



COMISIÓN PARA
LA COOPERACIÓN
AMBIENTAL

Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras



**Monitoreo de la
eficacia: metodología e
indicadores propuestos**

Conjunto de documentos de orientación:



Cobeneficios



**Monitoreo
de la eficacia**



**Reconversión
de infraestructura
en pie**

Citar como:

CCA (2025), *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos – Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a riesgos por inundación en comunidades costeras*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, xii-88 pp.

La presente publicación fue elaborada por DHI Water and Environment Inc. para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). La información que contiene es responsabilidad del autor y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción total o parcial de este material, en cualquier forma o medio, con propósitos educativos y sin fines de lucro, sin que sea necesario obtener autorización expresa por parte del Secretariado de la CCA, siempre y cuando se haga con absoluta precisión y se cite debidamente la fuente. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo “Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada”, de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, 2025

ISBN: 978-2-89700-368-5

Available in English – ISBN: 978-2-89700-366-1

Disponible en français – ISBN: 978-2-89700-367-8

Depósito legal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025

Depósito legal – Library and Archives Canada, 2025

Detalles de la publicación

Categoría del documento: publicación de proyecto

Fecha de publicación: junio, 2025

Idioma original: inglés

Procedimientos de revisión y aseguramiento de calidad:

Revisión final de las Partes: marzo, 2025

QA387

Proyecto: Plan Operativo, 2021 / *Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en ciudades costeras*

Si desea más información sobre esta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a:

Comisión para la Cooperación Ambiental

1001 boulevard Robert-Bourassa, bureau 1620

Montréal, Québec, Canada H3B 4L4

t 514.350.4300; f 438.701.1434

info@cec.org / www.cec.org



Índice

Siglas, acrónimos y abreviaturas	iv
Sinopsis.....	v
Resumen ejecutivo.....	v
Prefacio	x
Agradecimientos.....	xi
1 Introducción a la metodología propuesta	1
1.1 Objetivos y alcance	2
1.2 Principios rectores	3
1.3 Definiciones clave	4
1.4 Lecturas complementarias	5
2 Metodología de monitoreo propuesta.....	5
2.1 Proceso de monitoreo	5
2.2 Pensamiento sistémico en el monitoreo	7
2.3 Metodología general.....	8
2.3.1 Enfoque BACI	9
2.3.2 Enfoque RCA.....	10
2.3.3 Otros enfoques	12
2.3.4 Consideraciones metodológicas generales.....	13
3 Criterios de medición, indicadores de desempeño y técnicas de monitoreo	15
3.1 Aspectos generales de las categorías de desempeño	17
3.2 Indicadores de manejo de riesgos por inundación y técnicas de monitoreo.....	23
3.2.1 Criterios de medición básicos.....	23
3.2.2 Criterios de medición adicionales	27
3.3 Indicadores ambientales y técnicas de monitoreo	30
3.3.1 Criterios de medición básicos.....	30
3.3.2 Criterios de medición adicionales	37
3.4 Indicadores sociales y técnicas de monitoreo.....	41
3.4.1 Criterios de medición básicos.....	41
3.4.2 Criterios de medición adicionales	45
3.5 Indicadores económicos y técnicas de monitoreo	46
3.5.1 Criterios de medición básicos.....	47
3.5.2 Criterios de medición adicionales	49

4 Consideraciones especiales relacionadas con el tipo de ecosistema y de SbN.....	52
4.1 Playas y dunas	52
4.2 Humedales y bajos intermareales	55
4.3 Islas	59
4.4 Bosques costeros y zonas boscosas	63
4.5 Elementos sumergidos.....	64
4.6 Elementos híbridos	67
4.7 Análisis adicional referente a las técnicas	70
5 Consideraciones en torno al análisis, la disponibilidad y la difusión de datos.....	72
6 Oportunidades y orientaciones futuras.....	74
7 Conclusiones	76
Bibliografía	78

