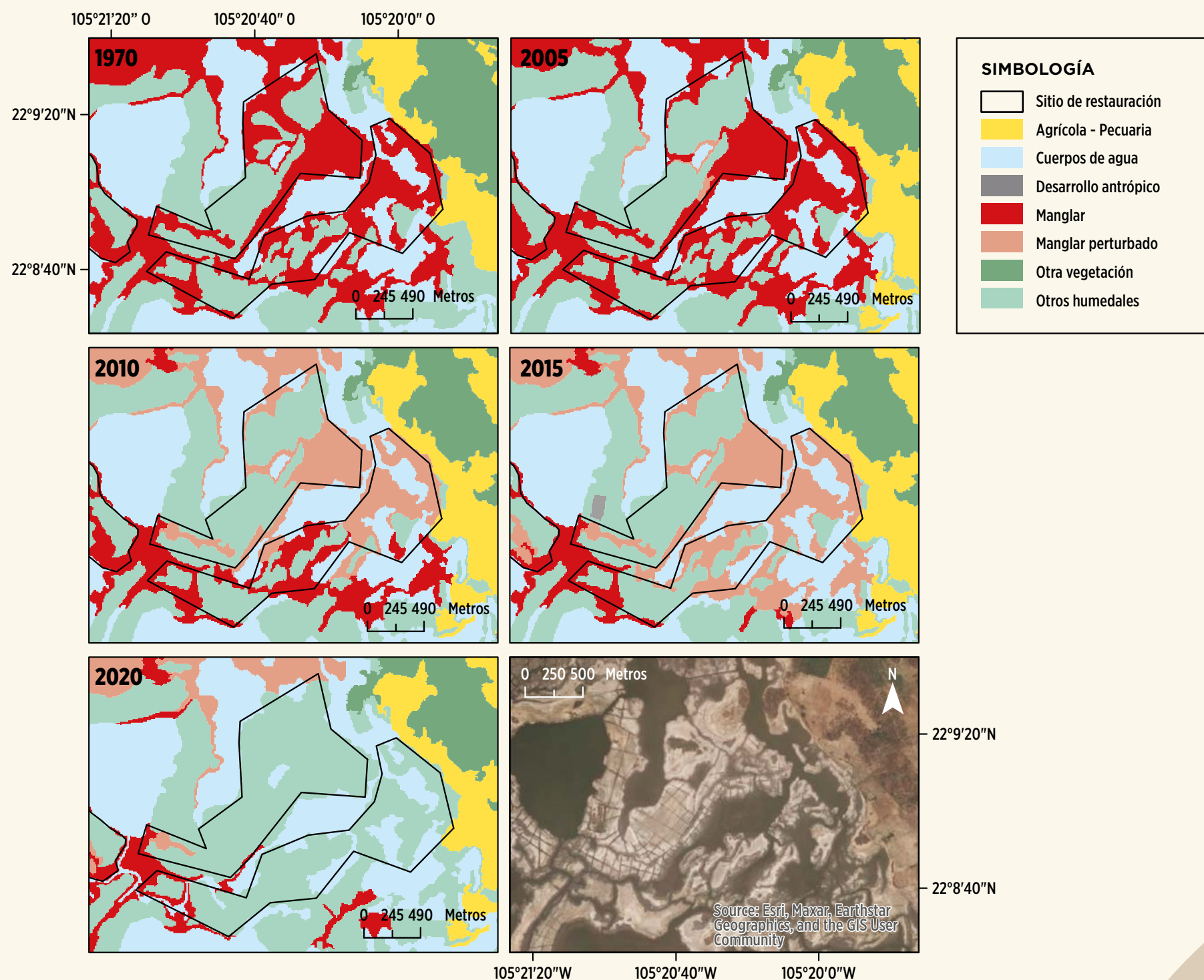


FIGURA 1.4

Tipos de cobertura y uso de suelo según el SMMM (1970/1980-2020) en un sitio de restauración de manglares. Al centro del polígono se observa pérdida de superficie de manglar, probablemente como resultado de condiciones ambientales de microtopografía e inundación, poco favorables para el establecimiento de plántulas de manglar.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM Y DE GOOGLE EARTH PRO.

La cartografía se encuentra disponible en el geoportal de la CONABIO, para aquellos usuarios que requieran incluirla en sus sistemas de información geográfica. También se encuentra en el Atlas Naturaleza y Sociedad, desarrollado por la CONABIO, en la sección Manglares¹¹. El usuario selecciona el estado de interés y el tema Dinámica de cambios en manglar (Dm). Al entrar se despliega el mapa de la distribución de los manglares, para el estado correspondiente, con la gama de colores de rojo a verde, donde el rojo indica pérdida de manglar y verde permanencia. La consulta se realiza a nivel de polígono y mediante una gráfica se proporcionan las coberturas de suelo a lo largo del tiempo (**FIGURA 1.5**).

FIGURA 1.5

Dinámica de cambios de un polígono (en el área del círculo amarillo), en la plataforma del Atlas de Naturaleza y Sociedad; es un área que en el mapa de 1970/1980 y 2005 se identificó como manglar, pero posteriormente en 2010 y 2015 por el grado de inundación se determinó como cuerpo de agua, en la cartografía más reciente (2020) esta área presentó características de manglar y así fue cartografiada.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM¹².



¹¹ <https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/manglar/>

¹² <https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/manglar/cambios/OAX/index.html>

El conocer la información espacial histórica de las áreas y proporcionarla en las propuestas de proyectos de restauración se vuelve indispensable y brinda a los revisores y financiadores datos relevantes para determinar de forma general las posibilidades del restablecimiento de áreas de manglar.

1.2 Dinámica hidrosedimentaria

Recientemente la generación de conocimiento en los aspectos de la dinámica hidrológica y de los sedimentos ha cobrado gran relevancia, ya que una comprensión aceptable de estos temas en las áreas a restaurar redundaría en mejores resultados de los proyectos. Los recursos económicos y humanos para la generación de este tipo de información deben considerarse una inversión más que un gasto, tanto en programas de restauración de manglares de financiamiento público como privado.

La consideración de estos temas desde la etapa de la selección del área a restaurar, es fundamental ya que están estrechamente relacionados con el hidroperiodo¹³, el cual es fundamental en la restauración del ecosistema. La inclusión de este tema en la guía se debe a que, si bien son mencionados en otros trabajos como los de Teutli *et al.* (2020 y 2021), no son abordados de manera detallada desde una perspectiva de datos de sensores remotos y otros datos históricos disponibles, de tal forma que destaquen la importancia de integrar esta información en los proyectos de restauración y conservación del ecosistema.



Una comprensión de la dinámica hidrológica y de los sedimentos en las áreas a restaurar redundaría en mejores resultados de los proyectos de restauración.

.....

13 El hidroperiodo o régimen hidrológico se refiere a la profundidad o nivel del agua y a la duración y frecuencia de la inundación.

Caracterización general del sitio de interés

Las técnicas para conocer la dinámica hidrosedimentaria de un área son diversas y de costo variable. Las hay desde bajo costo y de respuesta rápida que implican trabajo en gabinete con la información disponible, hasta las de mayor costo que implican trabajos en campo para desarrollar modelos de dinámica hídrica y de sedimentos.

En la actualidad se cuenta con programas de cómputo que son de acceso libre y permiten realizar un primer análisis rápido desde gabinete. Uno de estos programas es *Google Earth Pro* (indicado en el apartado anterior), que mediante su herramienta “Imágenes históricas” permite visualizar de forma general cómo se ha comportado la dinámica hídrica y en ocasiones también de los sedimentos a lo largo del tiempo.

No obstante, los resultados preliminares mediante la visualización con esta herramienta deben ser verificados con otras técnicas, ya que mediante este proceso de revisión se pueden determinar como factibles para restaurar áreas que realmente no lo son, o bien el éxito de la restauración puede ser muy bajo o prácticamente nulo (**FIGURA 1.6**).

Por otra parte, de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se pueden descargar cartas topográficas a diferentes escalas¹⁴. En la sección de escala 1:50,000 es posible obtener algunas capas muy útiles para los primeros análisis de la selección del área a restaurar, como curvas de nivel, bordos, diques, caminos y obras hidráulicas.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



.....

14 <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>

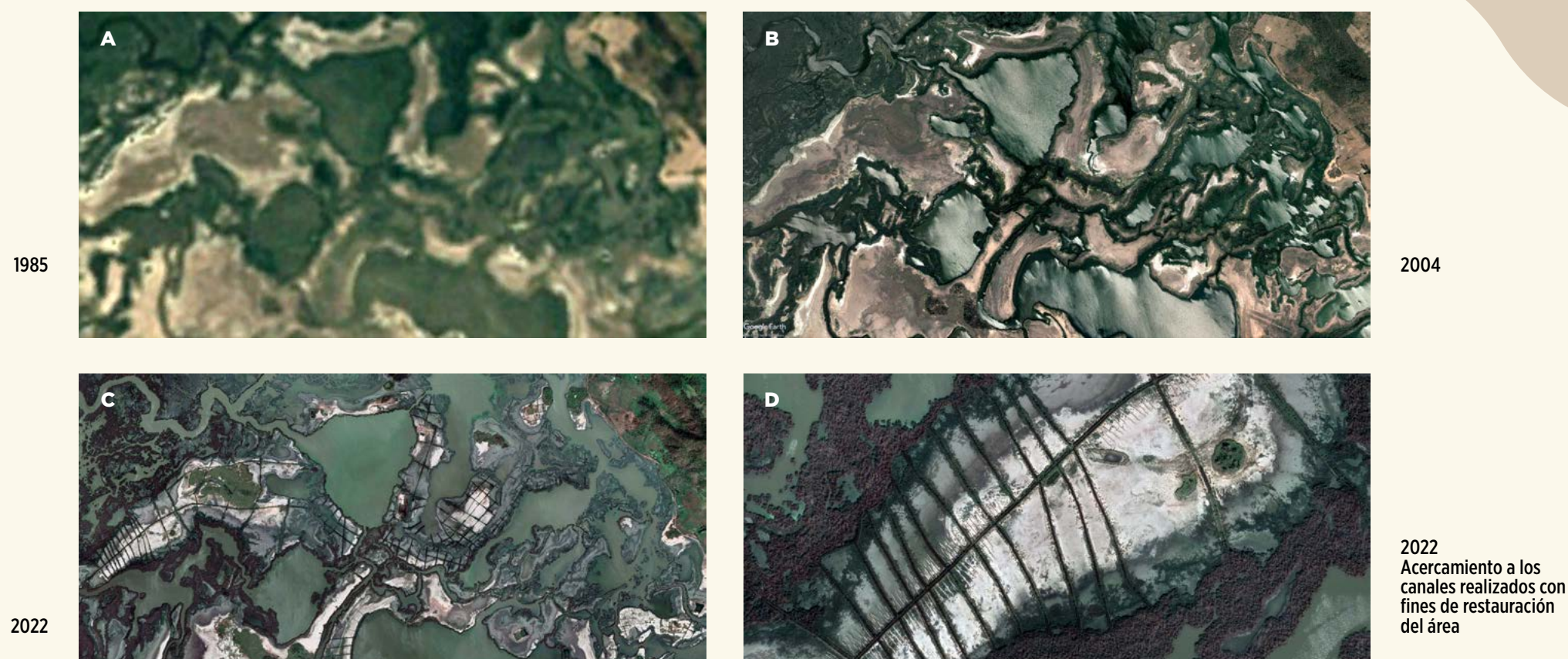


FIGURA 1.6

Análisis visual de un sitio en restauración con la herramienta “Imágenes históricas” de *Google Earth Pro*. A) En 1985 se observa en baja resolución la dominancia de una zona de humedales intermitentes, efímeros y perennes. B) En 2004 los cuerpos de agua se mantienen, pero se evidencian pequeñas zonas con vegetación, probablemente mangles, pero únicamente en los márgenes de los canales secundarios. C y D) En 2022 estos cuerpos de agua se mantienen, pero presentan una intervención de canalización. En este caso, con el uso de esta herramienta se sabe que desde hace más de 35 años en las zonas donde se realizaron los canales no había manglar sino cuerpos de agua que desempeñan una función primordial en el ecosistema. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE GOOGLE EARTH PRO.**

El INEGI también ofrece una herramienta muy interesante que es el Simulador de flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL)¹⁵, que apoya en la detección de las características hidrográficas del área. En este simulador se puede descargar la

.....

¹⁵ https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

cobertura hidrográfica y junto con *Google Earth* permite tener una mejor comprensión de las características hidrográficas y de su posible comportamiento en las áreas a restaurar (**FIGURA 1.7**).

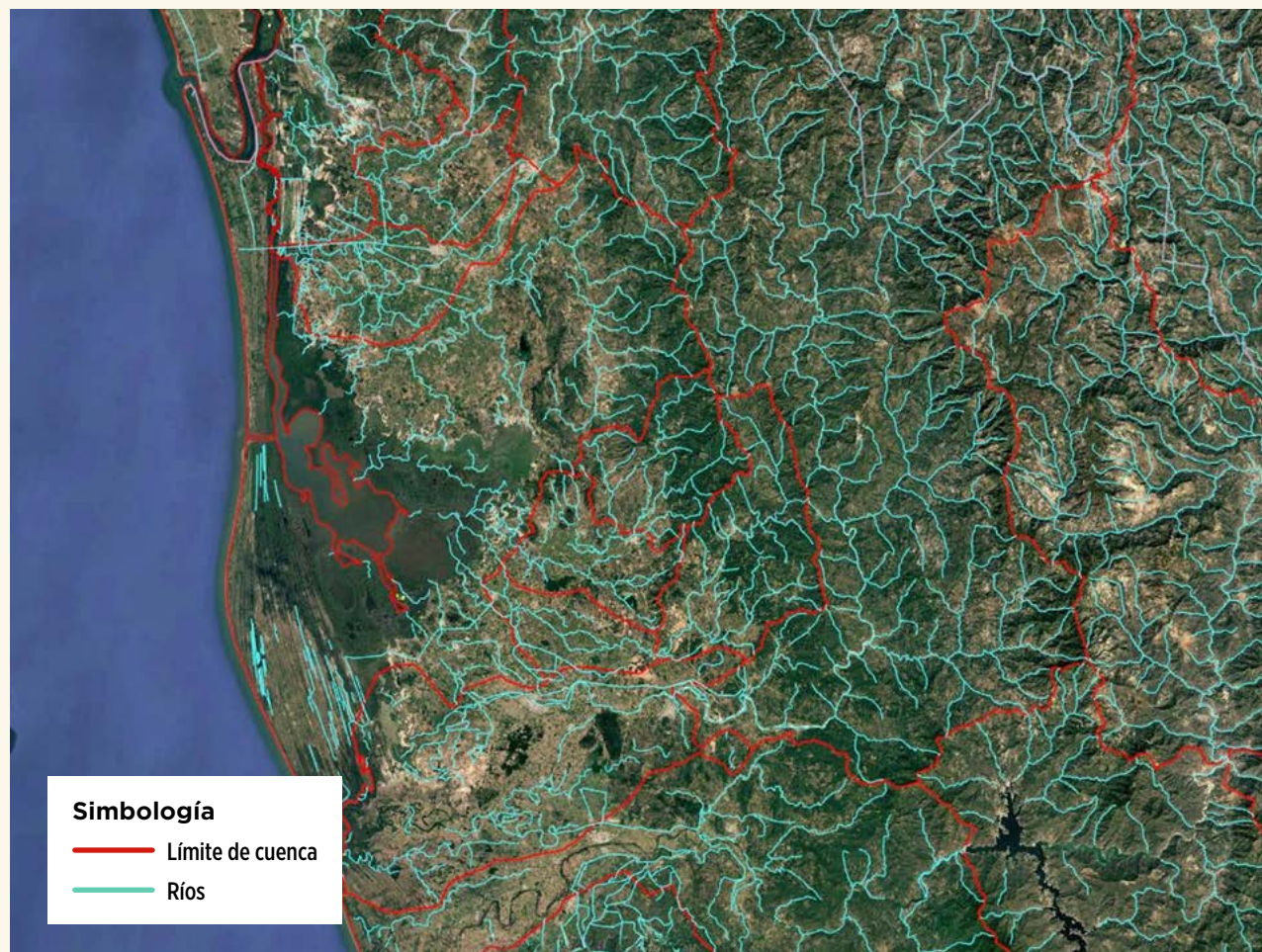


FIGURA 1.7

Productos cartográficos de hidrografía del SIATL visualizados en Google Earth.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SIATL Y GOOGLE EARTH PRO.

El estado de conservación o perturbación de la hidrografía es un buen indicador del estado de salud de los manglares.

Estas herramientas permiten hacer análisis desde gabinete que apoya en la selección de las áreas a restaurar, pero también son de gran utilidad para construir o mejorar la logística de los primeros recorridos de campo, para visitar sitios puntuales como bordos, desviaciones de cauces, extracciones en los cauces, compuertas, caminos de acceso, por lo que también sirven para realizar estimaciones de los recursos económicos

para traslados, haciendo más eficiente el uso de los recursos financieros disponibles para la restauración.

Precipitación y temperatura

Como parte de la revisión de información, se recomienda hacer un análisis de la precipitación que ocurre en el sitio durante el año, esto permitirá observar cómo afecta la precipitación, la humedad y los niveles de agua en las zonas donde se llevan a cabo las intervenciones. La permanencia de la humedad en el suelo juega un papel decisivo en las actividades de recuperación hidrológica y en la sobrevivencia de las plántulas que se establezcan, ya sea de forma natural o por acciones de reforestación.

Un factor que puede determinar el éxito o no de las acciones de restauración, es el conocimiento del comportamiento de la precipitación pluvial y la temperatura en las áreas a restaurar y en la cuenca de aportación al área, sin perder de vista que el agua subterránea en muchos sitios juega un papel importante en este ecosistema. La revisión de estos dos factores se puede realizar en gabinete buscando las estaciones que contengan los registros de estas variables, como las estaciones climatológicas (**FIGURA 1.8**), hidroclimatológicas, meteorológicas y automáticas, como las Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESMA) y las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La información se puede descargar de las páginas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)^{16 17}, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y del Instituto Nacional de Investigaciones

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



16 <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>

17 <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)¹⁸, también se puede recopilar información de estaciones de la iniciativa privada.

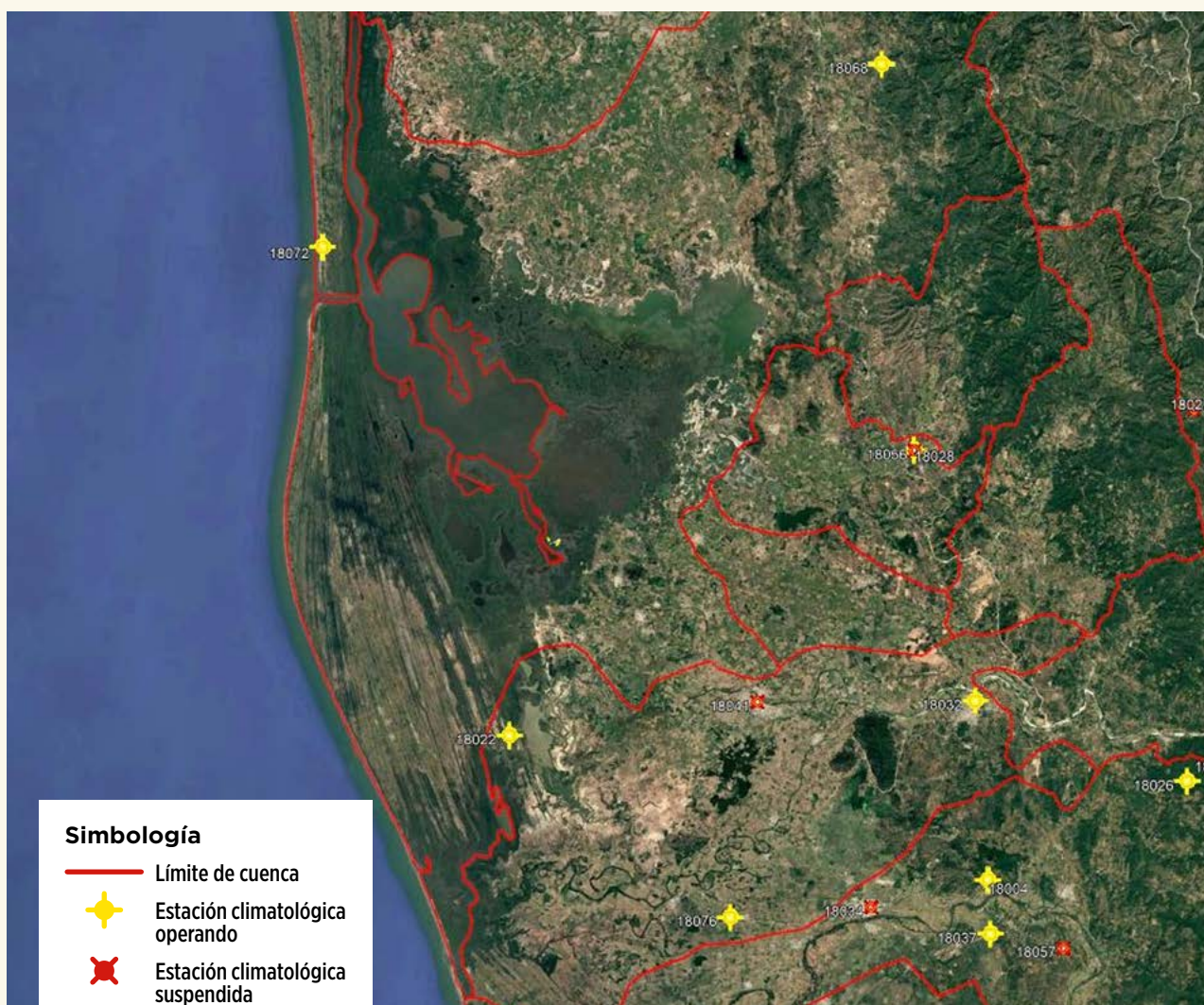


FIGURA 1.8

Estaciones climatológicas del SMN (en operación y suspendidas), visualizadas en *Google Earth Pro*. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMN Y GOOGLE EARTH PRO.

Para seleccionar las áreas a restaurar la información relevante para analizar es la precipitación pluvial media (**FIGURA 1.9**) y la temperatura media, así como las máximas y mínimas (anuales y mensuales). La información permitirá reconocer si los

.....

18 <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones/Mapa>



Foto: J. Alberto Alcántara Maya

patrones de precipitación pluvial y de temperaturas se mantienen o presentan algún cambio o tendencia, planificar con mayor precisión las acciones de restauración en el área (por ejemplo, las posibilidades de supervivencia de las plántulas), reconocer el patrón general interanual e intraanual de estos aspectos, así como la respuesta ante los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Una variable importante es el hidropериодо (o régimen hidrológico) del área, que se refiere a la profundidad o nivel del agua y a la duración y frecuencia de la inundación. Para conocer el comportamiento de esta variable se deben realizar otras mediciones que lo definirán con mayor precisión, como la instalación de sensores de monitoreo continuo de la presión y nivel de inundación, sin embargo, esto aumenta los costos.

El análisis de las lluvias y temperaturas en la o las cuencas de aportación de agua dulce en los ecosistemas de manglares, son indispensables para entender el hidropериодо.