Lista de cuadros

Cuadro 1. Ejemplo de objetivos fundamentales de un proyecto y los correspondientes criterios de medición e indicadores de desempeño seleccionados en el plan de monitoreo.....	15
Cuadro 2. Criterios de medición del desempeño organizados por categoría de beneficio y objetivos del proyecto para diferentes ecosistemas y tipos de SbN	19
Cuadro 3. Criterios de medición básicos para el manejo de riesgos por inundación, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas ...	25
Cuadro 4. Criterios de medición adicionales para el manejo de riesgos por inundación, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas ..	28
Cuadro 5. Criterios de medición básicos para cobeneficios ambientales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas	32
Cuadro 6. Lista de métodos de monitoreo con indicadores de desempeño.....	36
Cuadro 7. Criterios de medición adicionales para cobeneficios ambientales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas ...	38
Cuadro 8. Criterios de medición básicos para cobeneficios sociales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas	42
Cuadro 9. Criterios de medición adicionales para cobeneficios sociales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas	46
Cuadro 10. Criterios de medición básicos para cobeneficios económicos, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas	48
Cuadro 11. Criterios de medición adicionales para cobeneficios económicos, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas	49
Cuadro 12. Posibles consideraciones e implicaciones para la selección de técnicas en un programa de monitoreo de humedales intermareales	71

Lista de gráficas

Gráfica 1. Marco de monitoreo	6
Gráfica 2. Vista aérea oblicua del sitio de reposicionamiento controlado del dique de Converse, en el istmo de Chignecto.....	11
Gráfica 3. Ejemplos de análisis espacial y estadístico para planes de monitoreo BACI, BA, CI y RCA	13
Gráfica 4. Estado sin vegetación tras la construcción (año 1) y estado con vegetación (año 4)	36
Gráfica 5. Contabilidad de los ecosistemas y cómo los criterios de medición e indicadores básicos interaccionan y se relacionan entre sí.....	51
Gráfica 6. Cambios en el sistema de playas y dunas: antes (2006) y después de los trabajos de restauración (2011)	54
Gráfica 7. Instalación de un nuevo paseo marítimo sobre las dunas para facilitar el acceso a la playa	54
Gráfica 8. Instalación de nuevo paso de agua en 2005	58
Gráfica 9. Marisma de Cheverie a quince años de su restauración	58
Gráfica 10. Isla Poplar: plano del sitio	62
Gráfica 11. Sitio Bronx Kill: elementos basados en la naturaleza y ubicación de los puntos de monitoreo	64
Gráfica 12. Cobertura de lechos de pasto marino en las cuatro bahías en cuatro momentos: 2001, 2006, 2010 y 2018	66
Gráfica 13. Bocetos y fotografía de estructura de biomimetismo dunar	69

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ADCP	perfilador acústico de corrientes por efecto Doppler (del inglés: <i>acoustic Doppler current profiler</i>)
BACI	metodología de evaluación “antes-después, control-impacto” (del inglés: <i>before-after, control-impact</i>)
CABIN	Red Canadiense de Biomonitorio Acuático (<i>Canadian Aquatic Biomonitoring Network</i>)
CBWES	empresa CB Wetlands and Environmental Specialists
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CH ₄	metano
CO ₂	dióxido de carbono
DHI	empresa DHI Water and Environment Inc.
FAIR	[datos] localizables, accesibles, interoperables y reutilizables (del inglés: <i>findable, accessible, interoperable, and reusable</i>)
LiDAR	tecnología de detección y localización por ondas luminosas [telemetría de luz] (por sus siglas en inglés)
MDE	modelo digital de elevación (del terreno)
MRI	manejo de riesgos por inundación
NO ₂	dióxido de nitrógeno
O ₂	oxígeno
pH	potencial de hidrógeno
RCA	enfoque de condición de referencia (del inglés: <i>Reference Condition Approach</i>)
RTK GPS	sistema de posicionamiento global cinemático en tiempo real (del inglés: <i>Real-time Kinematic Global Positioning System</i>)
SbN	solución basada en la naturaleza
SCAE	Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica
SIG	sistema de información geográfica
SMART	Enfoque SMART (con objetivos específicos, medibles, alcanzables, pertinentes y con plazos establecidos)
SSS	sonar de barrido lateral (del inglés: <i>sidescan sonar</i>)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

Sinopsis

El manejo de riesgos por inundación (MRI) constituye una de las principales preocupaciones en zonas costeras urbanas y periurbanas, sobre todo ante el aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático. En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) brindan la posibilidad de alcanzar muchos de los objetivos en materia de MRI, al tiempo que aportan cobeneficios sociales, ambientales y económicos. No obstante, su adopción e implementación se ven limitadas por la incertidumbre percibida en torno a su eficacia. El monitoreo de las SbN sirve de base para constatar los éxitos tangibles de su implementación y poner de manifiesto los aprendizajes asociados, y es una de las herramientas de que disponen quienes tienen a su cargo la toma de decisiones a efecto de gestionar y mitigar las incertidumbres asociadas a tales soluciones.

Con el propósito de contribuir al impulso y adopción de SbN en comunidades costeras de Canadá, Estados Unidos y México, el presente informe —de utilidad sobre todo para responsables de la toma de decisiones y para quienes se ocupan de la implementación de proyectos— proporciona información práctica y orientación en relación con el monitoreo de este tipo de soluciones. Además de orientar acerca de tipos de SbN y ecosistemas específicos e identificar oportunidades de trabajo futuro al respecto, se incluyen prácticas idóneas para la formulación de programas de monitoreo; consideraciones relativas a la selección de criterios de medición, indicadores de desempeño y metodologías de monitoreo, y estudios de caso que ilustran cómo se han aplicado los programas de monitoreo en los tres países de América del Norte.

Resumen ejecutivo

El monitoreo es un componente esencial de todos los proyectos de manejo de riesgos por inundación (MRI), incluidos aquellos en los que se aplican soluciones basadas en la naturaleza (SbN). En el presente informe se examinan las metodologías y técnicas específicas utilizadas en la elaboración de programas de monitoreo para proyectos costeros de implementación SbN en zonas costeras. Con el fin de determinar si un proyecto está cumpliendo sus objetivos de desempeño y orientar el manejo adaptativo, resulta indispensable llevar a cabo una labor de monitoreo. Las recomendaciones descritas en este documento se basan en una revisión exhaustiva de la bibliografía internacional sobre el tema y también en los resultados de talleres celebrados con la participación de especialistas en el marco del proyecto de la CCA dirigido a orientar la implementación generalizada de SbN como medida de MRI en comunidades costeras de América del Norte.

Etapas del monitoreo

En general, el monitoreo debe considerarse como un proceso continuo que comienza antes de la implementación de los proyectos de SbN y que permite hacer un seguimiento de su eficacia con respecto a los resultados esperados y a criterios de desempeño específicos. Los programas de monitoreo suelen comprender las siguientes fases clave:

- **Delimitación del alcance:** Identificar la escala y el alcance del plan de monitoreo y de manejo adaptativo; priorizar las acciones; definir las partes interesadas (incluidas las poseedoras o titulares de derechos), y trazar las estrategias de financiamiento. Durante esta fase conviene establecer mecanismos de participación temprana y significativa.
- **Planificación:** Determinar los parámetros de interés; establecer criterios de medición e indicadores de desempeño; realizar un inventario de las redes de monitoreo con que se cuenta, e identificar tanto lagunas de datos como posibles recursos y personal para llevar a cabo el programa de monitoreo.

- **Diseño:** Preparar —antes de dar inicio a la implementación del proyecto— un programa de monitoreo que incluya el monitoreo de las condiciones iniciales de referencia; determinar qué tipo de monitoreo —metodología y frecuencia— es adecuado para cada criterio de medición o indicador del desempeño, y establecer protocolos de recolección y gestión de datos.
- **Implementación:** Llevar a cabo el o los programas de monitoreo, adaptándolos según sea necesario en función de las condiciones del terreno.
- **Registro y presentación de informes:** Revisar, analizar, sintetizar y comunicar los datos derivados del monitoreo; transmitir las conclusiones al equipo del proyecto (y a la persona o entidad contratista durante las fases de construcción y operación), y orientar a otras partes interesadas.
- **Evaluación:** Sobre la base de los resultados del monitoreo, evaluar el desempeño de las SbN; proponer modificaciones a las mismas (aplicando un manejo adaptativo), y reevaluar y adaptar el programa de monitoreo según resulte necesario, de acuerdo con la información recopilada.

La formulación de un programa de monitoreo debe producirse durante la fase de delimitación del alcance del proyecto, de modo que su viabilidad general pueda evaluarse; su diseño se fundamenta en los resultados del monitoreo inicial, y resulta posible establecer las condiciones de referencia para comparaciones posteriores. Las actividades de monitoreo han de continuar a lo largo de toda la vida del proyecto e incluir la recopilación de datos históricos, de referencia, de cumplimiento y operativos. Además, se recomienda realizar un monitoreo después de eventos importantes (por ejemplo, después de una tormenta) con objeto de examinar la resiliencia del proyecto de SbN frente a factores de perturbación.