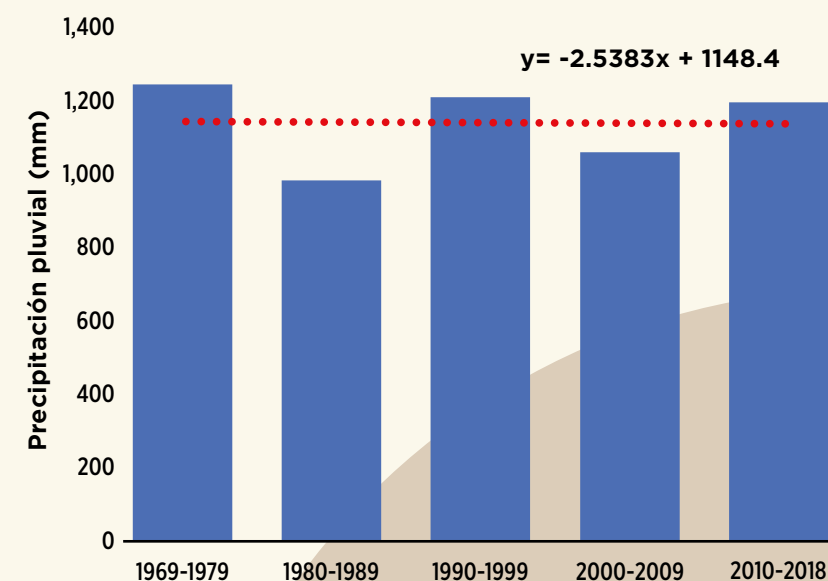
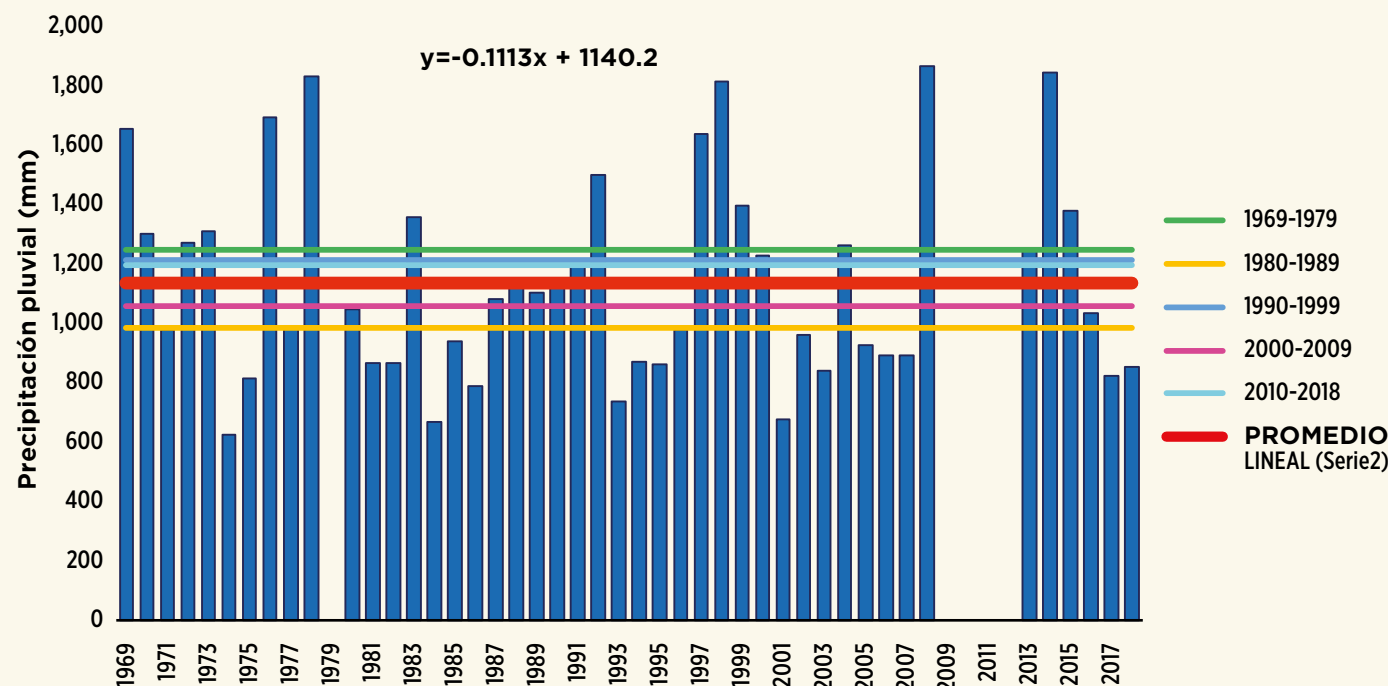


FIGURA 1.9

Precipitación pluvial media anual y precipitación media por décadas. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF Y CONAGUA 2023.

Toda esta información ayudará a identificar los aportes de agua dulce por precipitación pluvial a las áreas con procesos de restauración e identificar cambios y tendencias. Este conocimiento previo a las intervenciones, aunado a la identificación de los puntos de aportación de agua dulce por ríos, ayudará a mejorar la selección de las áreas a restaurar.

Régimen hidrológico

Si en la zona que se propone restaurar existe una estación hidrométrica que afore los escurrimientos que tienen influencia a la misma, se pueden analizar los registros históricos con la finalidad de conocer los caudales mínimos, medios y máximos diarios, mensuales y anuales, así como el régimen de los escurrimientos intraanual e interanual, con esta información se reconocerá si el régimen hidrológico de los escurrimientos está alterado o no.

Con el análisis de los registros se puede conocer el comportamiento de los escurrimientos y su relación con la precipitación pluvial, a su vez estos datos permitirán reconocer qué tan importante o no es el agua subterránea en el sitio a restaurar (**FIGURA 1.10**).

Un aporte más de analizar los registros hidrométricos es conocer si hay alguna tendencia en los escurrimientos. Para saber si el origen de la tendencia es natural o por intervención del hombre, se necesita analizar el comportamiento de la precipitación pluvial, el uso de suelo en la cuenca, las exportaciones y las importaciones, así como la presencia de obras hidráulicas.

Es evidente que este tipo de análisis no se puede aplicar en todo México, tal es el caso de la Península de Yucatán y en gran medida en la Península de Baja California, en donde se

Foto: María Teresa Rodríguez Zúñiga



requiere analizar la parte de agua subterránea que se explica en el apartado siguiente.

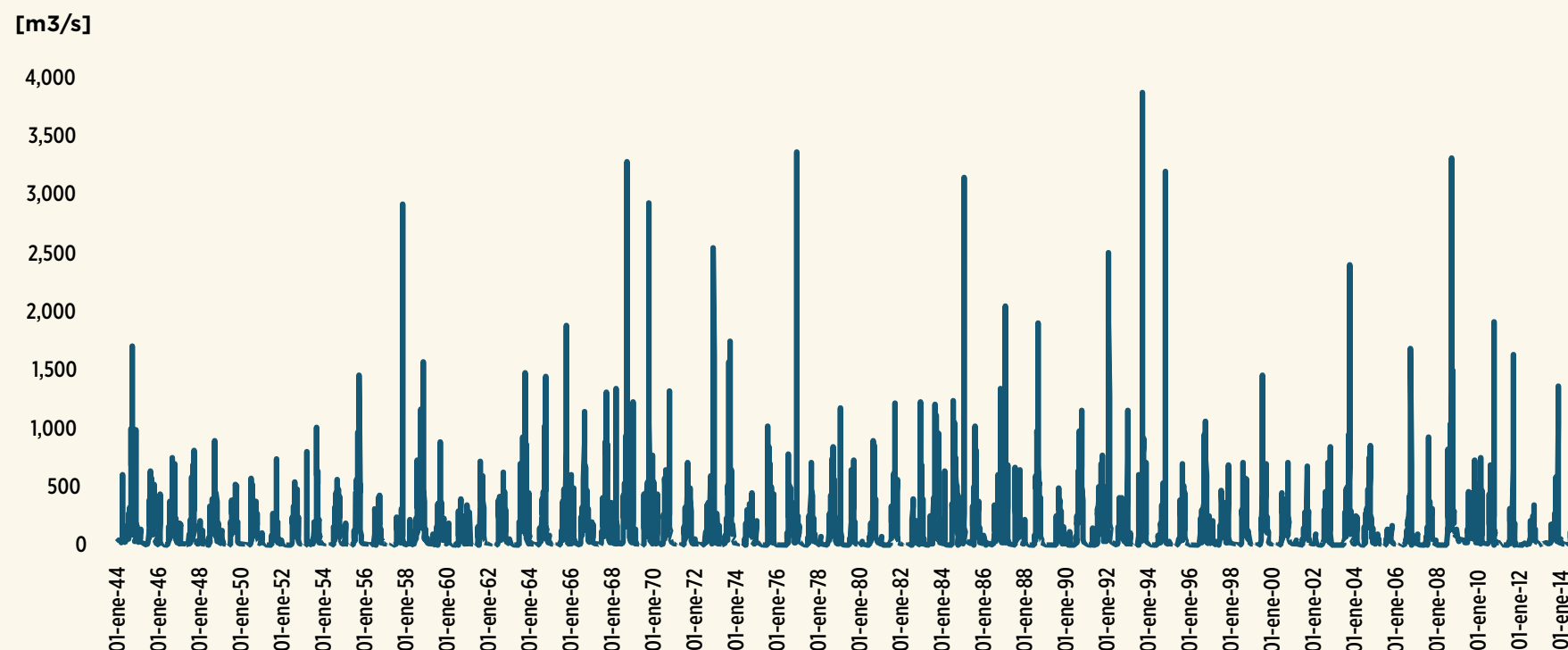


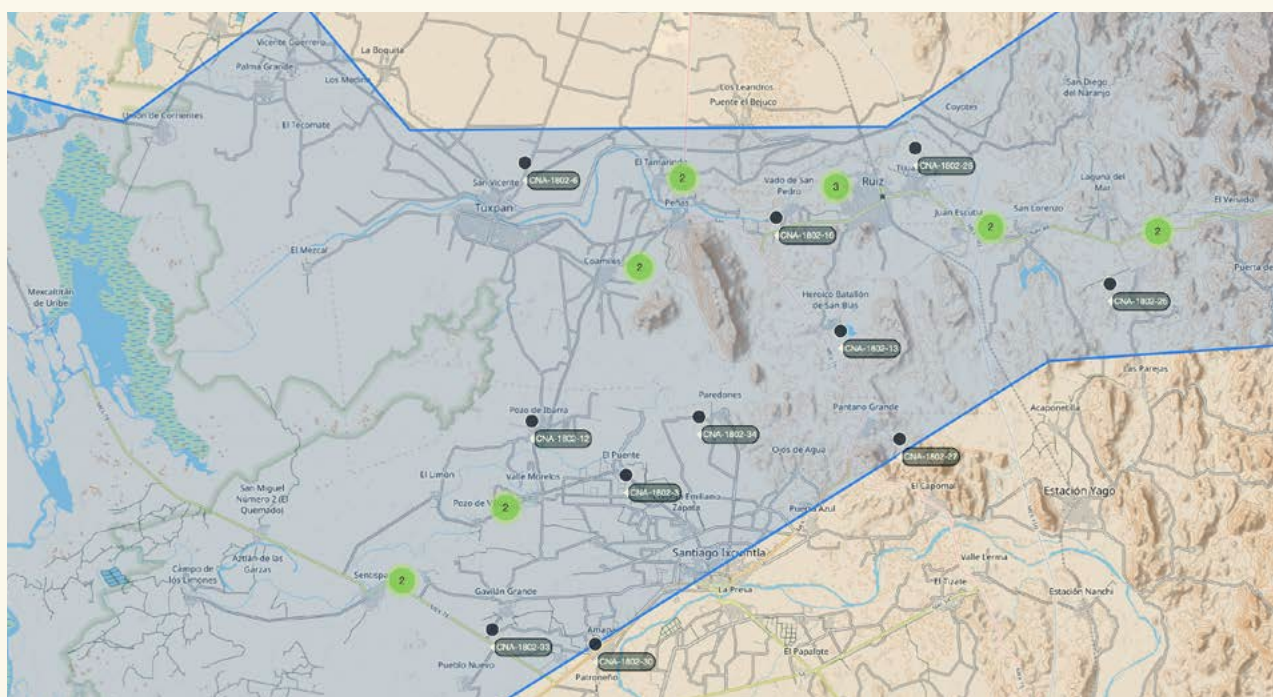
FIGURA 1.10

Inicialmente, se puede analizar el régimen hidrológico, identificando años secos, medios y húmedos, lo cual tiene mucha relación con el hidropериодо. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE CONAGUA.**

Niveles de agua subterránea

Un factor fundamental para la conservación y restauración de áreas de manglar son las aportaciones de agua dulce o salobre provenientes de las fuentes de aguas subterráneas, éstas pueden provenir de afloramientos de agua subterránea como son los manantiales u ojos de agua y son parte fundamental en el caudal base en los ríos o arroyos. Por ejemplo, en zonas como la Península de Yucatán, donde las fuentes de agua dulce provienen aproximadamente en un 95% de las aguas subterráneas.

Para tener una primera aproximación, que se puede hacer desde gabinete, es consultar en la página de CONAGUA la red piezométrica¹⁹ (**FIGURA 1.11**). la red piezométrica se compone de pozos o norias²⁰ que son utilizadas para monitorear las profundidades o elevaciones del agua subterránea cercana al área de restauración. Con esta información será posible tener una aproximación de la profundidad o la elevación del nivel estático de las aguas subterráneas y si existen los datos, se puede analizar su comportamiento y posiblemente dependiendo de los datos se pueda ir conociendo su relación con el hidroperiodo en el área.



El análisis de las aguas subterráneas apoya en la selección de las áreas a restaurar. Además, es de gran utilidad para construir y mejorar la logística de los recorridos de campo.

FIGURA 1.11

Visualización del GeoVisor de la red piezométrica (pozos y norias), en el acuífero de San Pedro-Tuxpan, Nayarit, 2023. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE CONAGUA.**

¹⁹ https://sigagis.conagua.gob.mx/Gas1/sections/RedesMonitoreo_Piezometrico.html

²⁰ Una noria es un tipo de pozo de agua superficial, excavado a mano, que se utiliza para extraer agua subterránea a poca profundidad. Se diferencia de un pozo profundo, que puede llegar a aguas subterráneas más profundas, a menudo con la ayuda de maquinaria pesada.

Si en las inmediaciones a la posible área de restauración no existen pozos de la red piezométrica, se requiere realizar recorridos de campo para establecer esta red (**FIGURA 1.12**) lo que permitirá conocer el comportamiento y su importancia de las aguas subterráneas en el ecosistema.

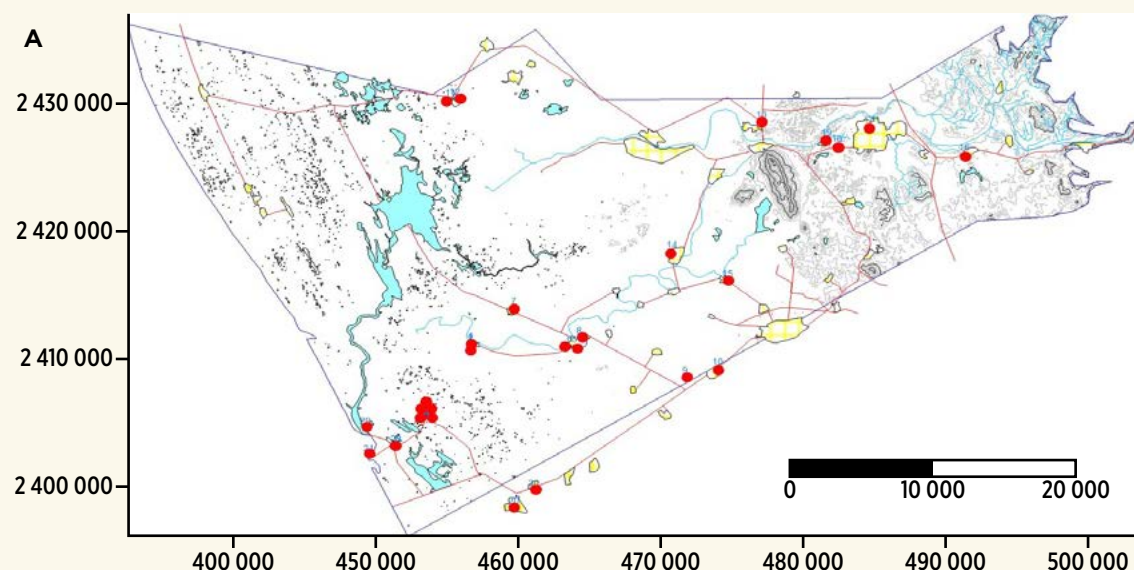


Foto: Marco Antonio Jacobo Villa

FIGURA 1.12

Establecimiento de red piezométrica A) Indica la red piezométrica que se estableció (puntos rojos) y B En cada punto que conforma la red piezométrica se realiza la medición del espejo de agua en el pozo. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF MÉXICO.**

Los flujos de agua subterránea, son fundamentales en la salud de los ecosistemas, es la cantidad de agua dulce que mantiene la calidad de agua vital para las diferentes especies de manglares.

Modelos hidráulicos

Finalmente, en torno al conocimiento de la dinámica hidrosedimentaria de las áreas a restaurar, los modelos hidráulicos permiten conocer el comportamiento del agua sobre el terreno (dentro y fuera del cauce), para diferentes caudales o escenarios. Estos análisis, aunque más precisos, requieren de mayores recursos financieros, tiempo y personal especializado. Son muy útiles en los casos que se requieran rehabilitar o abrir canales para restablecer o mejorar la dinámica hidrosedimentaria en el área a restaurar.

Para la generación de información para integrar al modelo, es necesario realizar algunos recorridos de campo que permitan conocer el sitio y el área a simular por el especialista que realizará la modelación; esto dependerá de los recursos con que se cuenten y de la simpleza o complejidad que tenga la zona a simular.

No obstante, también es posible realizar esta aproximación, con técnicas de bajo costo, por ejemplo, con el apoyo de las cartas topográficas de INEGI del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)²¹ o LiDAR²² (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) y hacer los modelos en programas de acceso libre como QGIS²³ y GRASS²⁴ (**FIGURA 1.13**).

Si se cuenta con mayores recursos financieros, se pueden hacer levantamientos topográficos ya sea con estación total, nivel fijo o con dron, lo que mejorará la representación del terreno, optimizando los resultados del modelo (**FIGURA 1.14**).

Existen diversos programas que pueden simular la parte hidrológica, hidráulica²⁵, subterránea y mareal, pero estos requieren comprar una licencia lo que aumenta los costos de manera significativa, entre los más económicos pero con un buen

21 <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

22 <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/> (se sugiere buscar como tema “relieve”)

23 <https://qgis.org/download/>

24 <https://grass.osgeo.org/download/>

25 La diferencia entre la parte hidrológica y la hidráulica es que la hidrología se centra en el estudio del ciclo hidrológico, incluyendo la distribución, cantidad y propiedades del agua en la Tierra. La hidráulica fluvial o de ríos, por otro lado, se enfoca en el comportamiento del agua dentro de los ríos y cauces, estudiando su flujo, transporte de sedimentos y efectos de las intervenciones humanas.



Foto: J. Alberto Alcántara Maya

desempeño se encuentran HEC-HMS²⁶, SWAT²⁷, HEC-RAS²⁸, IBER²⁹, aunque también existe una versión gratuita de Modflow³⁰. La desventaja de estos programas es que requieren ser alimentados con datos que muchas veces son difíciles de conseguir o se requieren múltiples mediciones en campo.

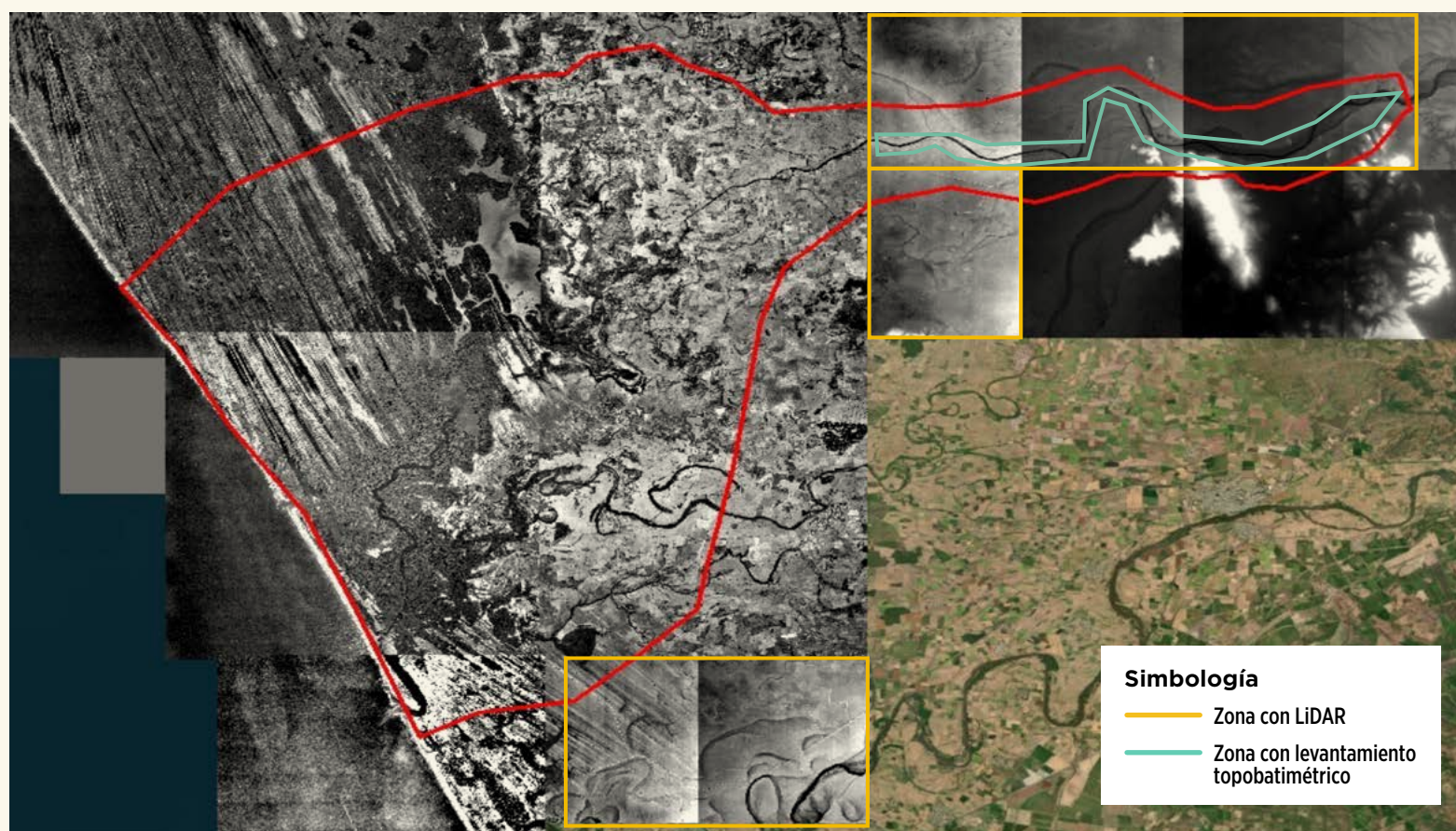


FIGURA 1.13

Se muestra una zona con cobertura del CEM y otra zona con cobertura con LiDAR, siendo la base para el modelo hidráulico de bajo costo. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL INEGI.**

26 <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>

27 <https://swat.tamu.edu/software/swat/>

28 <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>

29 <https://iberaula.es/space/54/downloads>

30 <https://www.waterloohydrogeologic.com/versions-of-modflow/>

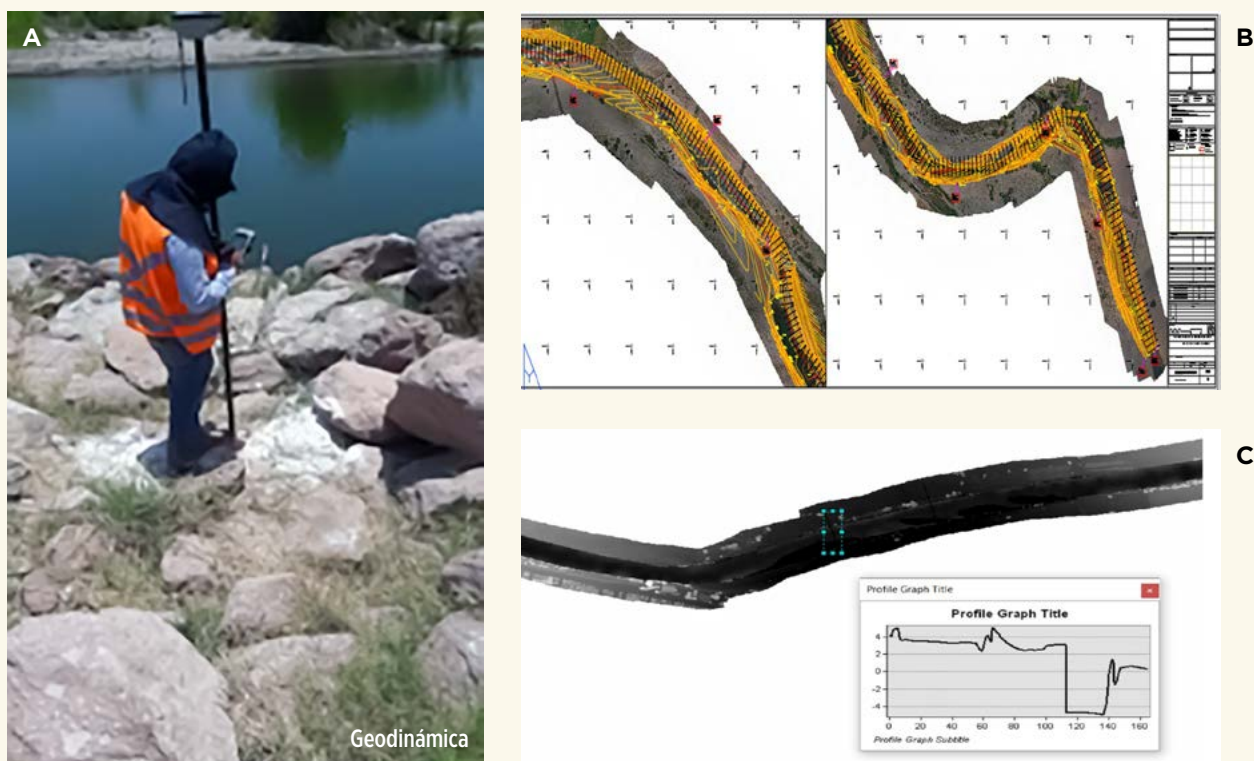


FIGURA 1.14

Levantamiento topobatimétrico del río San Pedro, A) puntos de control geoposicionados a banco de nivel de INEGI, B) Modelo digital de elevaciones resultante del levantamiento y C) secciones resultantes del modelo digital de elevaciones. **FUENTE: WWF MÉXICO.**

Los levantamientos topobatimétricos son la base para la modelación hidráulica. Además son útiles para otros productos como Atlas de riesgos, Planes de ordenamientos ecológicos y territoriales, caudales ecológicos, diseño y revisión de obras hidráulicas entre otros.