Recabar datos operativos cobra especial importancia para el manejo adaptativo mediante SbN, ya que permite garantizar tanto el cumplimiento de los objetivos de desempeño del MRI como la consecución de cobeneficios. El manejo adaptativo es clave para el éxito a largo plazo de las SbN: permite la mejora continua no solamente del proyecto de SbN en su conjunto, sino también del propio programa de monitoreo. Las actividades de monitoreo, por su parte, proveen los datos necesarios para evaluar el desempeño de una solución, identificar umbrales y determinar si se requiere intervenir y en qué momento. Además, el monitoreo operativo a largo plazo proporciona datos y conocimientos que pueden utilizarse en futuros proyectos.

Estrategia general de monitoreo

Con frecuencia, los programas de monitoreo emplean metodologías de evaluación BACI (antes-después, control-impacto) o RCA (enfoque de condición de referencia). Para ello se utilizan uno o varios sitios de referencia, lo que permite comparar de forma directa los indicadores clave de desempeño del proyecto de SbN con el mismo conjunto de indicadores para uno o varios sitios de referencia.

Los objetivos fundamentales, los criterios de medición del desempeño y los indicadores de desempeño revisten gran importancia en los programas de monitoreo. Para efectos del presente informe se utilizan las siguientes definiciones:

- **Objetivos fundamentales:** corresponden a aquello que el proyecto busca alcanzar en su nivel más básico.
- **Criterios de medición del desempeño:** se refieren a las metas alcanzables (que pueden traducirse directamente en acciones concretas) específicas del sitio, por las condiciones y los retos presentes en el mismo.
- **Indicadores de desempeño:** constituyen elementos del proyecto de SbN medibles u observables, que indican los avances del sistema hacia las metas y objetivos establecidos.

La selección de los indicadores de desempeño habrá de realizarse en función de los objetivos y criterios de medición específicos del proyecto, con miras a su consecución. En general, tales indicadores deben presentar las siguientes características:

- tener una base científica sólida y basarse en criterios SMART (ser específicos, medibles, alcanzables, pertinentes y con plazos establecidos);
- ser prácticos y sencillos, al tiempo que responden plenamente a los requisitos técnicos del proyecto;
- corresponder a una escala adecuada (espacial y temporal), que tenga en cuenta la variabilidad del indicador objeto de medición, así como elementos relacionados con las características regionales, el cambio climático y la morfología urbana;
- emplear una escala adecuada (espacial y temporal), que corresponda a diferentes contextos de toma de decisiones, principios de política y requisitos de registro y presentación de informes;
- establecer con claridad condiciones de referencia y apoyarse en evaluaciones de referencia;
- facilitar la evaluación rápida de trayectorias y tendencias, así como el manejo adaptativo;
- basarse en un enfoque transdisciplinario, y
- corresponder a elementos comunes o estándar (siempre que sea posible), de manera que resulte posible comparar la eficacia de las SbN entre sitios distintos y, con ello, garantizar que los resultados puedan transferirse y ampliarse.

Criterios de medición, indicadores de desempeño y técnicas de monitoreo

Tanto los criterios de medición como los indicadores de desempeño se dividen en las siguientes cuatro categorías principales, que corresponden a los tipos de beneficios y cobeneficios de las SbN: manejo de riesgos por inundación, ambientales, sociales y económicos. Los **principales criterios de medición del desempeño, por categoría**, se enumeran a continuación.

- Manejo de riesgos por inundación
 - Reducción del área de riesgo de inundación para un evento determinado
 - Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado
 - Reducción de los efectos del oleaje en zonas determinadas
 - Mantenimiento de la estabilidad de los componentes estructurales
 - Mejora de la resiliencia de la infraestructura o de las medidas de contingencia en caso de fallos
- Ambientales
 - Restablecimiento de un régimen hidrológico más natural
 - Aumento de la resiliencia de los ecosistemas
 - Mejora o mantenimiento de los atributos esenciales del hábitat, así como de la conectividad al interior de un sitio
 - Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (flora y fauna)
 - Captación y almacenamiento de carbono
- Sociales
 - Mayor seguridad y tranquilidad
 - Conectividad con espacios verdes y sistemas naturales
 - Mejora de la estética
 - Mayor participación de la comunidad y custodia del medio ambiente
 - Percepción pública del proyecto favorable
 - Aportación de valor cultural, religioso o espiritual
 - Reducción de la pobreza

- Participación de comunidades indígenas o grupos marginados y custodia ambiental
- Equidad e inclusión
- Aportación de beneficios adicionales en materia de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos
- Económicos
 - Reducción de los costos de capital
 - Reducción de los costos operativos y de mantenimiento
 - Reducción del impacto de las inundaciones en las comunidades
 - Mejora de los medios de subsistencia pesqueros, agrícolas o artesanales
 - Oportunidades de empleo local (por ejemplo, mediante el ecoturismo)

Ahora bien, en ocasiones resulta necesario incluir en el programa de monitoreo parámetros de desempeño adicionales u opcionales, específicos para el proyecto de que se trate. En el informe se enlistan y analizan con detalle, para cada una de las cuatro categorías, criterios de medición adicionales u opcionales que —sin considerarse básicos— pueden resultar apropiados para ciertos proyectos.

Además se incluyen estudios de caso de SbN específicas con vistas a ilustrar el modo en que diversas metodologías de monitoreo y criterios de medición pueden incluirse y ajustarse en función de los contextos específicos de cada proyecto.

La selección de los indicadores de desempeño dependerá del conjunto de criterios de medición específicos del proyecto, así como del tipo de SbN, las condiciones climáticas, el diseño del programa de monitoreo, los objetivos del proyecto, el acceso a especialistas y equipos, y las limitaciones presupuestarias. Existen múltiples metodologías de monitoreo adecuadas para un gran número de indicadores de desempeño. En el informe se examinan también posibles desventajas y elementos que entrañen costos o exijan realizar concesiones en términos de precisión, intensidad y extensión.

Consideraciones especiales relacionadas con el tipo de ecosistema y de SbN

Los ecosistemas en donde se ubican las SbN —o de los que éstas forman parte integral— intervienen de manera importante en la selección de los indicadores de desempeño y de las técnicas de monitoreo asociadas. En el presente documento se exponen las consideraciones que a grandes rasgos deben tenerse en cuenta al elaborar planes de monitoreo para una serie de ecosistemas y tipos de SbN, así como consideraciones especiales agrupadas en: playas y dunas, humedales y bajos intermareales, islas, bosques costeros y zonas boscosas, elementos sumergidos e híbridos.

Análisis, disponibilidad y difusión de datos

El registro de datos y la elaboración de informes, así como el intercambio de información, son componentes esenciales de todo programa de monitoreo de proyectos relacionados con soluciones basadas en la naturaleza, sobre todo a fin de promover las SbN y ampliar los beneficios de su implementación. Es importante documentar los métodos de análisis de datos y permitir una fácil reproducción; incluso, los archivos y métodos de procesamiento de datos deberán publicarse siempre que se pueda: además de poner a disposición pública (en la medida de lo posible) los conjuntos de datos, es preciso adjuntar los metadatos correspondientes (incluidos detalles sobre las metodologías de medición y análisis), a fin de garantizar su reutilización en el futuro. Los informes deben incluir elementos clave estandarizados, como un resumen claro de los objetivos y plazos del proyecto; descripciones de los sitios que incluyan elementos relevantes del contexto histórico; una descripción de todas las metodologías, protocolos y análisis empleados; resultados obtenidos; evaluación y discusión de los aprendizajes, y metadatos. En el documento de orientación *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades*

costeras (asociado al presente informe) se presentan más recomendaciones y buenas prácticas en relación con el análisis, disponibilidad y difusión de datos.

Habida cuenta de que los programas de monitoreo generan datos que pueden ser de interés para numerosas personas y grupos (más allá del equipo de trabajo directo del proyecto), la gestión de datos científicos debe llevarse a cabo de forma que éstos resulten de fácil acceso y puedan ser utilizados e interpretados por otras partes interesadas. Afortunadamente, existen protocolos establecidos para analizar, archivar y compartir datos que quienes proponen e impulsan SbN pueden adoptar; por ejemplo: el enfoque FAIR (del inglés: *findable, accessible, interoperable, and reusable*), que hace referencia a cómo deben tratarse los datos para que sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables (Wilkinson *et al.*, 2016).

Oportunidades y orientaciones futuras

A medida que se acumulan más pruebas científicas que documentan los éxitos de las SbN, aumenta la probabilidad de que este tipo de soluciones se adopten para el manejo de los riesgos asociados con los eventos de inundación. Sin embargo, quienes desde los ámbitos de la ciencia y la ingeniería diseñan y evalúan este tipo de soluciones deben también participar en su divulgación, de manera que los hallazgos y resultados obtenidos resulten accesibles y comprensibles para el público en general. Ello podría lograrse, por ejemplo, mediante la interacción y contacto con las comunidades a través de las redes sociales; la preparación de informes con recomendaciones para orientar la formulación de políticas u otros resúmenes de las investigaciones presentados en un lenguaje sencillo, y la colaboración con participantes en proyectos de ciencia comunitaria relacionados con programas de monitoreo.