2. Monitoreo espacial

En el contexto mundial de una continua y acelerada degradación ambiental, la restauración ecológica se ha convertido en una tarea primordial y urgente. En el marco de las acciones de restauración de ecosistemas, recientemente las herramientas de análisis espacial se han identificado como un importante aliado, sin embargo, aún existen proyectos que se formulan e implementan sin tomar en cuenta estas herramientas.

La tecnología de teledetección, como herramienta avanzada de monitoreo y análisis, desempeña un papel clave en el monitoreo de las acciones de restauración (Isaacs *et al.* 2017 y Wang *et al.* 2024). El uso de estas tecnologías es relevante en el sentido de ofrecer un panorama espacialmente explícito para identificar las zonas de repoblamiento derivadas de las acciones de restauración y, en caso necesario, realizar ajustes en los métodos para alcanzar las metas esperadas.

Todo proyecto de restauración de ecosistemas debería incluir un programa de monitoreo de los distintos componentes que se espera sean beneficiados con las acciones implementadas, que permita evaluar el grado de avance. Se sugiere que en proyectos de restauración ecológica este monitoreo sea de al menos cinco años (Teutli *et al.*, 2020).

En esta guía se propone que, adicionalmente al monitoreo de variables específicas (hidrológicas, estructurales, fisicoquímicas, entre otras) se realice un monitoreo espacialmente

Foto: Samuel Velázquez Salazar



explícito del área en restauración, mediante el uso de técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica, que integrados al análisis multivariado facilitan la toma de decisiones en restauración, al proveer un panorama más amplio del escenario de trabajo (Aguilar & Isaacs 2014).

Actualmente existen esfuerzos por integrar acciones de monitoreo dentro de las actividades cotidianas de los proyectos de restauración. Un trabajo reciente de revisión y síntesis de la aplicación de la tecnología de teledetección en el monitoreo de la restauración ecológica, basándose en un análisis exhaustivo de la literatura es el realizado por Wang y colaboradores (2024), en el cual se resumen los principales sensores y sus productos relacionados, además de proponer una serie de indicadores de evaluación de la restauración ecológica, así como los métodos correspondientes.

2.1 Ámbitos de la restauración y necesidades del monitoreo espacial

En este punto se considera conveniente retomar los resultados del Simposio de análisis espacial y su importancia para la restauración llevado a cabo en el IV Congreso Iberoamericano y del Caribe de Restauración Ecológica (2015), en el cual se identificaron cuatro temáticas de relevancia relacionadas con la restauración de ecosistemas a partir de una perspectiva espacial (Isaacs *et al.* 2017):

- 1) Identificación de áreas con potencial para restauración a escala del paisaje



- 2) Análisis espacial como estrategia para priorización de áreas de restauración
- 3) Diseño y manejo del paisaje a través de la restauración
- 4) Alternativas de restauración desde la mirada del análisis espacial

Para facilitar el alcance de las metas de restauración tanto mundiales como nacionales, es evidente la necesidad apremiante de ampliar la visión de la restauración hacia una mirada desde el paisaje, analizando los patrones espaciales y la variación de éstos en el tiempo, en cuanto a su composición y configuración. En este sentido Metzger y Brancalion (2013), reconocen los siguientes ámbitos de la restauración:

Restauración a gran escala: No siempre se centra en mosaicos complejos o heterogéneos, puede solo centrarse en mejorar o restablecer una sola cobertura desde lo local y aplicarlo a una gran extensión, pero no tiene en cuenta su estructura y función.

Restauración del paisaje: Aquellas iniciativas que se centran en restaurar la estructura, dinámica o función, entendiendo el paisaje como un mosaico de unidades interactivas, de múltiples usos y coberturas, incluyendo diversos procesos ecológicos (efecto de borde, fragmentación, incremento de la conectividad y de la vegetación nativa, matriz más permeable).

Restauración con una perspectiva de la ecología del paisaje: Incluye tanto la búsqueda para mejorar la estructura y las funciones del paisaje, así como las acciones puntuales de restauración que consideran la influencia del paisaje circundante.

Aguilar e Isaacs (2014) consideran que el análisis espacial proporciona una visión más completa de las condiciones de la



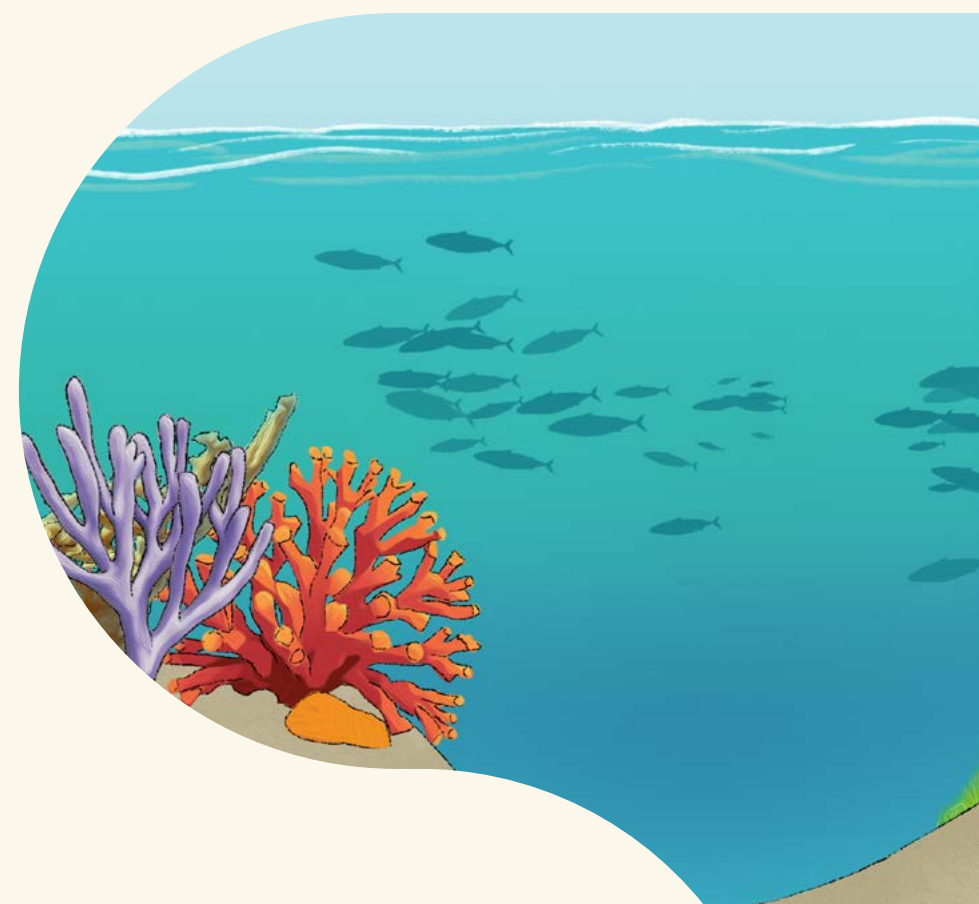
Foto: J. Alberto Alcántara Maya

línea base y a lo largo del tiempo en un área específica y permite tomar decisiones a diferentes escalas. Sin embargo, la integración entre los diferentes enfoques y escalas en el espacio continúa siendo un importante desafío que requiere de una alta velocidad de aprendizaje colaborativo. Estos mismos autores reconocen la necesidad de contar con una plataforma interactiva en línea, que promueva la integración de la ciencia y la práctica de la restauración e indican que la plataforma, entre otras cosas, debería incluir:

- 1) La presentación de una visión general de la ecología de la restauración
- 2) Mapeo del trabajo teórico relevante para la restauración ecológica
- 3) Mostrar enlaces directos a publicaciones relevantes
- 4) Proporcionar resúmenes de la evidencia empírica de las acciones de restauración.

El SNIRA que desarrolla y coordina la CONABIO ya aborda de cierta forma algunos de los puntos enlistados arriba. La aportación de esta guía es el desarrollo de dos plataformas que pretenden integrar información espacial que apoyarán en el monitoreo espacial de las áreas en restauración. Con este esfuerzo, se buscan establecer nuevos enfoques para plantear, organizar, monitorear y evaluar proyectos de restauración del ecosistema de manglar.

Todos los aspectos antes mencionados son indispensables de incorporar en el corto plazo en los proyectos de restauración, en este capítulo se proponen algunas formas para el monitoreo espacial de las acciones de los proyectos de restauración de manglares, en su mayoría derivadas del uso de la teledetección o percepción remota. Si bien, el análisis espacial puede llegar a tener algunas limitaciones de acuerdo con los insumos



Se pueden usar imágenes satelitales gratuitas para monitorear el estado de las áreas a restaurar a medida que se desarrollan las actividades planeadas, para reconocer la evolución de las coberturas vegetales y usos de suelo.

y calidad de los datos que se determinen usar, hoy en día el acceso a plataformas gratuitas como *Google Earth Engine*³¹ abre un amplio abanico de disponibilidad de imágenes así como de análisis.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya

2.2 Preparación de la información satelital

Como punto inicial para el monitoreo espacial de las áreas con procesos de restauración es elegir el insumo de percepción remota a utilizar; entre estos pueden ser imágenes de satélite, fotografías áreas de dron o de avioneta y en algunos casos escaneos de LiDAR o fotografía terrestre. La disponibilidad actual de imágenes y productos satelitales es mucho más amplia que hasta hace algunos años, lo cual brinda la oportunidad de realizar un seguimiento más preciso de las acciones de restauración, sin tener que destinar cantidades importantes de recursos financieros para lograrlo. Algunas de las plataformas más comunes para visualización, manejo y descarga de información satelital son:

- 1) Copernicus Browser³²
- 2) NASA Worldview³³
- 3) EarthExplorer³⁴

31 <https://earthengine.google.com/>

32 <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

33 <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

34 <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Obtención de insumos satelitales y preprocesamiento

Aunque la disponibilidad actual de imágenes es amplia, para efectos de monitoreo de áreas de restauración se recomienda utilizar imágenes con al menos 10 m de resolución espacial, que considerando lo que recomienda Chuvieco (2002), al tener al menos cuatro píxeles contiguos será posible identificar³⁵, no solo detectar³⁶, objetos en el terreno. Entre estos objetos pueden estar canales y sitios de siembra o repoblamiento de plántulas de manglar, entre otros. Un ejemplo de estas imágenes de satélite son las denominadas Sentinel-2 provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) que tienen píxeles de 10 metros, por lo que representan una buena opción para el monitoreo espacial de las áreas de restauración.

Otra característica de las imágenes de satélite que permite el monitoreo de áreas con procesos de restauración, es el tipo y número de bandas espectrales (registradas en el infrarrojo) que contiene la imagen, esto permite observar características que el ojo humano a simple vista no puede registrar. Usando la información que está contenida en las bandas de la imagen de satélite se puede explorar y analizar cómo distintos espectros de la luz interactúan con la vegetación, el agua y con los distintos elementos del paisaje. Es deseable contar con las bandas del rojo, verde, azul, rojo de borde, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, del espectro electromagnético (**FIGURA 2.1**) estos elementos permitirán observar, desde otra perspectiva, el comportamiento de la vegetación y la humedad a lo largo del tiempo.

.....

35 La identificación hace referencia al reconocimiento de las características de un determinado objeto, que permite caracterizarlo en sus formas y superficies reales.

36 La detección solo implica determinar la existencia de un objeto.



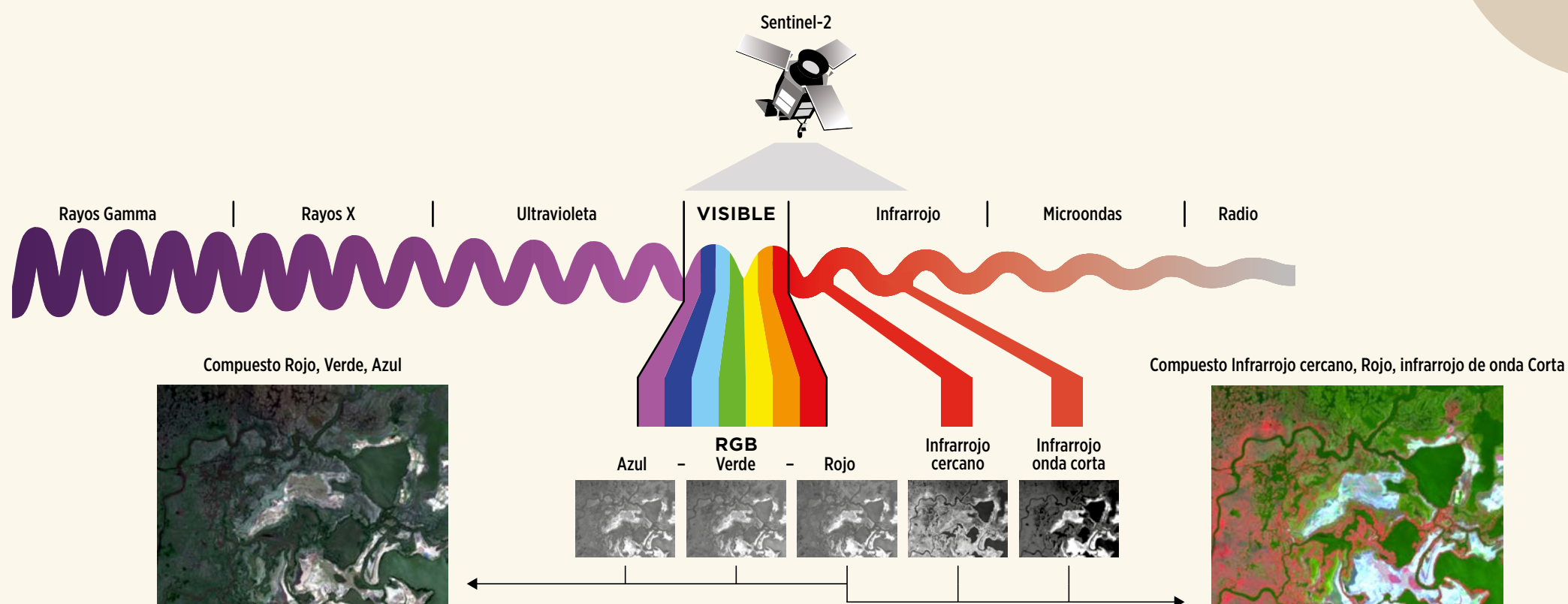


FIGURA 2.1

Muestra las longitudes de onda del espectro electromagnético relacionadas con las bandas de las imágenes Sentinel-2. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.**

Para mayor información en el procesamiento de las imágenes de satélite y su uso en el mapeo de los manglares se pueden consultar las siguientes fuentes: *Manglares de México: actualización y exploración de los datos del Sistema de monitoreo 1970/1980-2015*, *Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020* y del libro *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: Un enfoque espacial multiescala* (Capítulo 7: Manejo de información espacial para el estudio de los manglares), disponibles en línea en la página del SMMM en el apartado de material de apoyo³⁷.

37 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/material-de-apoyo>

Identificación de las temporadas climáticas

Para aumentar el éxito de un proyecto de restauración, es importante identificar las temporadas climáticas presentes en la zona y los periodos en que ocurren y con base en ello se determinen las mejores temporadas para realizar las diferentes actividades. Esta información resulta de gran utilidad para identificar los periodos en los que las imágenes satelitales ofrecerán mejor información del terreno ya que en teoría tendrán menos efectos atmosféricos, por ejemplo, la nubosidad.

Foto: María Teresa Rodríguez Zúñiga

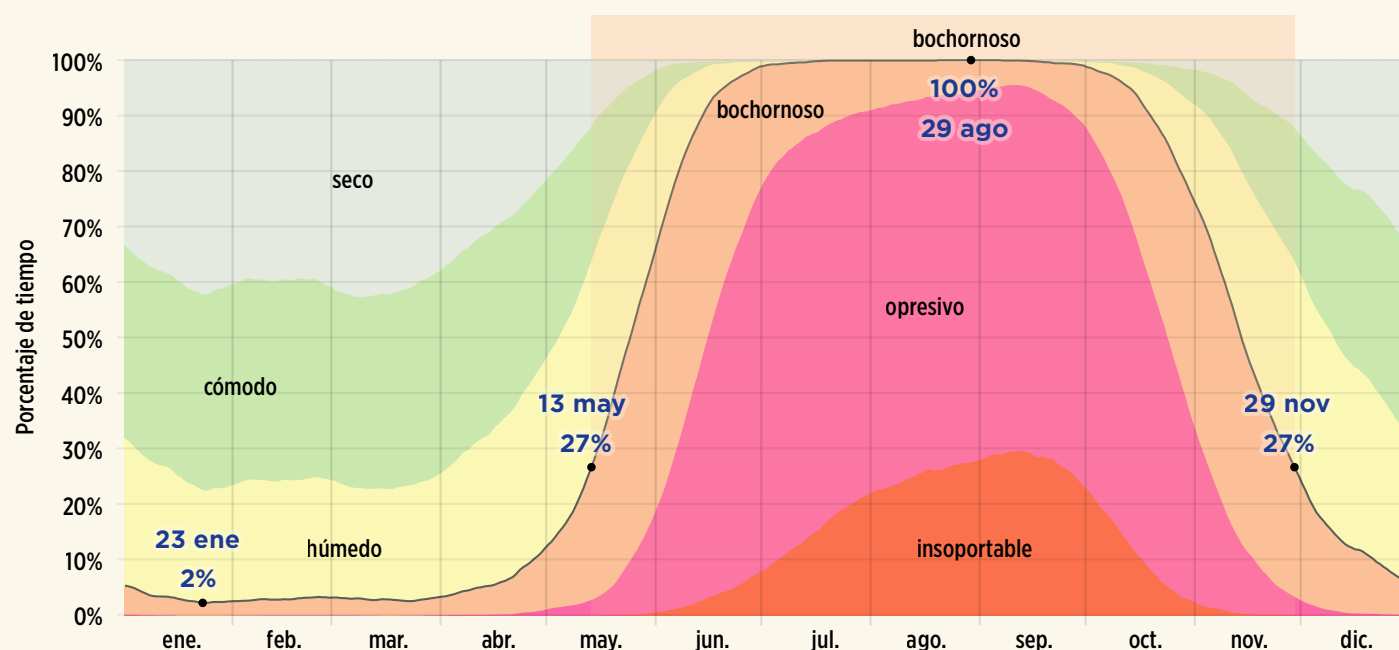


FIGURA 2.2

Gráfica que muestra el comportamiento de la humedad en un sitio a lo largo del año, se observa que la mayor humedad se registra de julio a septiembre.

FUENTE: WEATHERSPARK 2025.

Como una primera aproximación, se sugiere buscar información con los pobladores locales sobre las épocas del año características en la zona y luego complementar con información disponible en otras fuentes. Se puede utilizar, por ejemplo, la



plataforma *Weatherspark*³⁸ que ofrece informes de temperatura y precipitación para cualquier lugar del mundo. La plataforma despliega gráficas y análisis estadísticos de informes climatológicos históricos, los cuales se pueden descargar (Weatherspark 2023) (**FIGURA 2.2**, **FIGURA 2.3** y **FIGURA 2.4**). A partir de la revisión de esta información se pueden conocer las temporadas que prevalecen en un sitio a lo largo de un año y con base en ello tomar mejores decisiones.

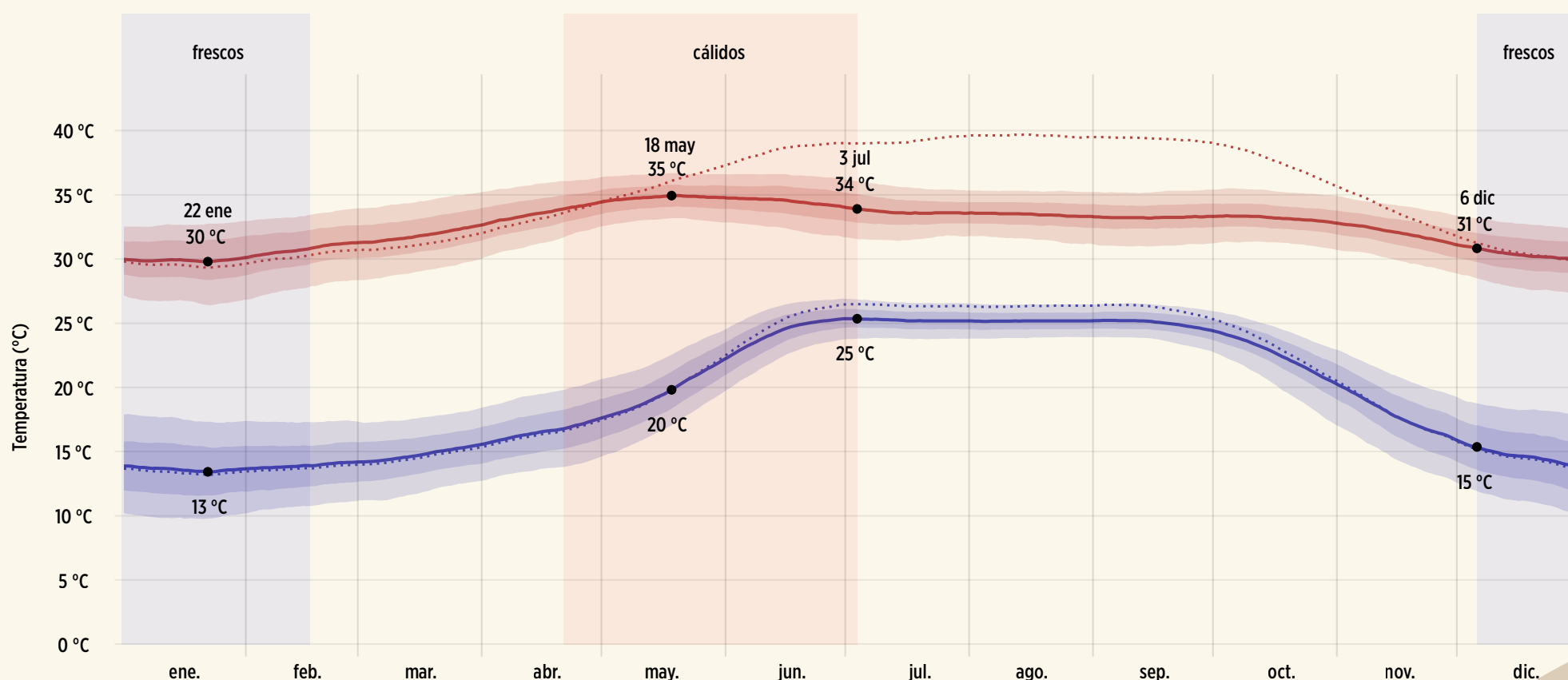


FIGURA 2.3

Gráfica que muestra el comportamiento de la temperatura en un sitio a lo largo del año, se observa que las mayores temperaturas se registran en mayo y junio. **FUENTE: WEATHERSPARK 2025.**

38 <https://es.weatherspark.com>

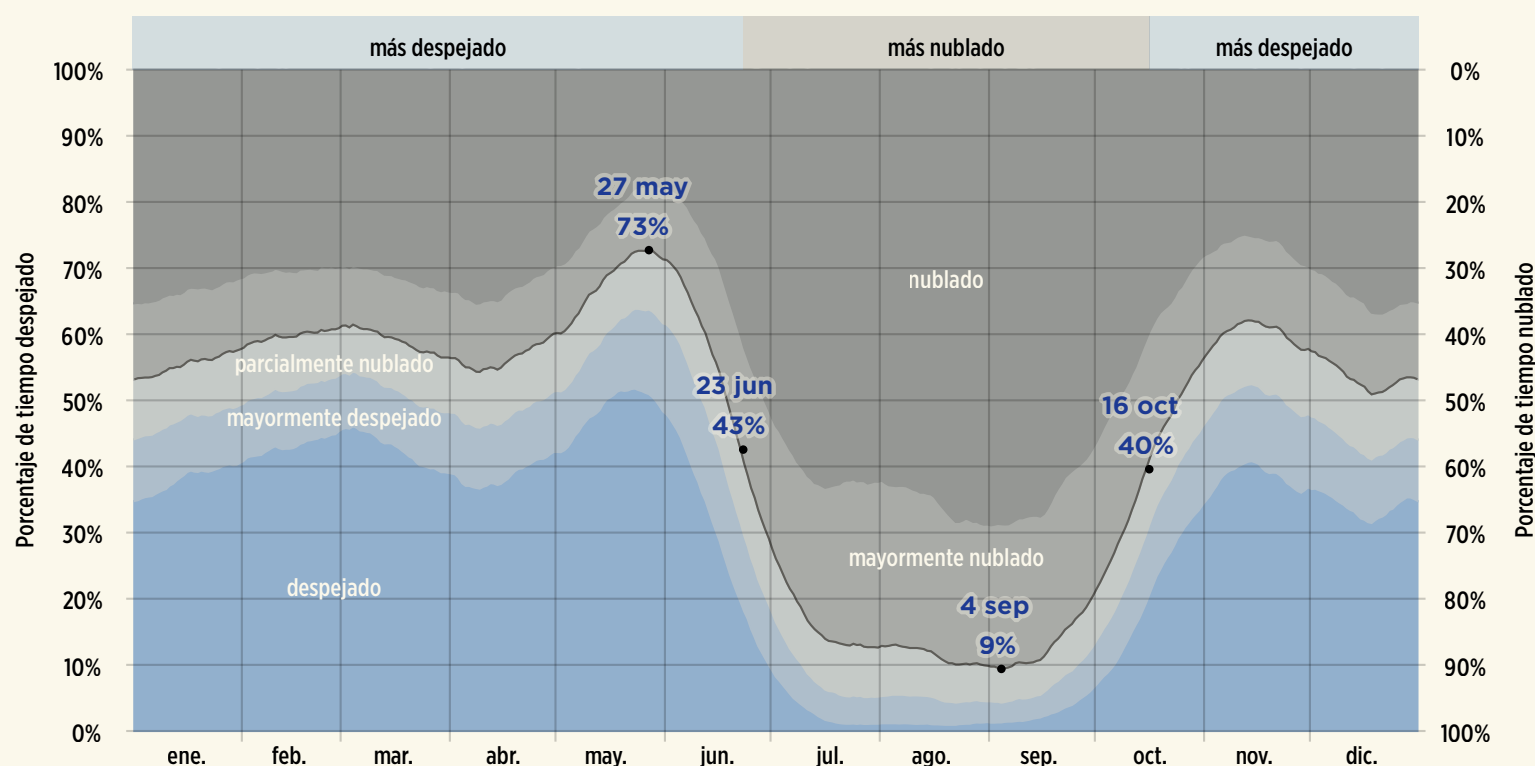


FIGURA 2.4

Gráfica que muestra la cobertura de nubes en un sitio a lo largo del año, se observa que los primeros y últimos meses del año podrían ser buenos para obtener imágenes satelitales óptimas para el monitoreo de las acciones de restauración. **FUENTE: WEATHERSPARK 2025.**

Generación de compuestos

Aunque es deseable tener imágenes libres de nubes y sin sombras de éstas, se reconoce que en el estudio de ecosistemas costeros es recurrente encontrar imágenes con presencia de ellas. Como una alternativa para solventar esta circunstancia, se propone generar una imagen compuesta de píxeles libres de nubes usando la plataforma gratuita *Google Earth Engine* (GEE)³⁹ con las colecciones de imágenes disponibles, estas pueden ser Landsat, Sentinel o los compuestos mensuales de PlanetScope.