La participación de quienes habitan en la localidad en el monitoreo de SbN constituye también una excelente manera de fomentar la adhesión del público a estas soluciones; difundir los beneficios de los proyectos de SbN; fomentar un sentido de propiedad y conexión, y fortalecer las capacidades de monitoreo locales. Muchos de los indicadores clave enumerados pueden ser objeto de monitoreo mediante técnicas sencillas, de aplicación generalizada y poco costosa con una formación mínima. Cada vez surgen más oportunidades para que integrantes de la comunidad participen aportando sus propios registros a plataformas de observación de la naturaleza de código abierto, como iNaturalist, eBird o CoastSnap. Personas y entidades promotoras de proyectos de SbN podrían incorporar activamente estas herramientas a los respectivos programas de monitoreo, como medio para generar mayor participación.

Los avances tecnológicos, como las redes de sensores y los sistemas aéreos teledirigidos (drones), también están permitiendo que algunas técnicas de monitoreo estén ahora al alcance de los grupos comunitarios. No obstante, el registro y la medición de algunos indicadores clave para el monitoreo de SbN aún entrañan dificultades si no se cuenta con equipos costosos o con la participación de profesionales y especialistas en la materia. En estos casos, vincular a especialistas con los miembros de la comunidad podría ayudar a aumentar la participación de las comunidades en un monitoreo eficaz.

Por último, si bien existen diversos protocolos de monitoreo apropiados para SbN implementados en muy diversos escenarios, su implementación puede verse limitada por los costos, sobre todo para los grupos comunitarios. Por ello resulta necesario realizar más investigaciones con miras a desarrollar soluciones de monitoreo asequibles y accesibles para muchos indicadores de desempeño cuya utilización actualmente requiere conocimientos técnicos y gastos considerables. Además, es necesario que los gobiernos sustituyan los modelos de financiamiento de proyectos intensivos en capital y limitados al diseño o la construcción (con un monitoreo mínimo posterior a la implementación) por otros modelos para financiar proyectos a más largo plazo que incluyan un manejo adaptativo y un enfoque de ciclo de vida en su operación.

Prefacio

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) es una organización trilateral que facilita la cooperación entre Canadá, Estados Unidos y México en favor de la conservación, la protección y el mejoramiento del medio ambiente de América del Norte. En 2021, la CCA emprendió un proyecto encaminado a orientar la implementación generalizada de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) como medida de manejo de riesgos por inundación (MRI) en comunidades costeras de América del Norte. Dicha iniciativa se dividió, a grandes rasgos, en las tres fases siguientes:

1. **Serie de talleres intersectoriales**, con el objetivo de identificar obstáculos para la implementación de soluciones basadas en la naturaleza; sentar las bases de una comunidad de práctica en América del Norte, y reunir a profesionales en el campo y personas practicantes y colaboradoras para determinar necesidades y oportunidades al respecto.
2. **Conjunto de documentos de orientación** dirigidos a subsanar las lagunas de conocimiento y seguir ampliando las oportunidades identificadas durante la serie de talleres, además de servir de guía sobre las mejores prácticas en relación con la implementación de soluciones basadas en la naturaleza.
3. **Seminarios web** destinados a aumentar el interés en los documentos de orientación elaborados, así como su utilización y aprovechamiento.

Como parte de la primera fase del proyecto, se contrató a DHI Water and Environment Inc. (DHI) con la encomienda de preparar y organizar la serie de talleres intersectoriales. Estos consistieron en siete sesiones celebradas a lo largo de cinco semanas en mayo y junio de 2022, centradas en los siguientes temas:

- 1A y 1B: Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza
- 2A y 2B: Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza
- 3A y 3B: Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza
- 4: Taller de síntesis

La serie de talleres contó con la asistencia de 95 expertos del ámbito académico, el sector privado, gobiernos y organizaciones no gubernamentales (ONG) de toda América del Norte. Las actividades grupales —dirigidas a fomentar lazos e intercambio; aportar ideas; recabar opiniones, e identificar lagunas, obstáculos y oportunidades— incluyeron discusiones sobre seis estudios de caso diferentes, cuatro series de ejercicios colaborativos en línea y dos series interactivas de preguntas y respuestas. La participación de las personas asistentes —de procedencias y experiencias muy diversas— y las ideas generadas sentaron una base sólida para crear una comunidad de práctica y nutrieron la elaboración de documentos de orientación sobre SbN en el subcontinente.