Se recomienda hacer uso de *Google Earth Engine* que permite manejar colecciones de imágenes de diferentes satélites, con estas se pueden realizar procesos de limpieza de nubes con muy pocas líneas de código.

39 <https://earthengine.google.com/>

Las colecciones de imágenes pueden ser reducidas usando operaciones estadísticas para obtener una representación sintética de un periodo de tiempo, por ejemplo, en periodos mensuales, anuales o según el periodo elegido, a esto se le llama reductores estadísticos. Estos reductores permiten agregar datos basados en una regla o utilizando una operación matemática, pueden aplicarse sobre el tiempo, espacio, bandas, arreglos y otras estructuras de datos (GEE 2021). El reductor puede usar una simple estadística para la agregación, por ejemplo, mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar y también pueden usar un resumen más complejo de los datos ingresados, por ejemplo, histogramas, regresión lineal, listados, etc. (FUB 2023). Se puede encontrar más información en la literatura de Google Earth Engine⁴⁰.

Se recomienda hacer pruebas con todos los estadísticos indicados en el párrafo anterior para determinar cuál arroja los mejores resultados de forma visual. En un caso práctico realizado en el marco del SMMM, en la zona de Marismas Nacionales, Nayarit, tras realizar múltiples pruebas se determinó que usar el “mínimo” como estadístico reductor, derivó en mejores resultados visuales, ya que la presencia de nubes y sombras disminuyeron considerablemente (**FIGURA 2.5**).

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



.....

40 https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_intro?hl=es-419

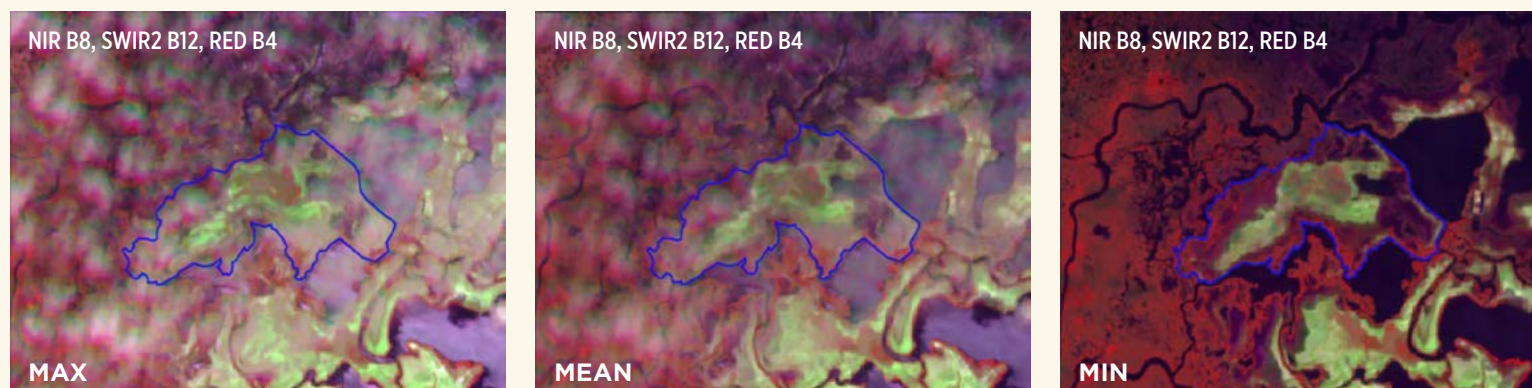


FIGURA 2.5

Imágenes sintéticas de la época de secas 2016 usando los reductores máximo, media y mínimo en un sitio de estudio en Marismas Nacionales, Nayarit, se observa una gran ventaja al usar el estadístico reductor mínimo. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE GOOGLE EARTH ENGINE.**

La generación de imágenes compuestas permite obtener productos más apegados a la realidad y no solo de un momento en específico; el periodo de observación para la selección de insumos en la plataforma debe estar de acuerdo con el inicio del proyecto de restauración y con los periodos de observación establecidos. Este procedimiento se encuentra descrito como una reducción de una colección de imágenes y puede consultarse en línea⁴¹.

Por otra parte, para identificar la presencia de nubes tipo cirrus y sus sombras se recomienda implementar un filtro de nubes y sombras de nubes que utiliza la información de las imágenes Sentinel-2 almacenadas en la banda QA60 o también se puede recurrir a filtros que usan la información de *Sentinel 2 Cloud score* (**FIGURA 2.6**). El método correspondiente para la aplicación de un filtro de nubes con CloudScore+ puede ser consultado en línea en la documentación de *Google Earth Engine*.⁴²

Las colecciones de imágenes de satélite pueden procesarse usando operaciones estadísticas para obtener una imagen sintética de un periodo de tiempo.

41 https://developers.google.com/earth-engine/guides/ic_reducing?hl=es-419

42 https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/GOOGLE_CLOUD_SCORE_PLUS_V1_S2_HARMONIZED?hl=es-419

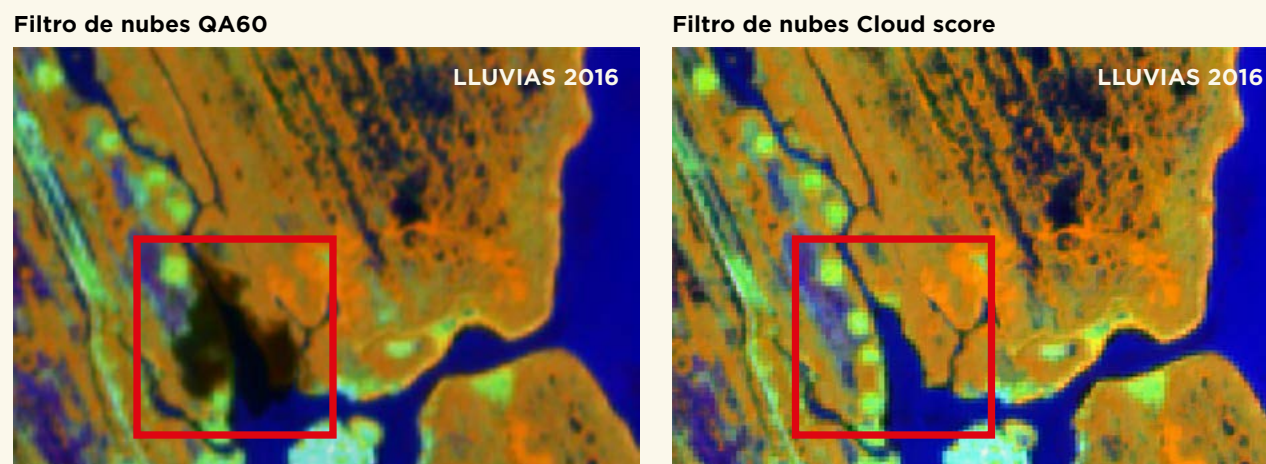


FIGURA 2.6

Se presentan dos ejemplos de compuestos temporales con presencia de sombras de nubes persistentes con el filtro de nubes QA60 (recuadro rojo en la imagen izquierda) y filtro de Cloud score (recuadro rojo en la imagen derecha) que elimina los efectos no deseados.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE GOOGLE EARTH ENGINE.

Para monitorear de forma sistemática la evolución espacial de los resultados de la estrategia de restauración es necesario que la unidad de análisis sea la misma o esté estandarizada, correspondiendo al mismo tipo de cobertura, a la misma escala y levantada con la misma metodología, de lo contrario tendremos insumos que estarían desproporcionados, lo que dificultaría visualizar cambios en el tiempo (Aguilar *et al.* 2015).

2.3 Monitoreo a través de cartografía

Para realizar el monitoreo espacial de las áreas en restauración, interpretando los patrones y las condiciones del paisaje de acuerdo con los objetivos planteados, actualmente se cuenta con una amplia gama de herramientas que permiten realizarlo y se facilita por la disponibilidad de programas capaces de calcular una gran cantidad de índices que evalúan estos patrones del paisaje (Aguilar *et al.* 2015).

Como ya se mencionó en esta guía, la cartografía puede ser generada a través de imágenes satelitales o fotografías aéreas; actualmente el acceso a imágenes satelitales es mucho más fácil que hasta hace algunos años, lo que hace posible contar con los insumos necesarios para la generación de cartografía base que permita identificar periódicamente los cambios derivados de las acciones de restauración en el área.

Generación del mapa de la línea base

Si bien puede haber muchas formas de generar la línea base del área en restauración que aporte información espacialmente explícita para reconocer a lo largo del tiempo los cambios derivados de las acciones implementadas, en el contexto de esta guía, se proponen las siguientes consideraciones y procedimiento para la generación del mapa de la línea base.

Con el propósito de tener el contexto de las coberturas y uso de suelo de los alrededores y cómo influyen en el proceso de recuperación del sitio, o bien lo limitan, se recomienda que la cartografía que se genere considere al menos un kilómetro más a partir de los límites del área de restauración. Este “buffer” podría ser de forma irregular considerando los límites originales del área de restauración o bien a partir de las coordenadas extremas del área generar un rectángulo.

Es importante hacer un cálculo inicial de las superficies de vegetación y usos de suelo presentes en el área a intervenir. Se recomienda usar de referencia la cartografía del SMMM sobre la distribución de los manglares y otras coberturas disponibles en el geoportal⁴³ de la CONABIO, la fecha a utilizar debería ser la más cercana al año de inicio del proyecto de restauración.

La cartografía del SMMM tiene una escala de 1:50 000 y un Área Mínima Cartografiable (AMC) de una hectárea, con su uso es posible obtener información razonablemente aceptable para el área. Sin embargo, recomendamos detallarla para detectar con mayor precisión los cambios que estarán sucediendo a lo largo del tiempo, producto de las acciones de restauración y

.....

⁴³ <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Sección Biodiversidad/Monitoreo de manglares/Distribución de los manglares y otras coberturas)



que seguramente serán paulatinos. La generación cartográfica de la línea base permitirá establecer superficies con el fin de detectar visual y numéricamente los cambios en las áreas con acciones de restauración (**FIGURA 2.7**). El AMC debería considerar al menos cuatro píxeles, esta superficie varía conforme al tipo de imágenes satelitales y la resolución espacial.

Se puede generar un solo mapa de la línea base para ello se recomienda que sea de la época de secas, pero también se podrían generar mapas de la línea base de las distintas temporadas que prevalecen en la zona, esto permitirá, entre otras cosas, determinar aspectos de la hidrología relevantes en los proyectos de restauración, como la identificación de las zonas más secas del terreno, las que permanecen más húmedas, así como la dinámica de canales primarios y secundarios adyacentes a las zonas intervenidas, entre otros aspectos, que aportan información muy valiosa para toma de decisiones. Para revisar la metodología de la conformación de la línea base se puede consultar el libro “Manglares de México. Extensión, distribución y monitoreo”.⁴⁴

El uso de índices de vegetación a través de técnicas de percepción remota apoya en la toma de decisiones más informadas y oportunas, optimizando recursos tanto de tiempo como financieros. El entendimiento de su dinámica ofrece múltiples posibilidades para la restauración y conservación de los sistemas naturales.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



44 <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/6853.pdf>

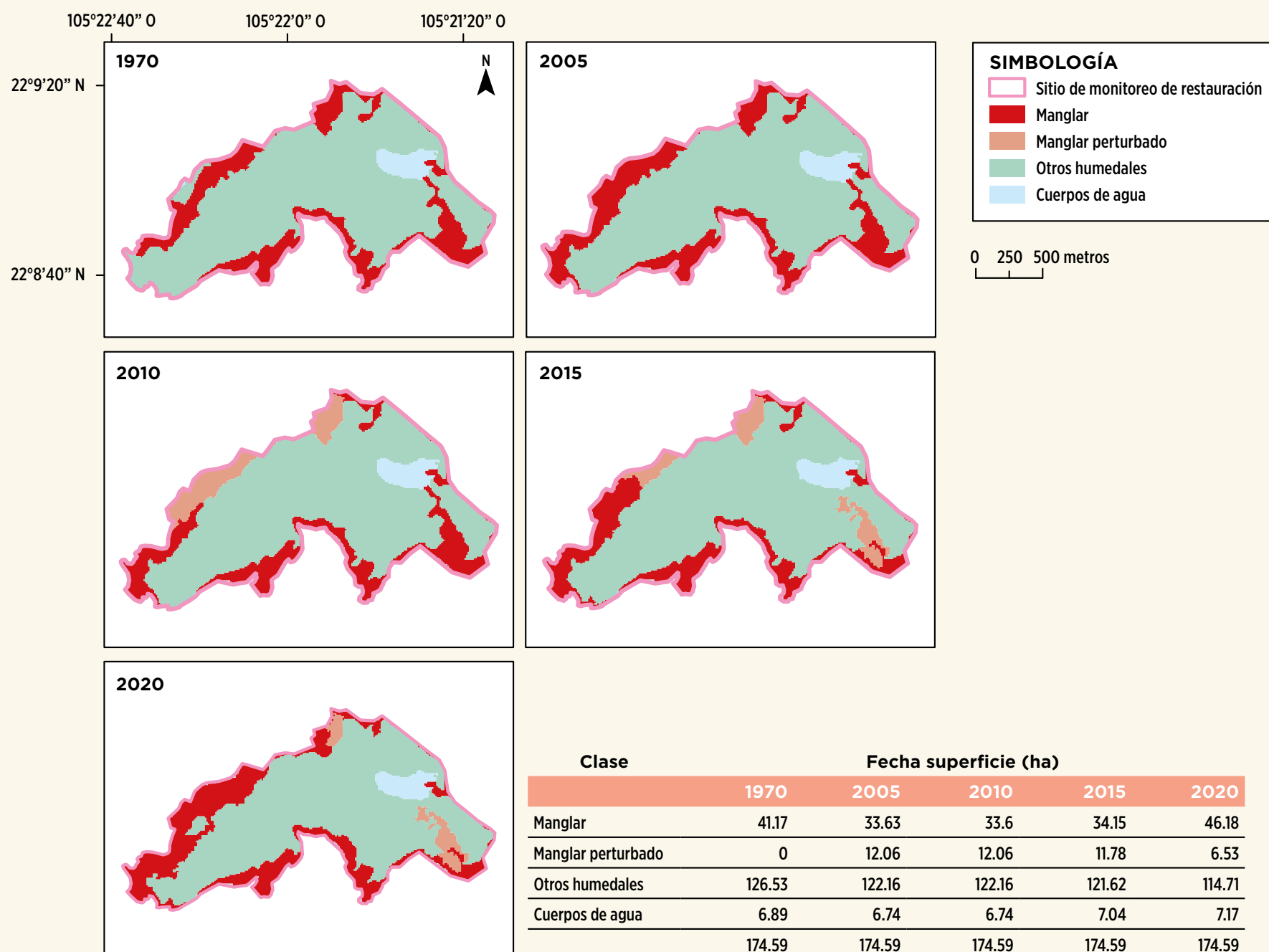


FIGURA 2.7

Muestra la extensión de las superficies presentes en cada una de las fechas de la cartografía del *Sistema de Monitoreo de los Manglares de México* en un sitio de restauración. **FUENTE:** ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.

Finalmente, el proceso de validación de la cartografía juega un papel preponderante, por lo que se deberán planificar las actividades que permitan obtener los insumos necesarios para

realizar esta validación. En caso de que no sea factible obtener datos en campo para la validación, otra forma es realizar un proceso exhaustivo de control de calidad, es decir revisiones por varios colaboradores conocedores de la zona, basado en la información que arrojen las imágenes satelitales y la UMC, con el propósito de obtener un resultado óptimo de los mapas resultantes. Otra manera es obtener datos de mejor resolución espacial. En el documento *Lineamientos para la entrega de datos y productos de percepción remota* proporciona algunas recomendaciones sobre la validación de cartografía⁴⁵.

Actualización del mapa de la línea base

Una manera de evaluar el éxito de la recuperación de la vegetación con características de manglar es a partir de actualizar en forma sistemática la cartografía de la línea base. La periodicidad la marcará el proyecto conforme a las actividades y metas establecidas (**FIGURA 2.8**).

En este sentido, una de las características más relevantes de la cartografía de la *distribución de los manglares y otras coberturas* del SMMM es el uso del *método de interpretación interdependiente* propuesto por la FAO (1996). El método asegura que todos los mapas generados sean comparables entre sí y se aminoren los errores derivados de falsos cambios, por lo cual se recomienda su uso para la generación de cartografía actualizada del área en restauración.

En el proceso de actualización del mapa de la línea base, se pueden utilizar como fuentes de información complementarias la información de *Google Earth—Time lapse*, así como parte de

.....

⁴⁵ https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/conabio/documentos/proyectos/Lineamientos-PR_pagina_2020.pdf



los datos que se obtienen en el trabajo de campo. Estos insumos auxiliares para interpretar las imágenes de satélite aportan detalles actualizados de las áreas.

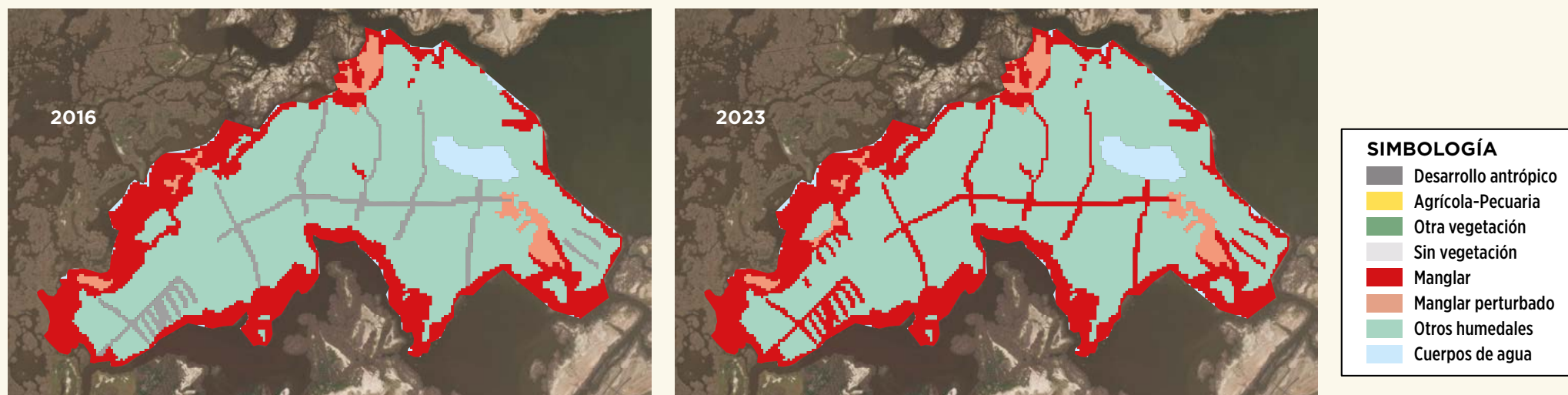


FIGURA 2.8

Muestra la distribución de los manglares y otras coberturas al inicio del proyecto (línea base) y siete años después, se pueden observar nuevas áreas de manglar a la orilla de los canales. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM Y DE GOOGLE EARTH.**

Detección de cambios

De acuerdo con Cruz-López *et al.* (2022) con los mapas de cobertura y usos de suelo de distintas fechas, se puede realizar el análisis de los cambios entre las distintas coberturas a lo largo del tiempo, esto aporta información muy valiosa en términos de estrategias de conservación y restauración de ecosistemas. Para representar los cambios a nivel espacial, es necesario que la cartografía de las dos o más fechas a comparar se encuentre homologada, es decir: 1) se localice en el mismo sistema de coordenadas, 2) tenga la misma resolución espacial, 3) tenga la misma área mínima cartografiable (AMC) y 4) se haya utilizado el mismo esquema de clasificación; cualquiera de estas condiciones que no se cumpla puede generar el fenómeno denominado “falsos cambios”, que hace referencia a cambios

que no son representativos de la realidad, sino efecto de diferencias en la información de entrada.

Después de asegurarse de que la cartografía cumple con esta homologación, se realiza una intersección entre fechas. Esta se puede efectuar con la información en formato vectorial en cualquier Sistema de Información Geográfica, ya sea de acceso libre o de licencia de paga; una ventaja de realizar este proceso en formato vectorial es que los cambios se representan de manera tabular y espacial, expresando por cada polígono, una columna con la clase en la fecha uno y otra columna con la clase de la fecha dos. De esta manera es posible representar los cambios espacialmente en dos formas: 1) si se trata de una ganancia, una pérdida o una permanencia y 2) representando las clases que intervienen en los procesos de ganancias y pérdidas (**FIGURA 2.9**).

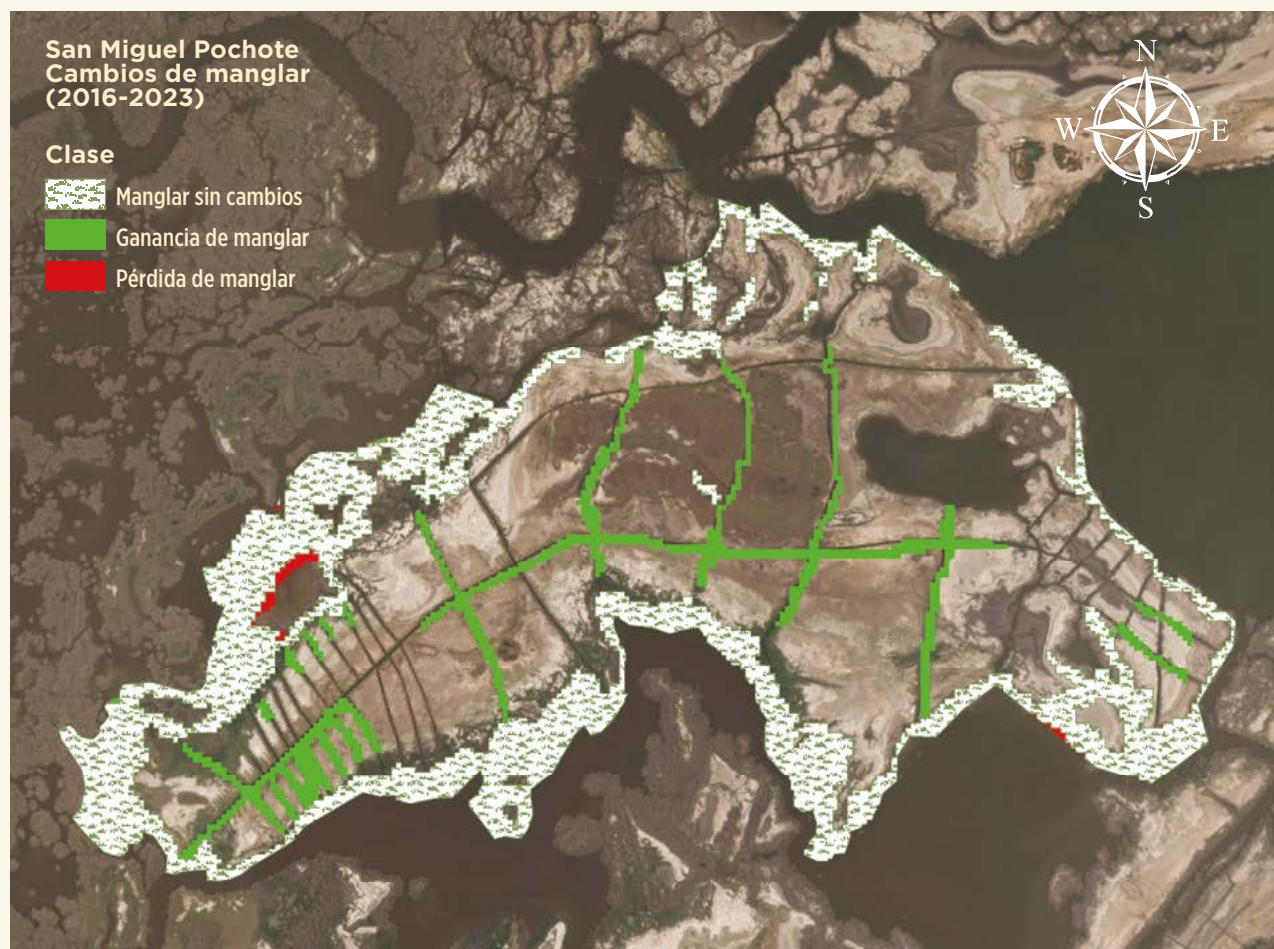
El mapa de cambios de cobertura y usos de suelo expresa espacialmente los cambios y se complementa con los datos de superficie, para tener otro panorama de su dimensión en cuanto a datos cuantitativos y no solamente en una representación visual. Uno de los métodos más utilizados para obtener dichos datos es la matriz de cambios, que presenta una manera pragmática de representar y analizar los cambios de cobertura y usos de suelo entre dos fechas distintas, además de identificar las transiciones más importantes y los procesos que ocasionan dichas transiciones. Para la generación de la matriz de cambios y su interpretación se recomienda consultar el trabajo de Cruz-López *et al.* (2022) disponible en línea⁴⁶.