La segunda fase del proyecto consistió en abordar lagunas de conocimiento identificadas en la serie de talleres mediante la elaboración y publicación de varios materiales amplios de orientación acerca de las SbN en un contexto urbano y periurbano de América del Norte. Este documento forma parte de dicha serie, cuyos cuatro componentes se recomienda consultar en su conjunto:

- Cobeneficios
- Reconversión de infraestructura en pie
- Monitoreo de la eficacia
- Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos (*el presente documento*)

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todas las personas participantes y ponentes en la serie de talleres de la CCA sobre soluciones basadas en la naturaleza aplicables en el manejo de riesgos por inundaciones costeras en comunidades de América del Norte para el manejo de riesgos por inundaciones en comunidades de América del Norte.

La elaboración de este informe estuvo a cargo de:

- Danika van Proosdij, profesora del Departamento de Geografía y Estudios Ambientales y directora de Adaptaciones Transcosteras: Centro de Soluciones Basadas en la Naturaleza (*TransCoastal Adaptations: Centre for Nature-Based Solutions*, TCA), Universidad de Saint Mary (*Saint Mary's University*)
- Jennie Graham, vicepresidenta y especialista principal en restauración, CB Wetlands and Environmental Specialists Inc. (CBWES)
- Jeremy Lundholm, ecólogo principal, CBWES
- Jocelyn Kickbush, ecóloga de restauración, CBWES

Agradecemos a DHI Water and Environment Inc. (DHI) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) sus aportaciones y revisiones adicionales. En particular, la colaboración de:

- Jessica Wilson, gerente de proyecto e ingeniera costera, DHI
- Jan van Smirren, oceanógrafo principal, DHI
- Christian M. Appendini, asesor externo, DHI, y profesor, UNAM
- Danker Kolijn, jefe de proyecto Soluciones Marinas y Costeras (continente americano), DHI

Vaya un agradecimiento especial al comité directivo del proyecto de la CCA *Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en ciudades costeras*, en el marco del cual se elaboró el presente informe, por sus valiosas orientaciones y aportaciones a lo largo de todo el proceso:

- John Sommerville y Mary-Ann Wilson, ministerio de Recursos Naturales de Canadá (*Natural Resources Canada*)
- Laurence Forget-Dionne, Pierre Huns, Catherine Lafleur y Annette Morand, ministerio de Infraestructura de Canadá (*Infrastructure Canada*)
- Enda Murphy, Consejo Nacional de Investigación de Canadá (*National Research Council of Canada*)
- Trisha Bergmann, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA), Estados Unidos
- Julien Katchinoff, Departamento de Estado (*Department of State*) de Estados Unidos
- Gloria Cuevas Guillaumin y Martha Niño Sulkowska, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), México
- Pedro Joaquín Gutiérrez y Maxime Le Bail, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa), México
- Leonel Álvarez Balderas, Isabel Selene Benítez Ávila y Juan Domingo Izabal Martínez, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México

Gracias también al comité consultivo especial, que proporcionó revisión técnica y orientación en torno a la metodología propuesta y los indicadores esbozados en este informe; cabe mencionar a:

- Xavier Flores Vidal, Universidad Autónoma de Baja California, México
- Porfirio Álvarez, Consorcio de Instituciones del Golfo de México y Caribe
- Horacio Limón, consultor en economía ambiental, México

- Phil Osborne, Northwest Hydraulic Consultants
- Pete Zuzek, Zuzek Inc
- Michelle Molnar, Iniciativa Municipal de Activos Naturales (*Municipal Natural Assets Initiative*), Canadá
- Colleen Mercer Clarke, científica interdisciplinaria, arquitectura del paisaje y adaptación costera, Canadá
- Joanna Eyquem, Centro de Adaptación Climática Intact (*Intact Centre on Climate Adaptation*), Universidad de Waterloo, Canadá
- Cole Delisle, Oficina de Protección del Medio Ambiente de Kahnawake (*Kahnawake Environment Protection Office*), Canadá
- Candice D. Piercy, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería del Ejército de Estados Unidos (*US Army Engineer Research and Development Center*)
- Bhaskaran Subramanian, Oficina del Programa Climático de la NOAA, Estados Unidos
- Marguerite Pelletier y D. Dale Werkema, Jr., Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*), Estados Unidos