Foto: Samuel Velázquez Salazar



.....

⁴⁶ <https://libros.uv.mx/index.php/UV/catalog/book/UC018>



El mapa de cambios de cobertura y usos de suelo expresa espacialmente los cambios y se complementa con los datos de superficie, para tener otro panorama de su dimension en cuanto a datos cuantitativos y no solamente en una representacion visual.

FIGURA 2.9

Muestra los cambios del manglar entre la línea base y siete años después en un sitio de restauración, se pueden observar las nuevas áreas de establecimiento de manglar al costado de los canales. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMM Y DE GOOGLE EARTH.**

2.4 Monitoreo a través de índices de vegetación

Existen diversas estrategias para realizar un seguimiento de las características de los ecosistemas, una de éstas es el monitoreo mediante imágenes satelitales que capturan información del espectro electromagnético que interactúa con las plantas, suelo, agua y con lo que se encuentre en la superficie del sitio.

El procesamiento de estas imágenes simplifica diversos aspectos a evaluar de los sitios de interés; uno de éstos es la condición de la salud de la vegetación a través de la generación de índices de vegetación que utilizan la energía que se absorbe y refleja de las hojas de las plantas. Los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), permiten a los científicos, agricultores y tomadores de decisiones obtener información sobre las condiciones de las plantas, sin necesidad de inspecciones físicas extensas, esto es especialmente útil en áreas grandes y de difícil acceso, como son los manglares, proporcionando datos valiosos de manera rápida y eficiente. Además, el uso de índices de vegetación como herramientas de monitoreo posibilita optimizar los procesos de gestión ambiental, al proporcionar acceso a datos precisos sobre la vegetación.

Índices propuestos

Diversos grupos de investigación (Aljahdali *et al.* 2021, Sun *et al.* 2020, Tran *et al.* 2022) han explorado con múltiples índices aspectos de la vegetación de manglar, por ejemplo, monitoreo de la salud de las plantas, humedad relacionada tanto con las plantas como con el suelo, entre otros. Algunos de estos índices han aportado mejores resultados y otros se han descartado por su poca o nula efectividad.

En el contexto de esta guía se evaluaron ocho índices de vegetación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado 2 (MSAVI2), el Índice Mejorado de Vegetación de Manglar (EMVI), el Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada (NDSI), el Índice de Reconocimiento de Manglares Combinado (CMRI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Manglares

Los índices de vegetación, como el NDVI, permiten a los científicos, agricultores y tomadores de decisiones obtener información sobre las condiciones de las plantas, esto es especialmente útil en áreas grandes y de difícil acceso.

(NDMI) y se observó que los índices NDVI, el EVI y el MSAVI2 presentaron una mayor separación entre las clases de vegetación presentes en el sitio. El proceso de selección se realizó a través de analizar estadísticamente el comportamiento de los datos.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es uno de los índices de vegetación más usados, permite identificar la presencia de vegetación, el vigor vegetal y por lo tanto se puede relacionar con la salud vegetal. Específicamente en cuanto a manglares se refiere hay autores, como Aljahdali *et al.* (2021), que indican que la biomasa y el índice foliar están muy relacionados, aunque este mismo índice no funciona bien en zonas con poca vegetación o con alta biomasa.

La fórmula usada para el NDVI (Huang 2021) para Sentinel es:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Donde:

NIR = infrarrojo cercano (banda 8)

Red = rojo (banda 4)

Los resultados teóricos del índice van de -1 a 1 (Huang *et al.* 2021), donde valores más cercanos al 1 significa un dosel más productivo y un estado más saludable de la vegetación (Aljahdali *et al.* 2021).

Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

La literatura sugiere que el EVI es más robusto que el NDVI para monitorear la salud de las plantas y es sensible a las variaciones de las copas en presencia de valores elevados de biomasa (Tran *et al.* 2022) ya que fue creado para ese fin, así como para reducir las influencias de la atmósfera (Sun *et al.* 2020, Simarmata 2024).



A continuación, se muestra la fórmula usada para el cálculo del EVI para Sentinel-2 (Simarmata 2024):

$$EVI = 2.5 * ((\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \zeta_1 * \rho_{RED} - \zeta_2 * \rho_{BLUE} + L))$$

Donde:

ρ_{NIR} = infrarrojo cercano (banda 8)

ρ_{RED} = rojo (banda 4)

ρ_{BLUE} = azul (banda 2)

L = Factor de influencia del suelo con valor de 1

ζ_1 = Factor de corrección para la atmósfera con valor de 6

ζ_2 = Factor de corrección para la atmósfera con valor de 7.5

En el caso del EVI un incremento del valor significa un dosel más productivo y un estado más saludable de la vegetación, el intervalo teórico va de -1 a 1 (EOS data analytics 2022).

Índice Modificado de Vegetación Ajustado al Suelo (MSAVI2)

El MSAVI2 es un índice que puede minimizar los efectos espectrales del suelo ofreciendo una reducción del ruido⁴⁷ (Fabi-jańczyk y Zawadzki 2022) cuando la vegetación tiene espacios entre las plantas como ocurre en etapas tempranas del crecimiento en proyectos de restauración. Su uso se considera más adecuado cuando la vegetación a ser monitoreada tiene un fondo sin vegetación (Darmawan *et al.* 2022).

A continuación, se muestra la fórmula de MSAVI2 usada para Sentinel-2 (Darmawan *et al.* 2022):

.....

⁴⁷ El ruido en una imagen satelital es la interferencia no deseada en la señal de la imagen que distorsiona la información y reduce la calidad de la imagen esperada.



Foto: J. Alberto Alcántara Maya

Donde:

$\rho B8$ = Infrarrojo cercano

$\rho B4$ = rojo

$$MSAVI2 = \frac{2B8 + 1 - \sqrt{(2B8 + 1)^2 - 8(B8 - B4)}}{2}$$

Para el MSAVI2 los valores se pueden encontrar entre -1 y 1, cuando el valor se acerca a 1 indica que la biomasa aumenta y a medida que se acerca a -1 se refiere a áreas sin cubierta vegetal.

Los índices propuestos se pueden utilizar para observar la evolución a lo largo del tiempo, así como antes y después de la intervención. Como ejemplo práctico, se realizó una gráfica de los valores del NDVI, EVI y MSAVI2 que se obtuvieron en un transecto que cruza zonas de manglar y otros humedales, el cual se visitó en abril de 2023. Se observa que los valores donde se encuentra presente la vegetación de manglar se incrementan y decrecen donde se encuentran otros humedales (**FIGURA 2.10 A**), que muestra los valores de NDVI, EVI y MSAVI a lo largo de un transecto cuya posición se observa en la **FIGURA 2.10 B**. El NDVI muestra una diferencia más acentuada entre los valores de manglar y otros humedales en comparación con el EVI, esto sugiere que podría ser más adecuado para separar al menos estas dos clases.

En *Google Earth Engine* se pueden consultar los tutoriales para aplicar los índices de vegetación a una colección de imágenes⁴⁸, para el cálculo de los tres índices antes mencionados en las áreas de restauración de su interés.

Los índices de vegetación se pueden utilizar para observar la evolución a lo largo del tiempo, así como antes y después de la intervención.

.....

48 https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/tutorial_api_06

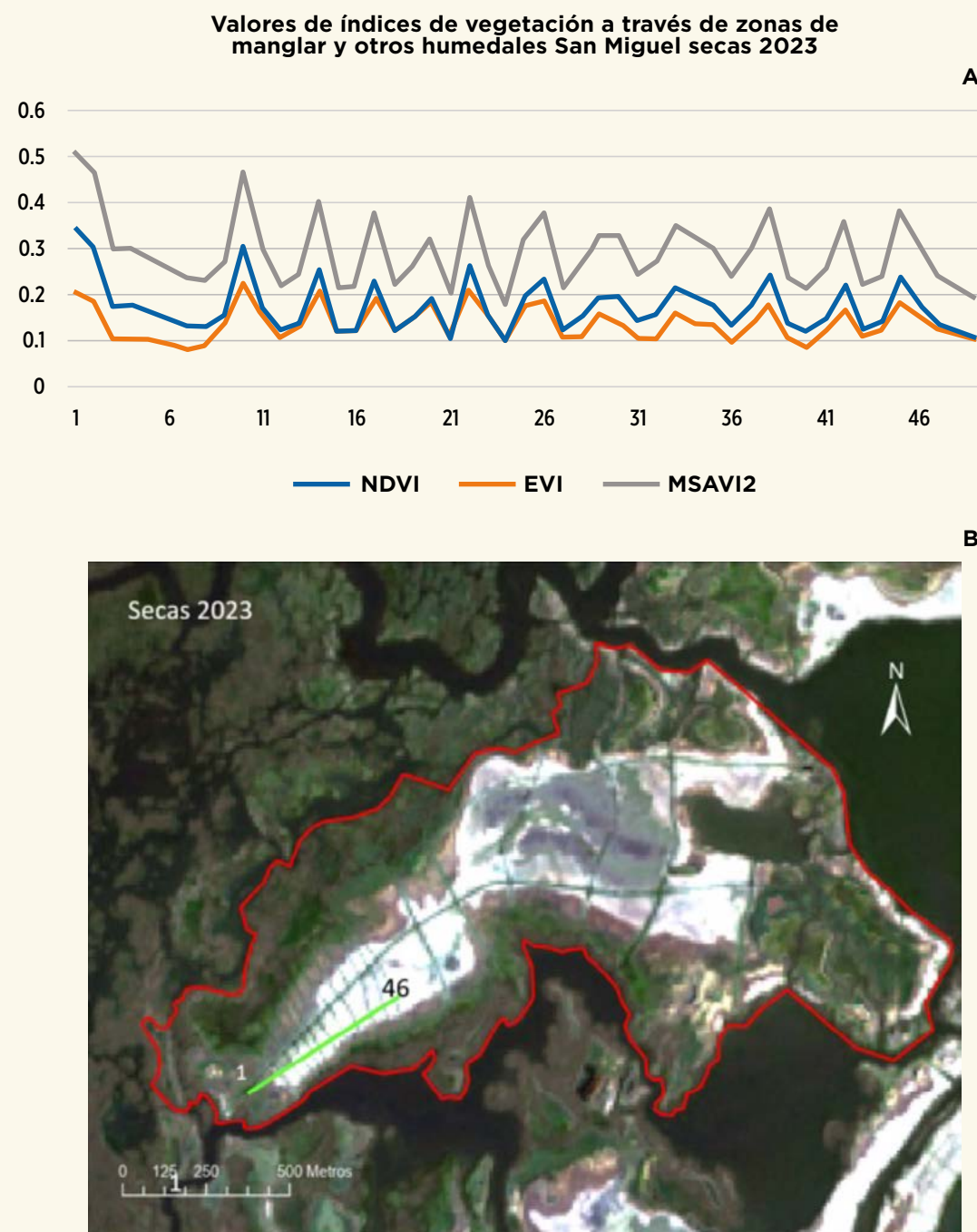


Foto: J. Alberto Alcántara Maya

FIGURA 2.10

A) Muestra los valores de NDVI, EVI y MSAVI2 a lo largo de un transecto (línea verde) en un sitio de restauración y se observa que los valores donde se encuentra presente la vegetación de manglar se incrementan y decrecen donde se encuentran otro tipo de humedales. B) Localización del sitio de restauración y ubicación del transecto analizado (línea verde). **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM, DE GOOGLE EARTH Y GOOGLE EARTH ENGINE.**

Tendencias de incremento o pérdida de verdor

Uno de los problemas clásicos de la disciplina estadística es el del *punto de cambio*. Es decir, a partir de un grupo de observaciones, determinar aquella a partir de la cual pueden distinguirse, al menos, dos subgrupos con características claramente diferentes (media, desviación estándar, etc.). Desde su formulación (Page 1955) este problema ha tenido varias olas de interés. A raíz del desarrollo sostenido de la capacidad computacional en las estaciones de trabajo modernas, la determinación de un punto de cambio se ha convertido en una tarea más bien rutinaria y por tanto de muy fácil aplicación, para quienes se dedican a ello. A continuación, presentamos las principales ideas detrás de la aplicación del problema de *punto de cambio* enfocadas a las distintas estrategias que constituyen este esfuerzo por monitorear la restauración de la vegetación en particular, en este caso, los manglares.

Para una revisión del estado de arte del problema de *punto de cambio* con aplicaciones en varios campos de las ciencias de la Tierra se puede consultar a Ducre-Robitaille *et al.* (2003), Reeves *et al.* (2007) e Itoh y Kurths (2010), entre otros. En el contexto de aplicaciones en percepción remota, quizás debamos remitirnos a Verbesselt y colaboradores (2010), en dicho artículo se presenta la idea de determinar estadísticamente aquellos puntos en el tiempo en donde las características principales de una sucesión de mediciones del NDVI son significativamente distintas.

El artículo de Verbesselt *et al.* (2010) ha tenido múltiples aplicaciones y ramificaciones de la estrategia metodológica inicial. Por ejemplo, de Jong *et al.* (2013) propusieron enfocarse en la determinación de un solo punto de cambio, aquel con

Foto: Berenice Vázquez Balderas



la mayor magnitud⁴⁹, debido a que de esta forma resulta muy sencillo proponer una clasificación de la tendencia del NDVI anterior y posterior al punto de cambio. Es importante notar que esta clasificación es aplicable a cualquier sucesión de valores de índice de vegetación satisfaciendo las condiciones presentadas en de Jong *et al.* (2013). Por tal consideración, de aquí en adelante emplearemos el término *variable* ya que la aplicación de esta metodología no se restringe a índices de vegetación como el NDVI, el EVI o cualquier otro.

A continuación, se presentan las descripciones de las diferentes clases de tendencias propuestas en de Jong *et al.* (2013) en el contexto de la restauración de manglares (véase también Tecuapetla *et al.* 2021) (**TABLA 2.1**, **FIGURA 2.11**, **FIGURA 2.12**, **FIGURA 2.13**, **FIGURA 2.14**, **FIGURA 2.15**, **FIGURA 2.16**):



Foto: J. Alberto Alcántara Maya

.....

49 En este caso, magnitud significa la diferencia entre los valores de NDVI en cualesquiera dos puntos de cambio consecutivos.

TABLA 2.1

Descripción de las clases de tendencias de cambio propuestas y su posible interpretación en el marco de las acciones de restauración de sitios de manglar.

Clases de tendencias de cambio			
CLASES SIN PUNTO DE CAMBIO			
Número de clase	Nombre de clase	Descripción	Posible interpretación en el marco de restauración del ecosistema de manglar
 1	Incremento de verdor	Se observa cuando la sucesión de valores de la variable registrada en un píxel muestra una tendencia lineal global creciente (Figura 2.11, panel izquierdo).	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación ha experimentado un incremento considerable de su verdor. En particular, si el inicio de la serie de tiempo coincide con el inicio de las actividades de restauración, entonces es plausible que el incremento del verdor pueda atribuirse a estas actividades.
 2	Pérdida de verdor	Se observa cuando la sucesión de valores de la variable registrada en un píxel muestra una tendencia lineal global decreciente (Figura 2.11, panel derecho).	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación ha experimentado una pérdida considerable de su verdor. En particular, si el inicio de la serie de tiempo coincide con el inicio de las actividades de restauración, entonces es altamente plausible que estas actividades no estén otorgando los resultados esperados; en este caso se sugiere explorar otras alternativas de restauración.
CLASES CON UN PUNTO DE CAMBIO			
En áreas que han sido sujeto de actividades de restauración, se espera que el punto de cambio estimado coincida (al menos a nivel anual) con las fechas de la realización de estas actividades.			
 3	Incremento continuo de verdor	Se observa cuando la sucesión de valores de la variable registrada en un píxel muestra tendencias lineales locales crecientes antes y después del punto de cambio (Figura 2.12).	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación muestra un verdor siempre creciente. Es plausible que estos píxeles se encuentren en la zona de incidencia de algún área de restauración y las medidas implementadas hayan surtido un efecto acelerado en el crecimiento del verdor.
 4	Pérdida continua de verdor	Se observa cuando la sucesión de valores de la variable registrada en un píxel muestra tendencias lineales locales decrecientes antes y después del punto de cambio; las regiones de interés consideradas en esta guía no mostraron píxeles con este tipo de tendencia.	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación muestra signos de degradación. Si el punto de cambio coincide con las fechas de las actividades de restauración, entonces es altamente plausible que estas actividades no estén otorgando los resultados esperados; en este caso es altamente recomendado replantear las estrategias de restauración.
 5	Incremento de verdor interrumpido por un cambio en el entorno	Se observa cuando los valores de la variable registrados antes del punto de cambio muestran una tendencia lineal local plana o ligeramente creciente mientras que los valores de la variable registrados después del punto de cambio exhiben una tendencia lineal creciente (Figura 2.13).	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación presentó algún tipo de pérdida o degradación por un periodo de tiempo corto (plagas, sequías, nevadas, etc.) y posteriormente a las actividades de restauración, la vegetación recuperó sus características habituales de verdor. Si este tipo de tendencia se observa en píxeles no intervenidos mediante restauración, entonces es altamente plausible que la recuperación del verdor se deba a las características resilientes de la vegetación.

TABLA 2.1 (CONTINÚA)

Descripción de las clases de tendencias de cambio propuestas y su posible interpretación en el marco de las acciones de restauración de sitios de manglar.

Clases de tendencias de cambio			
CLASES CON UN PUNTO DE CAMBIO			
En áreas que han sido sujeto de actividades de restauración, se espera que el punto de cambio estimado coincida (al menos a nivel anual) con las fechas de la realización de estas actividades.			
Número de clase	Nombre de clase	Descripción	Posible interpretación en el marco de restauración del ecosistema de manglar
 6	Pérdida de verdor interrumpida por un cambio en el entorno	Se observa cuando los valores de la variable registrados antes del punto de cambio muestran una tendencia lineal local plana o ligeramente decreciente mientras que los valores de la variable registrados después del punto de cambio exhiben una tendencia lineal local decreciente (Figura 2.14).	De manera general, este tipo de tendencia se observa en píxeles cuya vegetación presentó algún tipo de recuperación por un periodo de tiempo corto y posteriormente a las actividades de restauración, la vegetación continuó mostrando pérdida verdor. Si este tipo de tendencia se presenta en píxeles intervenidos mediante alguna actividad de restauración, entonces es altamente recomendado replantar las estrategias de restauración.
 7	Transición de incremento a pérdida de verdor	Se observa cuando los valores de la variable registrados antes del punto de cambio muestran una tendencia lineal local creciente mientras que los valores de la variable registrados después del punto de cambio exhiben una tendencia lineal local decreciente (Figura 2.15).	De manera general, los píxeles exhibiendo este tipo de tendencia deberían ser candidatos para ser intervenidos por alguna actividad de restauración futura. En términos simples, en estas regiones se comienza a experimentar un proceso de degradación pero, exepctuando el caso de un cambio de uso de suelo, este proceso podría ser revertido debido a que en el pasado la vegetación mostraba tasas crecientes de verdor y por tanto algunas medidas de restauración podrían resultar exitosas.
 8	Transición de pérdida a incremento de verdor	Se observa cuando los valores de la variable registrados antes del punto de cambio muestran una tendencia lineal local decreciente mientras que los valores de la variable registrados después del punto de cambio exhiben una tendencia lineal local creciente (Figura 2.16).	Cuando el punto de cambio coincide con la aplicación de medidas de restauración, este tipo de tendencia describe los casos más drásticos de éxito

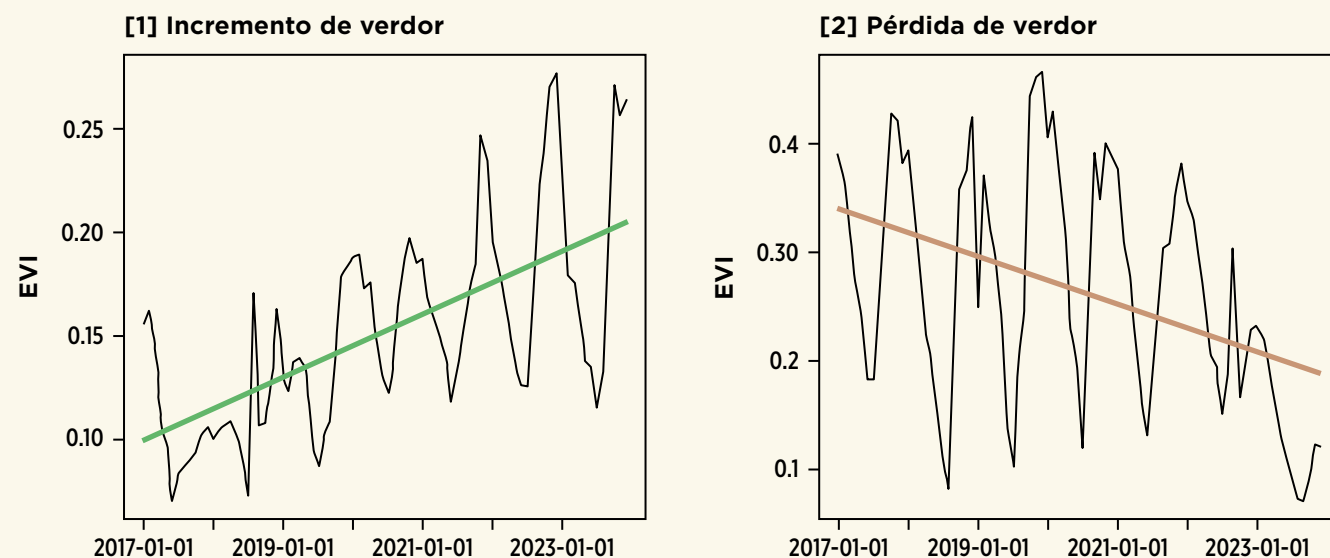


FIGURA 2.11

Tendencias sin punto de cambio de las clases *incremento* (izquierda) y *pérdida del verdor* (derecha), en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**

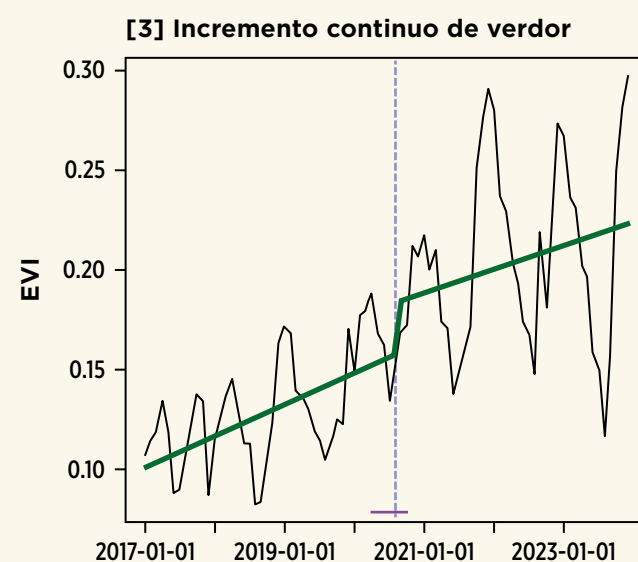


FIGURA 2.12

Tendencias con un punto de cambio de la clase *incremento continuo de verdor*, en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**



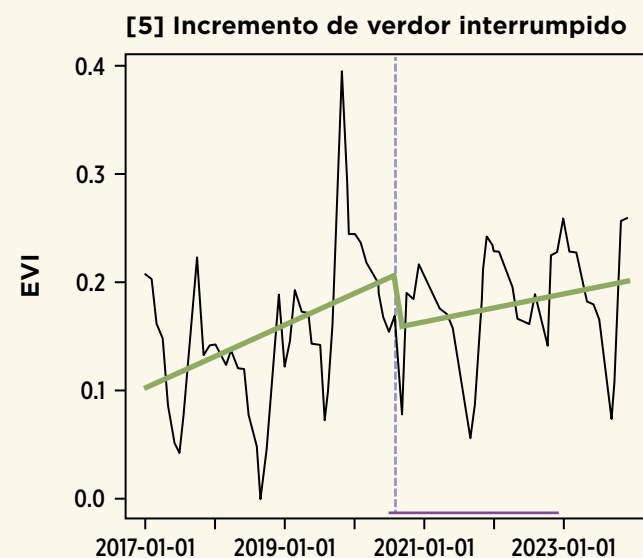


FIGURA 2.13

Tendencias con un punto de cambio de la clase *incremento de verdor interrumpido* por un cambio en el entorno, en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.

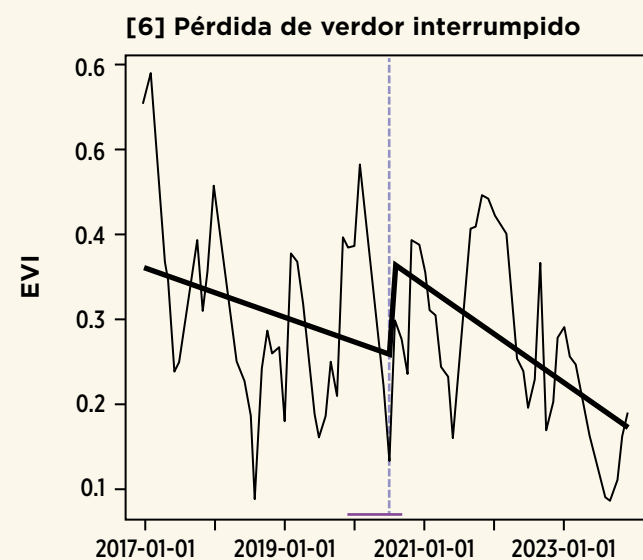


FIGURA 2.14

Tendencias con un punto de cambio de la clase *pérdida de verdor interrumpido* por un cambio, en el entorno en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.



Foto: María Teresa Rodríguez Zúñiga

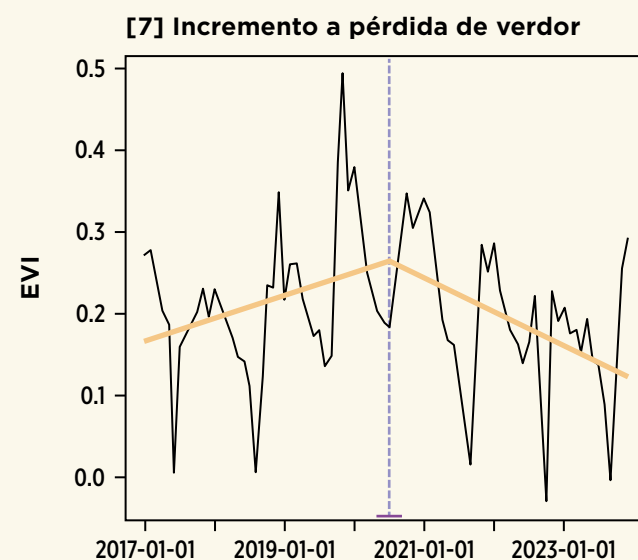


FIGURA 2.15

Tendencias con un punto de cambio de la *clase transición de incremento a pérdida de verdor*, en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**

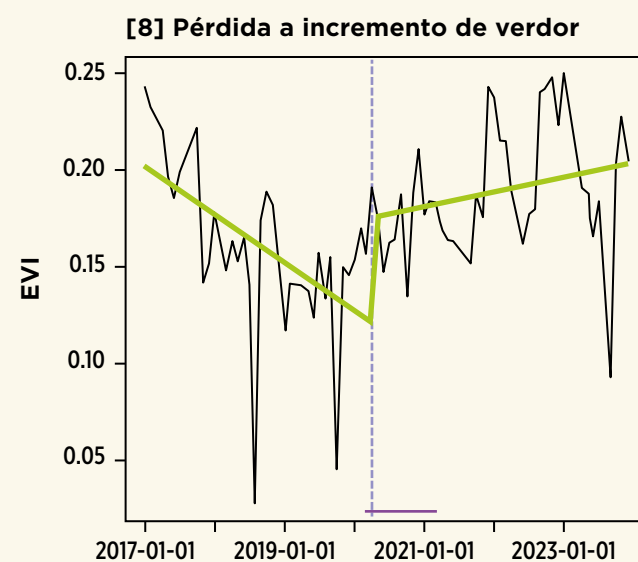
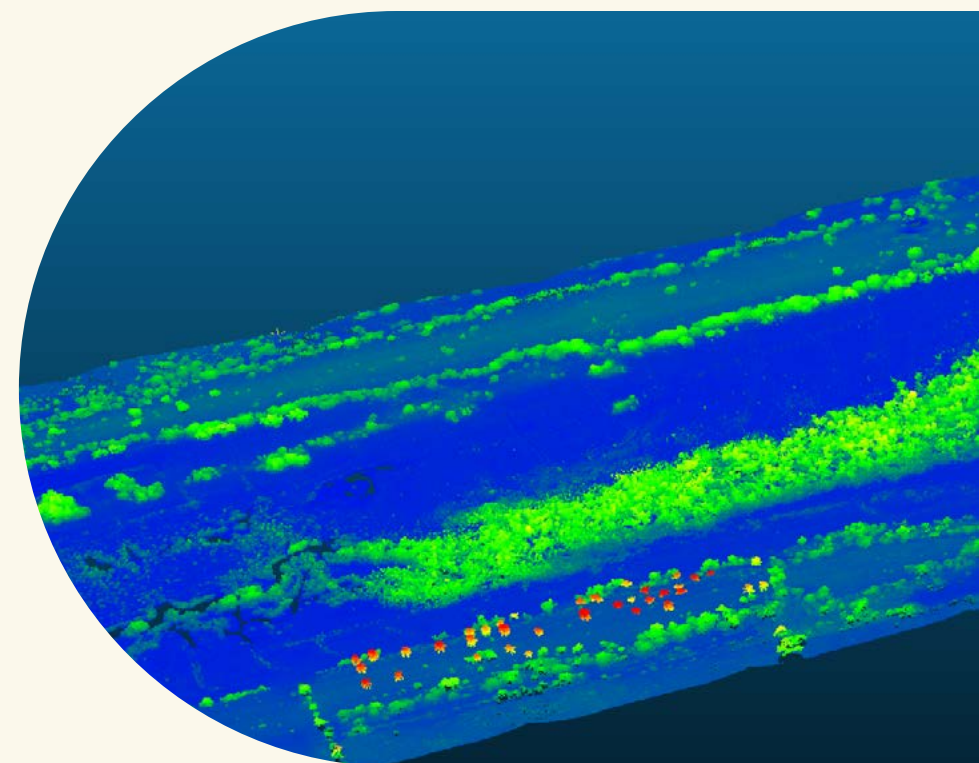


FIGURA 2.16

Tendencias con un punto de cambio de la *clase transición de pérdida a incremento de verdor*, en un área de manglar con acciones de restauración en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**



A manera de ejemplo, en una sección subsecuente discutiremos las distribuciones espaciales de estas clases en las áreas analizadas. En el contexto de esta guía se considera que para efectuar monitoreos a largo plazo de la vegetación, las ocho clases de tendencias presentadas son útiles (**TABLA 2.1**). En particular, las tendencias sin punto de cambio nos otorgan información sencilla acerca del crecimiento o decrecimiento (ganancia o pérdida) sostenido del proxy⁵⁰ de verdor, cuando la variable bajo consideración es un índice de vegetación, durante el periodo de tiempo estudiado.

Con los resultados obtenidos se considera que las clases asociadas a la pérdida del verdor (*pérdida continua de verdor*, *pérdida de verdor interrumpida* y la *transición de incremento a pérdida de verdor*) pueden contribuir a identificar zonas experimentando algún proceso de perturbación. Por tanto, los píxeles, y eventualmente las áreas, clasificadas de esta manera son potenciales candidatas para efectuar en ellos algún proceso de intervención activa o revisión de técnicas de restauración.

Consideramos que las clases asociadas a la ganancia del verdor (*incremento continuo de verdor*, *incremento de verdor interrumpido* y la transición de pérdida a incremento de verdor) pueden contribuir a identificar áreas con algún tipo de regeneración o nuevo establecimiento. Por ejemplo, los píxeles con *un incremento continuo de verdor* pueden indicar una regeneración natural de la vegetación o bien, un caso exitoso de regeneración por restauración siempre y cuando la fecha del punto de cambio coincida con la aplicación de alguna estrategia de intervención activa. Quizás el caso más drástico en una

.....

⁵⁰ “Proxy” se refiere a una variable representativa o sustituta que se utiliza para inferir o estimar otra que no se mide directamente

Foto: Berenice Vázquez Balderas



intervención de este tipo se origina cuando una estrategia de restauración ha sido implementada en un área que el procedimiento clasifica con *la transición de pérdida a incremento de verdor*; es decir, a raíz de la intervención la vegetación, potencialmente, experimentó una ganancia con tasa muy alta.

Para la obtención de resultados de este tipo en las áreas de restauración de interés del usuario, se recomienda consultar el artículo *Clasificación de tendencias de NDVI en la península de Yucatán, México, de 2014 a 2020* (Tecuapetla et al. 2021) disponible en línea⁵¹.

Plataforma para la visualización de índices de vegetación y nubes de puntos

La principal herramienta de visualización de los resultados del análisis de *punto de cambio* descrito en la sección anterior es la aplicación web *mappgrove*, la cual en un futuro estará alojada en el ORM. Esta sección se describirá con detalle debido a que se visualiza como una herramienta altamente eficaz para el monitoreo espacial de los sitios de restauración de manglares.

Esta aplicación fue desarrollada en la Coordinación de Sistemas, Monitoreo e Información Geoespacial de la CONABIO, bajo la filosofía del código abierto y gratuito utilizando el lenguaje de programación R (R 2023), específicamente los paquetes relacionados con la iniciativa *Shiny for R*⁵².

Foto: Berenice Vázquez Balderas



51 <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/60629>

52 <https://shiny.posit.co/>

El código de la herramienta está disponible a través del repositorio *mappgrove* en la plataforma *Github*⁵³ de forma privada.⁵⁴

La aplicación trabaja con series de tiempo mensuales de índices de vegetación (NDVI, EVI y MSAVI2) provenientes de imágenes Sentinel-2 generados en la plataforma de Google Earth Engine usando el reductor mínimo. El periodo de observación es de enero 2017 a diciembre de 2023.

Al iniciar la aplicación se muestra un mapa con puntos que corresponden al centro de cada píxel de la serie de tiempo presentados con colores que corresponden a las clases de tendencia de cambio.

La aplicación *mappgrove*, permite visualizar mapas dinámicos de las clases de tendencias de verdor relacionadas con los índices NDVI y EVI en la cual se puede revisar la dinámica de cualquier sitio de interés en los manglares de México. En particular, el módulo ROI permite seleccionar la región de interés (ROI por sus siglas en inglés), así como el índice de vegetación de su preferencia. Como puede observarse en la **FIGURA 2.17**, con este módulo se habilitan dos pestañas (*Regional*, *Local*), con la opción de *Regional*, los usuarios pueden navegar sobre un mapa interactivo basado en la clasificación de las tendencias de la serie de tiempo mensual del periodo enero de 2017 a diciembre 2023, del índice de vegetación seleccionado en la región de interés del usuario.

Foto: Berenice Vázquez Balderas



53 github.com/inder-tg/mappgrove

54 Si se requiere acceso al recurso favor de enviar un correo a itecuapetla@conabio.gob.mx

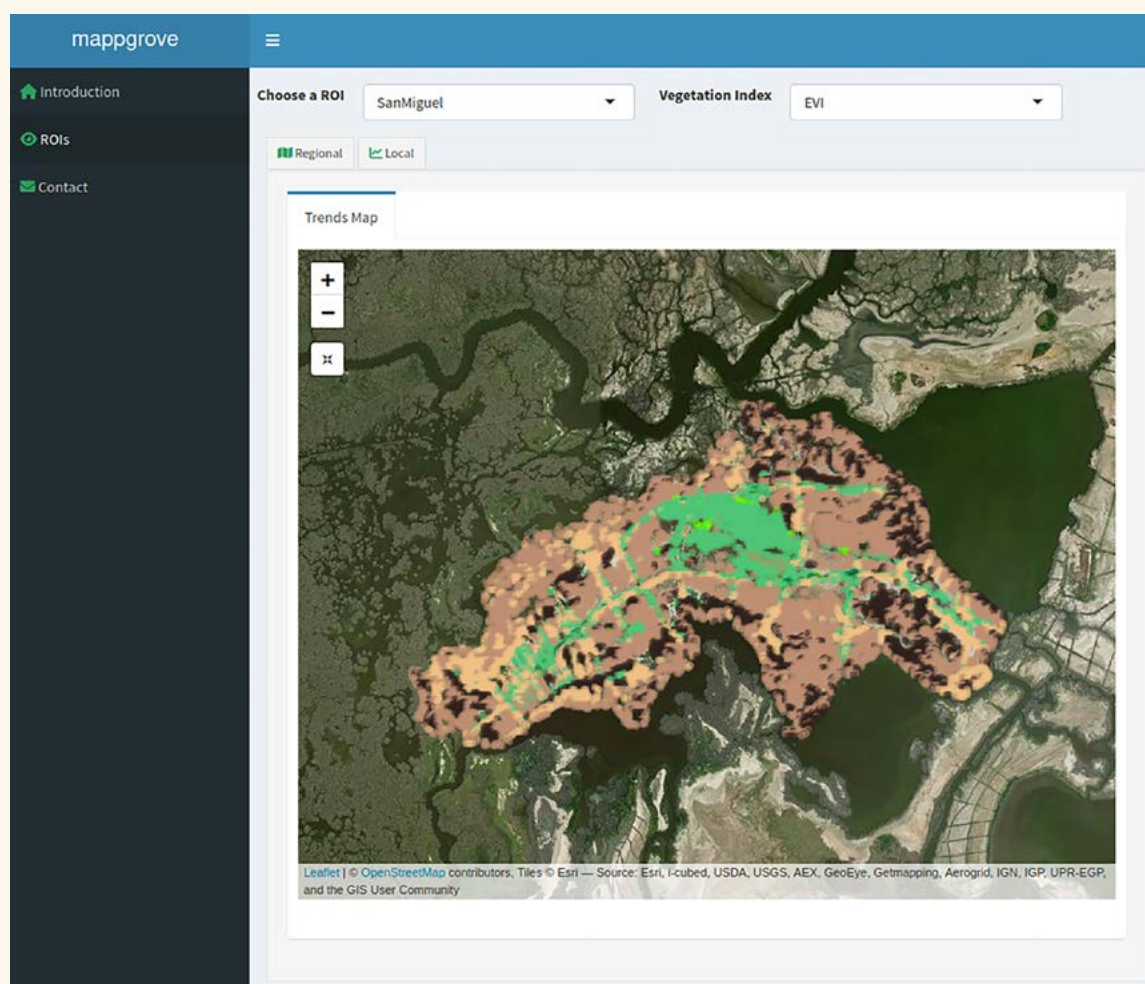


FIGURA 2.17

Módulo de Regiones de Interés (ROIs por sus siglas en inglés) de la aplicación web mappgrove. En la cual se observa el despliegue del resultado del índice de vegetación mejorado en un sitio en restauración. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**

Adicionalmente a este mapa se despliega un panel con una gráfica de barras indicando el porcentaje (respecto de la región de interés seleccionada) del área de interés clasificada con los distintos tipos de tendencias descritas en la sección *Tendencias de incremento o pérdida de verdor* de todos los tipos de vegetación presentes en las regiones de interés (**FIGURA 2.18**).

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



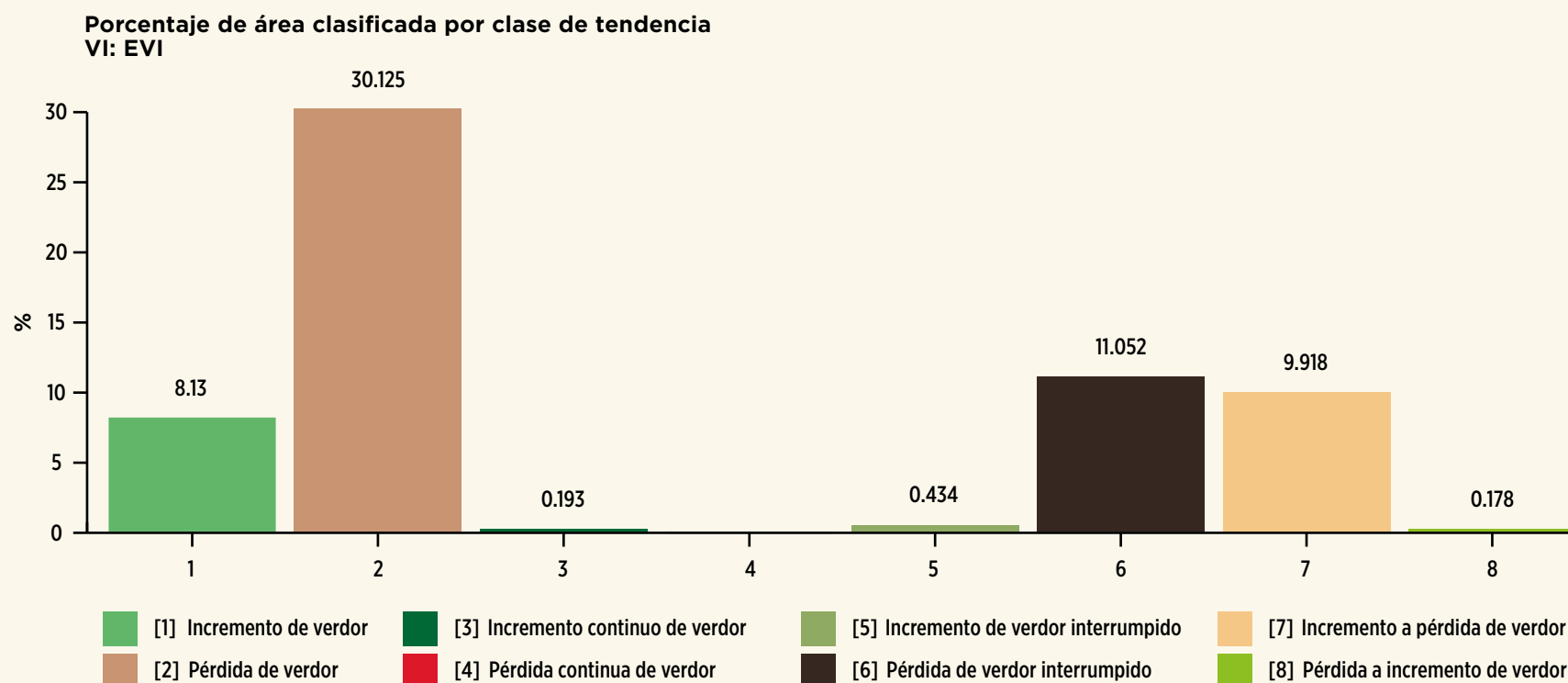


FIGURA 2.18

Gráfica de barras que muestra el porcentaje del área total de un sitio de restauración de manglares. Este ejemplo muestra el porcentaje de área clasificada a partir de la serie de tiempo del índice del Índice de Vegetación Mejorado (EVI). **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.**

Regresando al mapa que se habilita en el menú ROI, haciendo doble clic en cualquiera de los píxeles del mapa, la aplicación registra las coordenadas del píxel y hace una solicitud de extracción de la serie de tiempo correspondiente. La visualización de esta serie de tiempo, junto con la clasificación de su tendencia, se obtiene seleccionando la pestaña *Local* (**FIGURA 2.19**). Finalmente, al seleccionar la pestaña *Local* el panel con la gráfica de barras reportará el porcentaje de área (respecto del área total del polígono de la región de interés) ocupada por cada tipo de tendencia, se desliza hacia abajo en la página web permitiendo a los usuarios mantener presente en todo momento la información sobre los porcentajes globales.

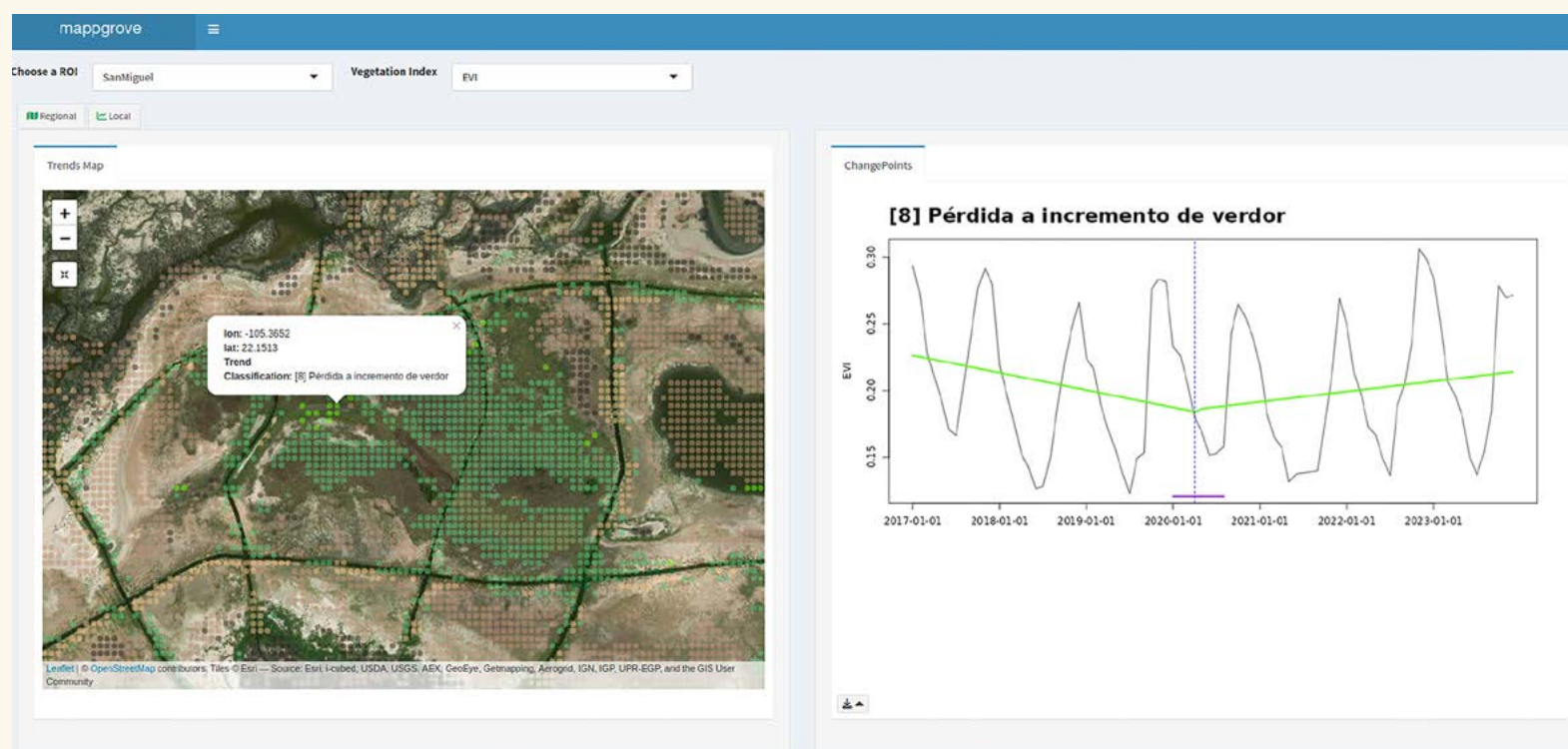


FIGURA 2.19

Se muestra la habilitación del panel *Local* habiendo seleccionado un píxel (izquierda) y el resultado del comportamiento del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) de ese píxel en ese periodo de tiempo (derecha), en el cual se identifica la clase de tendencia de verdor *Pérdida a incremento de verdor* (8). **FUENTE:** ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM.

El tiempo que ocupa la renderización de los mapas, así como la vinculación de los píxeles seleccionados con su correspondiente serie de tiempo se realiza en muy poco tiempo, dependiendo de la extensión de cada área de estudio, de la longitud de las series de tiempo y de la integración previa de los resultados del análisis de tendencias en *mappgrove*.

Finalmente, cabe mencionar que *mappgrove* está habilitado para exportar tanto las gráficas de barras como la clasificación de tendencias por píxel, independientemente de la región de interés y del índice de vegetación seleccionado.

A manera de ejemplo, en la **TABLA 2.2** se presentan los resultados, para tres zonas con procesos de restauración de manglares, en cuanto a los porcentajes de áreas por tipo de tendencia, área de interés e índice de vegetación. Los porcentajes se calcularon respecto al área total de cada zona de interés. Además, las zonas clasificadas consideradas en estos cálculos están integradas por aquellos píxeles en donde las tendencias globales y locales (ambos segmentos, antes y después del punto de cambio) son significativas al 5%.

De acuerdo con la interpretación de la información de la **TABLA 2.2** podemos concluir que en las áreas reportadas para este ejercicio ni el EVI ni el NDVI parecen proveer evidencia de zonas con pérdida continua de verdor. También, se concluye que en las clases de tendencias identificadas en el Sitio 2 los resultados obtenidos con EVI y NDVI son muy similares a excepción de las clases *incremento continuo de verdor*, *pérdida de verdor interrumpido* y en la transición *pérdida a incremento de verdor*, la tasa de área clasificada usando EVI es al menos el doble que la clasificada usando NDVI. Resultados similares se obtuvieron para el Sitio 1, descartando la presencia de zonas con la transición *pérdida a incremento de verdor* tanto con EVI como con NDVI. Finalmente, las principales diferencias en los resultados respecto de los índices de vegetación se encontraron en el Sitio 3. Por ejemplo, hay al menos 20 puntos porcentuales de diferencia entre EVI y NDVI para clasificar *incremento de verdor* y *pérdida de verdor*. También se encontraron al menos 5 puntos porcentuales de diferencia entre EVI y NDVI al clasificar las transiciones *pérdida a incremento de verdor* y viceversa. No parece haber presencia de *incremento continuo de verdor* en esta zona.

Foto: Berenice Vázquez Balderas



TABLA 2.2

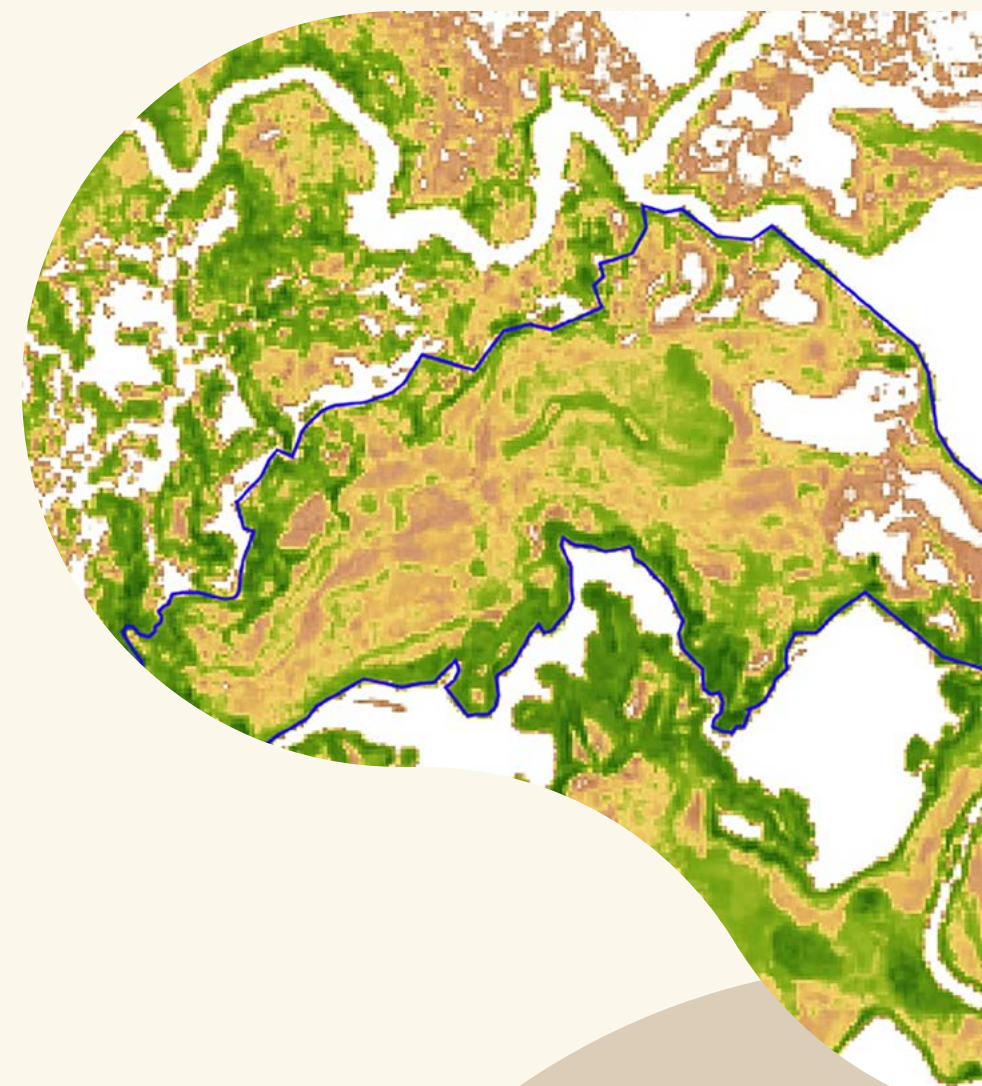
Se presenta el porcentaje de área clasificada por tipo de tendencia, región de interés e índice de vegetación, en tres sitios con acciones de restauración de manglares. El significado de la abreviatura n.s. es “no significativo”.

	Sitio 1		Sitio 2		Sitio 3	
	EVI	NDVI	EVI	NDVI	EVI	NDVI
 Incremento de verdor	4.062	6.564	8.130	10.425	2.947	24.169
 Pérdida de verdor	32.574	34.506	30.125	30.805	25.198	4.214
 Incremento continuo de verdor	0.991	1.090	0.193	0.371	n.s.	n.s.
 Pérdida continua de verdor	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
 Incremento de verdor interrumpido	0.669	1.387	0.434	0.528	n.s.	1.452
 Pérdida de verdor interrumpido	1.486	0.124	11.052	5.035	1.863	n.s.
 Incremento a pérdida de verdor	8.843	6.911	9.918	9.834	5.709	0.022
 Pérdida a incremento de verdor	n.s.	n.s.	0.178	0.084	0.022	7.106

Herramientas de visualización

Por otra parte, en los procesos de monitoreo espacial de las acciones de restauración se recomienda complementar los análisis de datos satelitales con información de campo, actualmente los drones juegan un papel fundamental y se les encuentra en una gran variedad de precios y características. En el marco de los ejercicios realizados en el contexto de esta guía se realizaron dos visitas a sitios de restauración en los meses de abril y noviembre de 2023 y 2024, con estas visitas se realizaron vuelos con un dron de la marca DJI M300 a 120 metros de altura, a partir de los cuales se obtuvieron datos de altura y fotografías verticales, con estos dos insumos se generó un mapa de altura de la vegetación y un mosaico fotográfico de cada sitio visitado.

Con miras a contar con una herramienta que facilite el monitoreo espacial por parte de los involucrados en la restauración de manglares, en el marco de esta guía se desarrollaron también los siguientes visualizadores que sirven para la consulta de mapas relacionados con el área de restauración.



En uno de los visualizadores se encuentran los archivos de nubes de puntos que permiten al usuario el manejo en 3D del mapa, en éste se pueden realizar acercamientos, cambiar la perspectiva, realizar mediciones y desplazarse por la superficie mapeada. Se desarrolló en el programa *Potree* (Schütz *et al.* 2020) que es de código libre, que permite integrar el manejo de archivos de nubes de puntos. Además, se integraron otras tecnologías como son *Cesium* (Bentley 2025) y *Leaflet* (Agafonkin 2023), la primera permite montar las nubes de puntos en un globo terráqueo con una imagen de satélite de fondo y la segunda permite integrar un mapa de referencia (**FIGURA 2.20**).

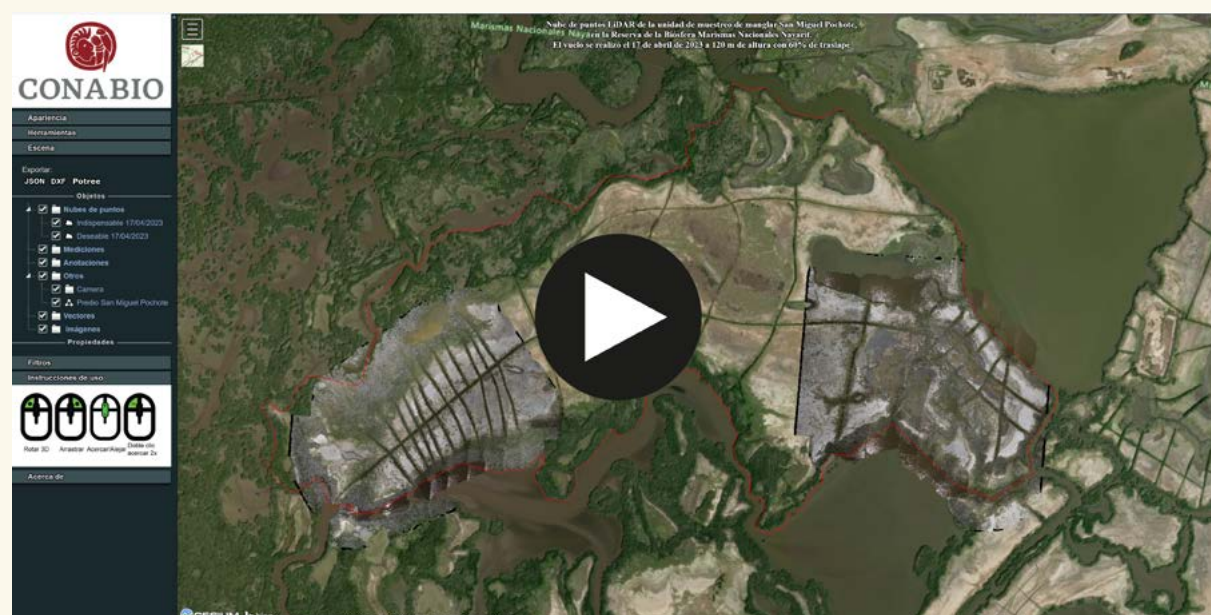


FIGURA 2.20

Visualizador de nubes de puntos LiDAR, en un sitio de restauración de manglares en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM Y DE ESRI.**



Foto: María Teresa Rodríguez Zúñiga

En otro visualizador, desarrollado en el marco de esta guía, se pueden observar dos productos, el primero son los mosaicos fotográficos obtenidos de los vuelos de dron que consta de la unión de fotografías verticales individuales, este producto se generó en el programa *OpenDrone Map*. En éste se despliega

un mapa de alturas de la vegetación y cobertura de suelo generado a partir de la información LiDAR y un modelo digital de superficie registrado en los vuelos. Para este ejercicio, se establecieron seis clases: 1) agua, 2) suelo desnudo y zonas anegadas, 3) plántulas de manglar y vegetación halófila que corresponde a menos de 1.30 m, 4) manglar juvenil y otra vegetación mayor a 1.3 m pero menor a 3 m, 5) manglares y otra vegetación mayor a 3 m pero menor de 5 m y 6) manglares y otra vegetación mayor a cinco metros (**FIGURA 2.21**).



FIGURA 2.21

Visualizador de mosaicos fotográficos de dron y mapas de altura en un sitio de restauración de manglares en Marismas Nacionales, Nayarit. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL SMMM Y DE ESRI.**

Todas estas herramientas formarán parte del *Observatorio de la Restauración de Manglares*. Esperamos que estas herramientas proporcionen información espacialmente explícita que apoye a la toma de decisiones para la recuperación de este importante ecosistema.

Foto: Carlos Troche Souza



2.5 Monitoreo a través de modelos hidrodinámicos

Foto: María Teresa Rodríguez Zúñiga

Una parte fundamental en la restauración en zonas de manglar es entender y en caso necesario, buscar la rehabilitación de la dinámica hidrosedimentaria favorable para el crecimiento de la vegetación, que marca el comportamiento del hidropereodo y, con base en los hallazgos, redirigir las acciones en caso de que se observe que la restauración no se está logrando como se desea. El monitoreo de este aspecto, depende de las acciones que se hayan establecido en el plan, y se puede realizar desde los de bajo hasta los de alto costo. Algo indispensable en cada una de las técnicas es el registro de las coordenadas donde se realizaron los registros o donde se encuentran instalados los aparatos. A continuación, se presentan algunas alternativas de bajo costo:

Estaciones hidrométricas

Si en el sitio de restauración la fuente de agua dulce existe una estación hidrométrica, se pueden asociar áreas de inundación y tirantes de agua a los registros de la estación hidrométrica. De este modo podemos generar un monitoreo de las necesidades de agua dulce en el sitio de restauración y lograr el hidropereodo para una restauración exitosa. Analizar los datos de las estaciones hidrométricas permite conocer si existe variabilidad en los escurrimientos medios diarios, mensuales y anuales (**FIGURA 2.22**).



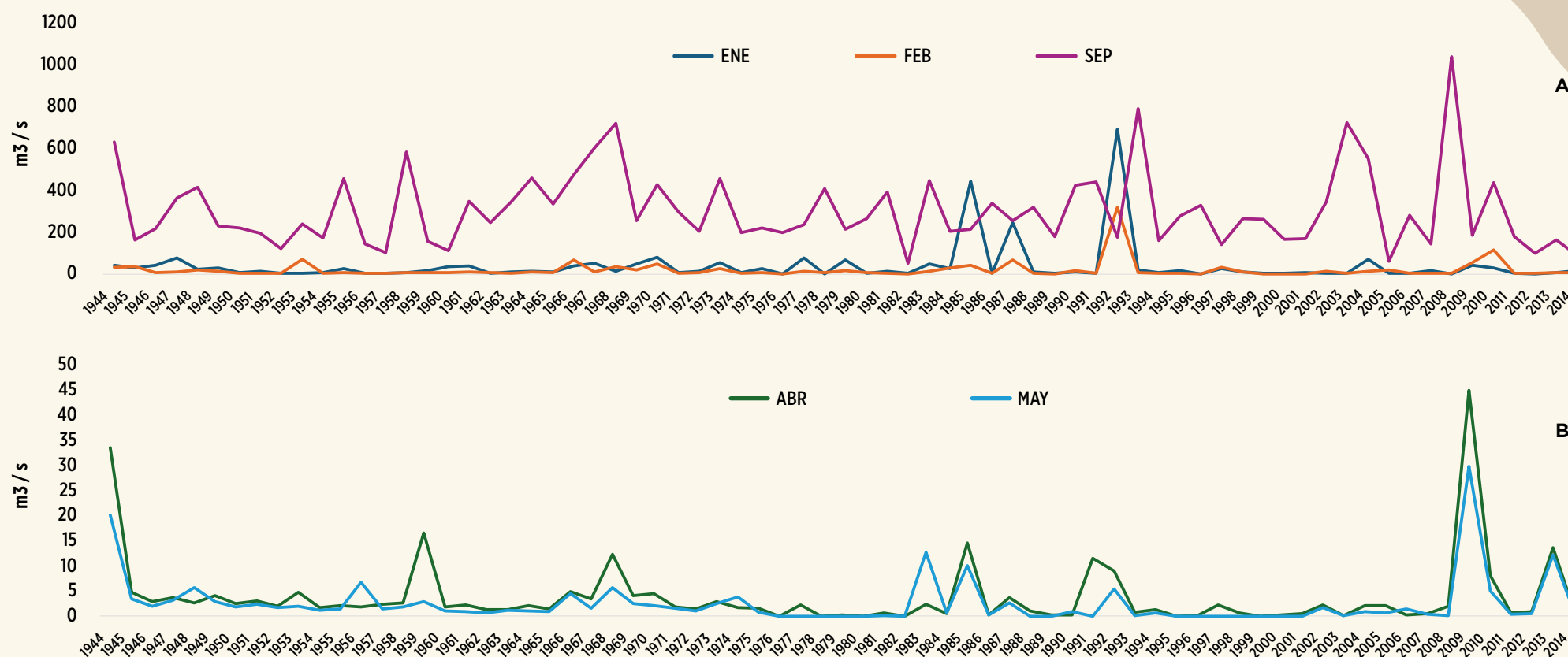


FIGURA 2.22

Análisis del régimen hidrológico en una zona con presencia de manglares. A) Muestra el caudal medio mensual que representa el régimen hidrológico, B) Se observan los escurrimientos mensuales en los diferentes años de registro de la estación. En los meses de enero y febrero que son parte del periodo de estiaje presentan años muy lluviosos, mientras que en los meses de mayo y abril son muy homogéneas presentando los caudales mínimos. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE CONAGUA.**

El análisis de la información hidrométrica se puede apoyar con análisis de imágenes de satélite (ver apartado 2.2 de esta guía), asociando los caudales registrados en la estación con las áreas identificadas con el resultado del procesamiento de los insumos satelitales, este análisis dependerá de la extensión de las áreas de restauración.

Escalas graduadas

Para el monitoreo y evaluación de los canales que se hayan rehabilitado o aperturado, de una manera sencilla se pueden instalar escalas graduadas que permitirán registrar datos del tirante dentro, fuera de los canales y en el área de restauración (**FIGURA 2.23**). Esta es una de las actividades en las que se puede involucrar a los pobladores locales, para realizar el monitoreo de los niveles que alcanza el agua en las zonas intervenidas. Se pueden establecer brigadas que reciban capacitación por parte de especialistas en la materia, esta actividad se facilitará con la generación de formatos de registros para que la información sea homogénea, se capture correctamente para evitar errores que provoquen la pérdida de información y sentido los registros.

Es necesario desarrollar el monitoreo comunitario capacitado para generar datos confiables que permitan evaluar las acciones realizadas. La gente local es clave.



FIGURA 2.23

Colocación de escalas graduadas en ríos y canales para el monitoreo de niveles y caudales.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF Y ECOSUR-GRUPO DE MONITOREO DE AGUADAS DE LA SELVA MAYA.

Estadal y cámara fotográfica

Otra manera de monitorear las acciones de la apertura de canales y el impacto en las áreas de restauración, es haciendo uso de un estadal o regleta graduada y una cámara fotográfica, que puede ser incluso la de un teléfono celular, el procedimiento es muy simple. El estadal o regleta graduada se coloca en el fondo del canal rehabilitado y se toma una fotografía del nivel que alcanza el agua en la graduación del estadal o de la regleta (**FIGURA 2.24**). Posteriormente si el agua ya superó los bordos de los canales, se toman varios registros de los niveles del agua alcanzados en el sitio de restauración y el área circundante hasta donde sea posible.



FIGURA 2.24

Medición del tirante de agua con estadal y cámara fotográfica. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF MÉXICO. GEOMAR.**

Para el monitoreo, igual que en el caso anterior, se pueden capacitar a habitantes de la zona para realizar las mediciones de forma sistemática, para lo cual es necesario proporcionarles el estadal o regleta graduada y la cámara fotográfica, así como el formato para la captura de los datos. En caso de no contar

con un estadal o regleta graduada, también se podría usar una rama o madera no graduada y con un flexómetro se toma la medida de la parte que queda dentro del cauce, la limitante de este método es que al hacer varias medidas y estar mojada la rama o madera será difícil ver en cada medida cual fue el nivel alcanzado por el agua. Las mediciones, dependiendo de las posibilidades, se pueden realizar quincenal o mensualmente o al menos en el periodo de estiaje y de lluvias.

Escalas y cámaras trampa

Otro método que se puede aplicar para los monitoreos de las acciones implementadas para la restauración de manglar, a través de la rehabilitación o apertura de canales secundarios, es la instalación de escalas como en el caso anterior, pero ahora instalando también cámaras trampa, lo que permitirá llevar un registro de los niveles y áreas de inundación, tanto en los canales como fuera de ella, específicamente en el área donde se realizó la restauración, con registros tomados de forma sistemática por la cámara trampa (**FIGURA 2.25**).

Las cámaras trampa, aparte de cumplir con el monitoreo de especies, apoyan en el monitoreo de los niveles de los cuerpos de agua. Es importante la optimización de los recursos financieros y humanos para el logro de los diferentes objetivos.



FIGURA 2.25

Escala en cuerpos de agua e instalación de cámara trampa. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL GRUPO DE MONITOREO DE AGUADAS SELVA MAYA.

La recopilación de datos de la cámara trampa se puede hacer una vez al mes, cada tres meses, cada seis meses o anual, todo depende de la capacidad de almacenamiento de datos de la cámara con que contemos o de las necesidades específicas de los datos de acuerdo con el plan del proyecto de restauración. Se recomienda recopilar los datos no más allá de seis meses en las fases iniciales con la finalidad de revisar el adecuado estado y funcionamiento de la cámara y de la escala.

En la siguiente sección se describen algunos métodos que requieren un poco más de presupuesto para llevarlos a cabo como parte del monitoreo de las áreas de restauración.

Sensores barométricos (HOBO)

El procedimiento es muy similar a los explicados anteriormente, solo que en vez de regletas o estadales se utilizan sensores barométricos comúnmente conocidos como HOBOS, por lo que en estos métodos se requiere de mayor presupuesto. Los HOBOS se instalan en algún punto o puntos de la plantilla de los canales rehabilitados o aperturados y fuera de los canales, por ejemplo, en las áreas de inundación del sitio de restauración (**FIGURA 2.26**).

Se sugiere incluir la adquisición e instalación de sensores que nos apoyen con el monitoreo, de este modo se hace la transferencia de tecnología a las comunidades.



FIGURA 2.26

HOBO e instalación en el cauce para medición indirecta de tirantes de agua.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF Y ECOSUR.

El objetivo de utilizar esta técnica es registrar datos de los niveles de agua dentro de los canales, fuera de ellos (área de inundación) y en las áreas de restauración, que permitan evaluar el funcionamiento de los canales en la rehabilitación de la dinámica hidrosedimentaria. Esta información ayuda a calibrar, validar y mejorar los modelos hidráulicos, para generar escenarios a un costo medio.

Monitoreo de agua subterránea (piezometría)

Muchas veces se concentran los esfuerzos en monitorear las aguas superficiales en los sitios de restauración de manglares y se deja sin atender las aguas subterráneas. Con el trabajo realizado para la selección del sitio, y ya con la red piezométrica establecida para el área de restauración, se deben conformar brigadas para el monitoreo de la profundidad del nivel del agua subterránea en todos los pozos o norias que conforman dicha red (**FIGURA 2.27**).

Al igual que en los otros métodos es necesario realizar una capacitación de las brigadas de monitoreo por parte de los especialistas en el tema, lo cual reducirá los costos de traslados de los especialistas a los sitios, se promueve la transferencia de conocimientos y tecnologías y se genera un vínculo de responsabilidad compartida con los todos los involucrados.

Los datos obtenidos con este método permitirán generar líneas de igual profundidad o elevación del nivel estático⁵⁵ de las aguas subterráneas (**FIGURA 2.28**), conociendo si las aportaciones de estas aguas al área o áreas de restauración se mantienen, aumentan o disminuyen.

.....

55 El nivel estático se refiere a la profundidad a la que se encuentra el agua dentro del pozo cuando no se está bombeando.

Es necesario realizar una capacitación de las brigadas de monitoreo por parte de los especialistas en el tema, promoviendo la transferencia de conocimientos y tecnologías y se genera un vínculo de responsabilidad compartida con los todos los involucrados.



FIGURA 2.27

Medición de la profundidad del agua en norias y pozos. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL GRUPO DE WWF MÉXICO. FOTOS: RICARDO DOMÍNGUEZ VARELA.

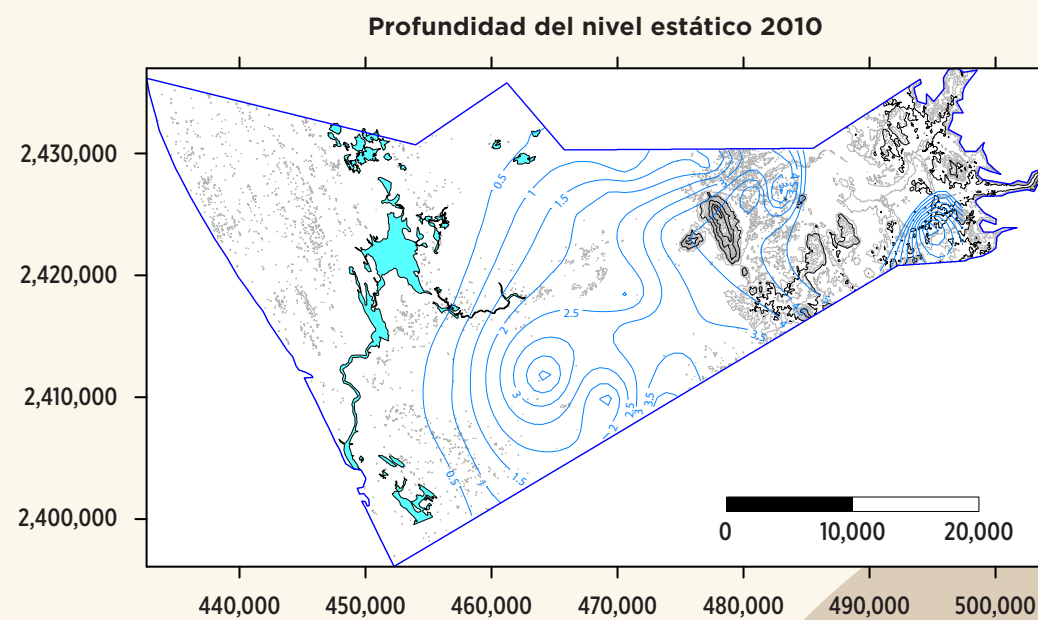
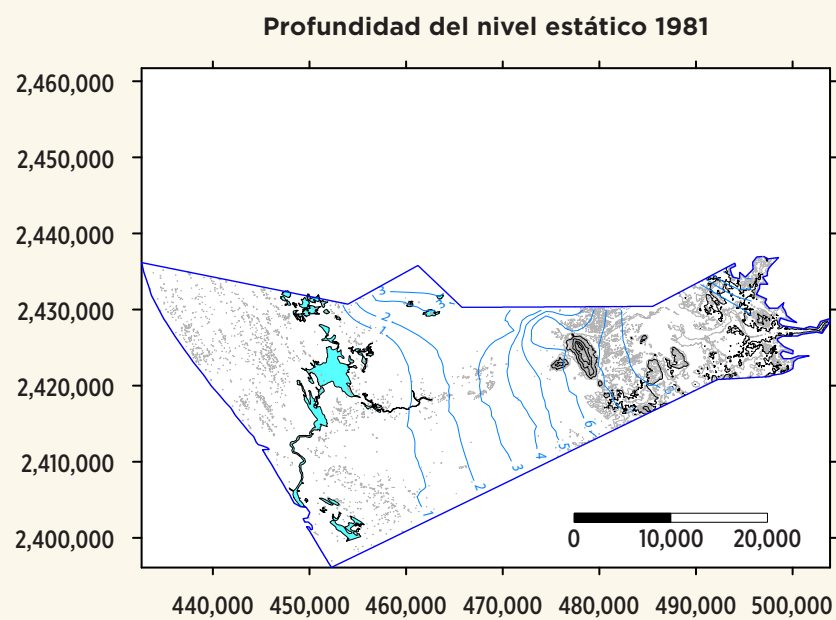


FIGURA 2.28

Profundidad del nivel estático en los años 1981 y 2010 en un sitio de restauración de manglares en Marismas Nacionales, Nayarit. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF MÉXICO.

Monitoreo mediante modelos hidráulicos

Otra alternativa para realizar el monitoreo espacial en la restauración de manglares es con el apoyo de los modelos hidráulicos, los cuales requieren mayores recursos económicos. Estos modelos permiten generar escenarios y alternativas en los procesos de restauración (**FIGURA 2.29**). Sin embargo, se debe tener presente que, hasta este momento, estos modelos requieren de una continua actualización con datos generados en campo o de información generada por las dependencias gubernamentales u otras fuentes, para este caso, el usuario de los datos se debe asegurar que los registros cumplan con la normatividad vigente y estén validados por las dependencias.

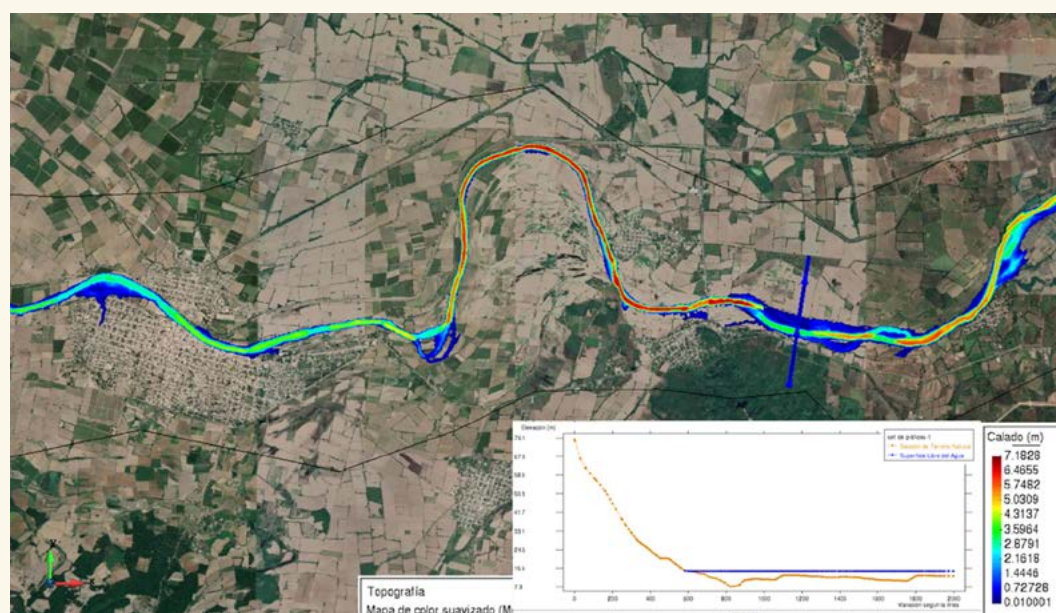


FIGURA 2.29

Modelo hidráulico del río San Pedro Mezquital, en el estado de Nayarit y sección con niveles de inundación, generado con Iber⁵⁶. **FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE WWF MÉXICO.**

Los modelos hidráulicos son muy útiles cuando existe infraestructura de vías de comunicación que perturban los flujos de

56 Iber es un modelo matemático bidimensional, que incluye un módulo hidrodinámico para la simulación de flujos de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así el cálculo de avenidas e inundaciones y la delimitación de zonas inundables

La hidráulica de ríos ayuda a generar escenarios de áreas de inundación y apoyan desde la selección de sitios a restaurar y en los monitoreos de las acciones de restauración de manglares, como la apertura y desazolve de canales dentro del ecosistema.

agua naturales (**FIGURA 2.30**), a través de ellos se puede evaluar el impacto o también a manera de prevención de afectaciones y favorecer su conservación. La generación de estos modelos es necesaria para diseñar las obras de drenaje aminorando el impacto y aumentando la conservación y resiliencia del ecosistema.

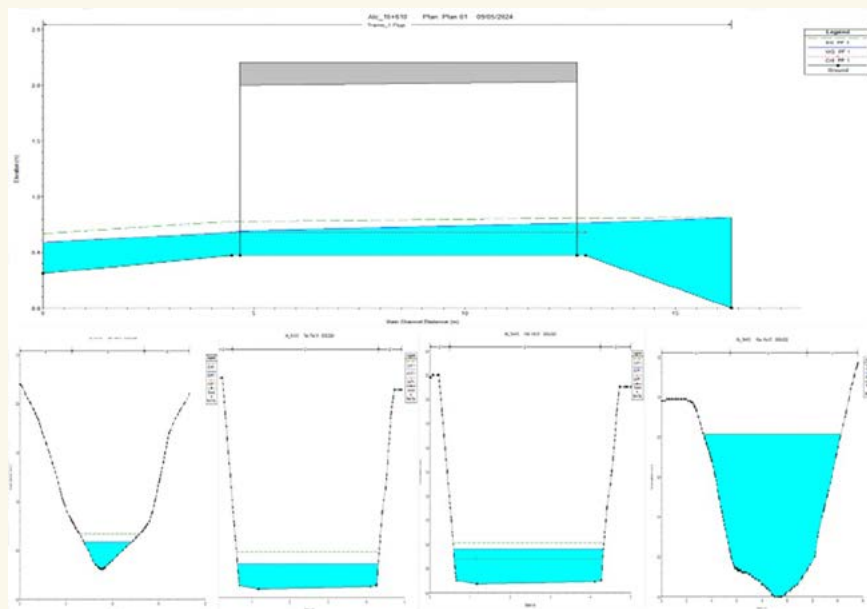


FIGURA 2.30

Modelo hidráulico de alcantarilla en la carretera Unión de Corrientes-Santa Cruz, Nayarit.

FUENTE: WWF MÉXICO.

Foto: J. Alberto Alcántara Maya



Consideraciones finales

Para un avance continuo en el entendimiento de la dinámica de la restauración de un ecosistema complejo, como lo son los manglares, se requiere de un esfuerzo colectivo de aprendizaje y retroalimentación, con el propósito de reducir tiempos y lograr mejores resultados.

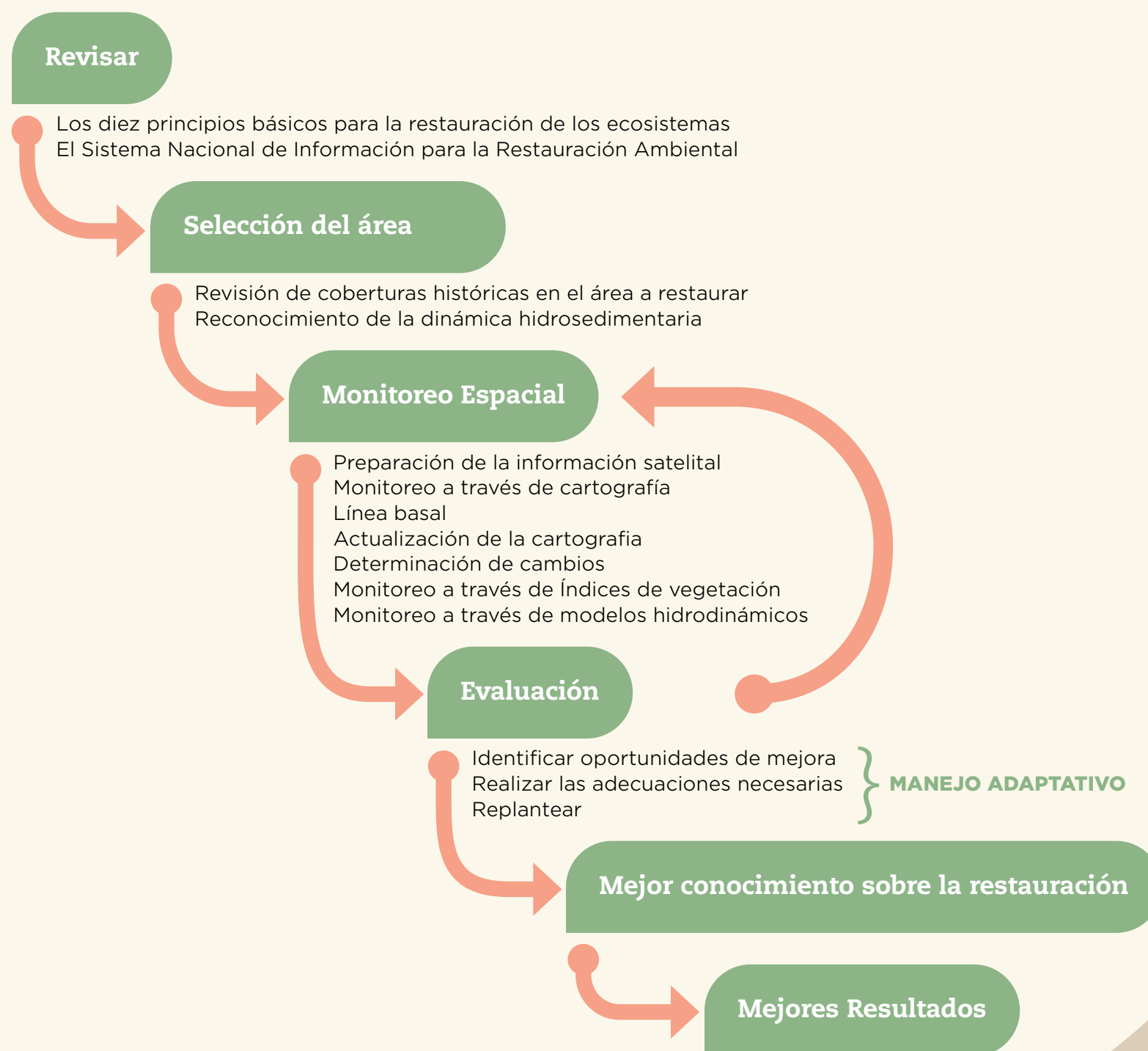
Hasta ahora los esfuerzos de restauración en los manglares de México han sido realizados a pequeña escala, en áreas concretas y en muy pocas ocasiones han considerado la restauración con una perspectiva de la ecología del paisaje.

Una de las más grandes deficiencias en los esfuerzos de restauración, a nivel mundial, es el escaso o nulo monitoreo espacial de las áreas restauradas, lo que limita la cuantificación del grado de avance, al menos en términos de superficie, por lo que es importante comenzar a integrar de forma sistemática esta actividad en los proyectos de restauración.

Esta guía pretende aportar información que permita transitar de forma más acelerada hacia la ejecución de acciones de monitoreo espacial de la restauración, esperamos que cumpla su objetivo. El equipo de trabajo del SMMM de la Coordinación de Sistemas, Monitoreo e Información Geoespacial de la CONABIO queda atento por si surge alguna inquietud o sugerencia sobre alguno de los temas o plataformas comentadas en esta publicación.



A continuación, se presenta un esquema que resume de forma general lo que se propone en esta guía para la selección de áreas a restaurar y su monitoreo, desde un enfoque espacial, para que en forma gráfica se identifiquen los temas a considerar en el monitoreo:



Lista de siglas utilizadas

- AMC: Área Mínima Cartografiable
- CEM: Continuo de elevaciones mexicano
- CFE: Comisión Federal de Electricidad
- CMRI: Índice de Reconocimiento de Manglares Combinado
- CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- CONAFOR: Comisión Nacional Forestal
- CONAGUA: Comisión Nacional del Agua
- EMA: Estación Meteorológica Automática
- EMVI: Índice Mejorado de Vegetación de Manglar
- ESA: Agencia Espacial Europea
- ESMA: Estación Sinóptica Meteorológica Automática
- EVI: Índice de Vegetación Mejorado
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
- LIDAR: Light Detection and Ranging, por sus siglas en ingles
- MSAVI2: Índice Modificado de Vegetación Ajustado al Suelo
- NDMI: Índice de Diferencia Normalizada de Manglares
- NDSI: Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada
- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
- NDWI: Índice de Agua de Diferencia Normalizada
- ROI: Región de interés (por sus siglas en inglés)
- SIATL: Simulador de flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
- SMMM: Sistema de Monitoreo de los Manglares de México
- SMN: Servicio Meteorológico Nacional
- SNIRA: Sistema Nacional de Información para la Restauración Ambiental
- WWF: World Wildlife Fund Inc.

Referencias bibliográficas

- AGAFONKIN, V. (2023). Leaflet an open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps. <https://leafletjs.com/>
- AGUILAR-GARAVITO, M. y Ramírez, W. (Eds.). (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá D.C., Colombia. 250 pp. https://www.researchgate.net/publication/282978641_Monitoreo_a_procesos_de_restauracion_ecologica_aplicado_a_ecosistemas_terrestres
- ALONGI, D. (2020). Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation. *Sci.* 2(3), 67 pp. <https://doi.org/10.3390/sci2030067>
- ALJAHDALI, M., Munawar, S. y Khan, W. (2021). Monitoring Mangrove Forest Degradation and Regeneration: Landsat Time Series Analysis of Moisture and Vegetation Indices at Rabigh Lagoon, Red Sea. *Forests.* 12(1), 52 pp. <https://doi.org/10.3390/f12010052>
- ARCEO-CARRANZA, D., Gamboa, E., Teutli-Hernández, C., Badillo-Alemán, M. y Herrera-Silveira, J. (2016). Los peces como indicador de restauración de áreas de manglar en la costa norte de Yucatán. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* 87(2), 489 – 496 pp.

- BEESTON, M., Cameron, C., Hagger, V., Howard, J., Lovelock, C., Sippo, J., Tonneijk, F., van Bijsterveldt, C. y van Eijk, P. (Eds.). (2023). Pautas de mejores prácticas para la restauración de manglares. https://www.mangrovealliance.org/wp-content/uploads/2023/12/Spanish_Executive-Summary_Best-Practice-Mangrove-Restoration-Guidelines.pdf
- BENTLEY. (2025). CesiumJS The platform for 3D Geospatial. <https://cesium.com/>
- COMISIÓN NACIONAL FORESTAL. (2011). Recomendaciones para las actividades de restauración de manglares. Coordinación General de Conservación y Restauración. SEMARNAT. 17 pp.
- CHUVIECO, E. (2002). Teledetección ambiental. Ed. Ariel Ciencia, Madrid, pp. 48, 87-97, 162, 168-170, 232, 323-326.
- CRUZ-LÓPEZ, M., Rodríguez-Zúñiga, M., Velázquez-Salazar, S. y Ressler, R. (2022). La geografía como componente fundamental del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México. En Silva López G. y Ramírez Salazar M. (Coordinadores). Geografía y Conservación: Conceptos e investigaciones. Universidad Veracruzana. 344 pp.
- DARMAWAN, A., Setyaningrum, N., Afifuddin, S. y Habibie, M. (2022). Is the Mangrove Restoration and Rehabilitation Program Successful in Riau Province, Indonesia? IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology: Understanding the Interaction of Land, Ocean, and Atmosphere: Smart City and Disaster Mitigation for Regional Resilience, AGERS 2022 - Proceeding, 183-188 pp. <https://doi.org/10.1109/AGERS56232.2022.10093595>

DE JONG, R., Verbesselt, J., Zeileis, A. y Schaepman, M. (2013). Shifts in global vegetation activity trends. *Remote Sensing*. 5(3), 1117-1133 pp.

DUCRE-ROBITAILLE, J., Vincent, L. y Boulet, G. (2003). Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series. *Int. J. Climatol*. 23(9), 1081-1101 pp.

EOS DATA ANALYTICS. (2022). Vegetation Indices To Drive Digital Agri Solutions. <https://eos.com/blog/vegetation-indices/>

FABIJAŃCZYK, P. y Zawadzki, J. (2022). Spatial correlations of NDVI and MSAVI2 indices of green and forested areas of urban agglomeration, case study Warsaw, Poland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 26, 100721 pp. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100721>

FAO, CGE UICN Y SER. 2021. Principios para la restauración de los ecosistemas como guía para el Decenio de las Naciones Unidas 2021-2030. Roma, FAO

FREIE UNIVERSITÄT BERLIN (FUB). (s.f.). Raster and Vector Code: Clip and Reduce. Google Earth Engine Platform for Big Data Processing. <https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/geo-it/gee/1-introduction-to-gee/1-2-introduction-to-the-gee/clip-reduce/index.html>

GOOGLE EARTH ENGINE (GEE). (2021). Reducer Overview. https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_intro

HUANG, S., Tang, L., Hupy, J., Wang, Y. y Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation

index (NDVI) in the era of popular remote sensing. Northeast Forestry University. *Journal of Forestry Research*. 32(1). <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

ISAACS-CUBIDES, P., Ramírez, W., Linares-Palomino, R., Rodríguez, R., Freitas, J., Echeverría, C., Rojas-Zamora, O., Gómez-Anaya, W., Hernández, A., Andres, P., Brancalion, P. y Castllo, J. (2017). Análisis espacial y su importancia para la restauración (Simposio). IV Congreso Iberoamericano y del Caribe de Restauración Ecológica (2015). Simposio de análisis espacial y su importancia para la restauración. Buenos Aires, Argentina.

ITOH, N. y Kurths, J. (2010). Change-point detection of climate time series by nonparametric method. World Congress on Engineering and Computer Science.

KEENLEYSIDE, K., Dudley, N., Cairns, S., Hall, C. y Stolton, S. (2014). Restauración Ecológica para Áreas Protegidas: Principios, directrices y buenas prácticas. Gland, Suiza: UICN. x + 118 pp.

LÓPEZ-RASGADO, F., Uscanga-Martínez, J., Díaz-Gallegos, E., López-Arias, C. y Morales-Alfaro, A. (2022). Estructura trófica isotópica de la comunidad íctica en hábitats impactados y restaurados de la laguna La Joya-Buenavista, Tonalá, Chiapas. Informe.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). (1996). Forest Resources Assessment 1990. Forestry Paper. 130 pp.

R CORE TEAM. (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

REEVES, J., Chen, J., Wang, X., Lund, R. y Lu, Q. (2007) A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data. J. Appl. Meteorol. Climatol. 46(6), 900-915 pp.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, M., González-Zamorano, P., Nava-Sánchez, E., López-Portillo, J., Bejarano, M., Cruz-López, M., de la Cruz, A. y Ortega-Rubio, A. (2018). Marco de referencia para la integración y análisis de los manglares de México. En M. Rodríguez-Zúñiga, E. Villeda-Chávez, A. Vázquez-Lule, M. Bejarano, M. Cruz López, M. Olguín, S. Villela-Gaytán y R. Flores (Coordinadores). *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala* (pp. 71-124). CONABIO. Ciudad de México, México.

RODRÍGUEZ ZÚÑIGA M.T., E. Villeda Chávez, A. D. Vázquez-Lule, M. Bejarano, M. I. Cruz López, M. Olguín, S. A. Villela Gaytán, R. Flores (Coordinadores). 2018. Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. 272 pp.

SCHÜTZ, M., Ohrhallinger, S. y Wimmer, M. (2020). Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds. Computer Graphics Forum. 39(7), 155-167 pp. <https://doi.org/10.1111/cgf.14134>

STANTURF, J. (2004). "What is forest restoration?" in Restoration of boreal and temperate forests. CRC Press. 3-11 pp.

- SUN, C., Li, J., Cao, L., Liu, Y., Jin, S. y Zhao, B. (2020). Evaluation of vegetation index-based curve fitting models for accurate classification of salt marsh vegetation using sentinel-2 time-series. *Sensors (Switzerland)*. 20(19). <https://doi.org/10.3390/s20195551>
- TECUAPETLA-GÓMEZ, I., Carbajal-Domínguez, A. y Montesinos-Chica, V. (2022). Clasificación de tendencias de NDVI en la península de Yucatán, México, de 2014 a 2020. *Investigaciones geográficas*, (109). <https://doi.org/10.14350/rig.60629>
- TEUTLI-HERNÁNDEZ, C., Herrera-Silveira, J., Cisneros-de la Cruz, D. y Roman-Cuesta, R. (2020). Guía para la restauración ecológica de manglares: Lecciones aprendidas. Proyecto, Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A multi-level approach (SWAMP). CIFOR/CINVESTAV-IPN/UNAM-Sisal/PMC, 42 pp.
- TEUTLI-HERNÁNDEZ, C., Herrera-Silveira, J., Cisneros-de la Cruz, D., Arceo-Carranza, D., Canul-Cabrera, A., Robles-Toral, P., Pérez-Martínez, Sierra-Oramas, O., Zenteno, O., UsBalam, H., Pech-Poot, E., Chiappa-Carrara, X. y Comín, F. (2021). Manual for the ecological restoration of mangroves in the Mesoamerican Reef System and the Wider Caribbean. Integrated Ridge-to-Reef Management of the Mesoamerican Reef Ecoregion Project - MAR2R, UNEP-Cartagena Convention, Mesoamerican Reef Fund. Guatemala City, Guatemala.
- TRAN, T., Reef, R. y hu, X. (2022). A Review of Spectral Indices for Mangrove Remote Sensing. *Remote Sens*, (14), 4868. <https://doi.org/10.3390/rs14194868>

VALDERRAMA-LANDEROS L. H., Rodríguez-Zúñiga M.T., Troche-Souza C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J.A., Vázquez-Balderas B., Cruz-López M. I., Ressler R., 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980-2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, 128 pp.

VALDERRAMA-LANDEROS, L., Villeda-Chávez, H., Alcántara-Maya, J., Velázquez-Salazar, S., Troche-Souza, C., Vázquez-Balderas, B., Cruz-López, M., Rodríguez-Zúñiga, M. y Ressler R. (2022). Distribución de la especie *Rhizophora mangle* (mangle rojo) en la región Pacífico Norte y un sitio piloto en la península de Yucatán en el marco del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad – Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A. C. Ciudad de México. 106 pp.

VELÁZQUEZ-SALAZAR S., Rodríguez-Zúñiga M.T., Alcántara-Maya J.A., Villeda-Chávez E., Valderrama-Landeros L., Troche-Souza C., Vázquez-Balderas B., Pérez-Espinosa I., Cruz-López M. I., Ressler R., De la Borbolla D. V. G., Paz O., Aguilar-Sierra V., Hruby F. y Muñoa-Coutiño J. H. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México CDMX. Pp. 168

VERBESSELT, J., Hyndman, R., Zeileis, A. y Culvenor, D. (2010). Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*. 114(12), 2970-2980 pp.

- WARTMAN, M., Palacios, M., Nourice, B., Macreadie, P., Constance, A., Waryszak, P., Duarte de M. y Costa, P. (2025). Assessing blue carbon in mangrove ecosystems of Seychelles. *Journal of Environmental Management*, (374), 123967 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123967>
- WEATHERSPARK. (2023). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Rosamorada. <https://es.weatherspark.com/y/3439/Clima-promedio-en-Rosamorada-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- XIA, Q., Qin, C., Li, H., Huang, C., Su, F. y Jia, M. (2020). Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data. *Ecological Indicators*, (113), 106196 pp. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106196>
- YANCHO, J., Jones, T., Gandhi, S., Ferster, C., Lin, A. y Glass, L. (2020). The Google Earth Engine Mangrove Mapping Methodology (GEEMM). *Remote Sensing*. 12(22), 3758 pp. <https://doi.org/10.3390/rs12223758>
- YOUNES, N., Joyce, K., Northfield, T. y Maier, S. (2019). The effects of water depth on estimating Fractional Vegetation Cover in mangrove forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (83), 101924 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101924>



Foto: Carlos Troche Souza

En la actualidad, específicamente el tema de la restauración de manglares se encuentra en una importante coyuntura, debido a que las metas de restauración de este ecosistema son de la más alta prioridad en el ámbito mundial, derivadas del importante papel que juegan en la mitigación del cambio climático.

En el marco del proyecto *Fortalecimiento del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México*, financiado a la CONABIO por el World Wildlife Fund Inc. (WWF) con el apoyo del Bezos Earth Fund, se realizó un ejercicio para generar métodos para el monitoreo espacial y de las características biofísicas de los sitios de restauración. Los resultados obtenidos se comparten en esta guía, los métodos utilizados pueden ser aplicados o adaptados a otros sitios del país, en los que los manglares están siendo intervenidos con acciones de restauración.

Se espera que los métodos propuestos y las consideraciones generales presentadas en esta guía permitan realizar un mejor monitoreo de la recuperación de las áreas en restauración, que conlleven a eficientizar los recursos tanto humanos como financieros que se destinan a dichos procesos.