1 Introducción a la metodología propuesta

Las comunidades costeras asentadas en zonas bajas se encuentran cada vez más expuestas a las amenazas asociadas con eventos de inundación, sobre todo en vista del aumento de la densidad poblacional y los efectos del cambio climático (Bush y Lemmen, 2019; EPA, 2017; INECC, 2019). Las tormentas, junto con las inundaciones y la erosión asociadas, pueden causar impactos económicos, sociales y ecológicos significativos (IPCC, 2022; Moudrak *et al.*, 2018). Vastas regiones de Canadá, Estados Unidos y México están expuestas a distintos tipos de tormentas —tormentas extratropicales, frentes fríos y ciclones tropicales, por mencionar algunos— que pueden provocar inundaciones costeras. Por ejemplo, el 7 de octubre de 2020, el huracán *Delta* tocó tierra cerca de Puerto Morelos, en el sureste de México, dejando sin electricidad a un tercio de la población y causando daños por un valor estimado en alrededor de 185 millones de dólares estadounidenses (NOAA, 2020). En fechas más recientes, en octubre de 2023, el huracán *Otis* tocó tierra también en el sur de México, provocando inmensos daños y al menos 27 muertes (Williams, 2023). En septiembre de 2022, el tifón *Merbok* y dos grandes huracanes, *Fiona* e *Ian*, causaron algunos de los daños más graves de la historia reciente de Canadá y Estados Unidos, con pérdidas de vidas humanas. El tifón *Merbok*, que azotó la costa oeste de Alaska el 17 de septiembre de 2022, provocó inundaciones devastadoras y grandes pérdidas de infraestructura, así como la interrupción de la temporada de caza, esencial para el sustento de las comunidades indígenas locales (Thoman, 2022). Por su parte, el huracán *Fiona* tocó tierra el 24 de septiembre de 2022 en la región del Atlántico de Canadá, donde causó pérdidas materiales por un valor asegurado de 800 millones de dólares canadienses, además de dañar infraestructura y alterar drásticamente las costas (IBC, 2023). El poblado de Channel-Port aux Basques, en Terranova, Canadá, donde el mar arrastró viviendas, medios de subsistencia y residentes, quedó devastado (CBC, 2022). Apenas cuatro días después, el huracán *Ian* tocó tierra en Florida (Estados Unidos), obligó la evacuación de 2.5 millones de habitantes y causó la muerte de 89 personas (Livingston, 2022).

El manejo de riesgos por inundación (MRI) deviene esencial para proteger las zonas urbanas y rurales del subcontinente ante las inundaciones y la erosión. En muchas regiones de América del Norte, el MRI ha dependido históricamente en gran medida de infraestructuras convencionales “grises” o “duras” (es decir, infraestructura pesada), como escolleras, malecones y diques de contención, que en algunas circunstancias han fracasado de forma catastrófica (por ejemplo, el fallo del sistema de diques durante el huracán *Katrina*, Nueva Orleans, 2005) o bien han tenido repercusiones socioeconómicas o ambientales negativas imprevistas (Bridges *et al.*, 2021). Además, las infraestructuras de protección (como los diques) pueden repercutir desfavorablemente en la biodiversidad costera e incluso aumentar la erosión en las zonas adyacentes carentes de protección. Por el contrario, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) son cada vez más reconocidas a escala internacional por ofrecer funciones de protección y, al mismo tiempo, cobeneficios ambientales, sociales y económicos cuando se diseñan de manera adecuada y se adaptan a las condiciones ambientales locales (Bridges *et al.*, 2021; UICN, 2020; Shiao *et al.*, 2020). No obstante, los datos disponibles sobre la eficacia de las SbN por cuanto a sus funciones de protección, sus ventajas en comparación con el uso de infraestructuras de ingeniería de tipo tradicional y los múltiples beneficios colaterales asociados aún son limitados (Kumar *et al.*, 2021; Dumitru *et al.*, 2021), lo que conduce a incertidumbres y barreras percibidas que limitan su adopción (Kumar *et al.*, 2021; Bridges *et al.*, 2021). Estos obstáculos se analizan con más detalle en el documento de orientación *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe).

Un factor clave para el éxito de las SbN, así como para ayudar a mitigar las incertidumbres y obstáculos que se les atribuyen, es la adopción de un manejo adaptativo y procesos de monitoreo

eficaces. El manejo adaptativo constituye un enfoque estructurado e iterativo que permite revisar y ajustar continuamente tanto los procesos como las medidas de intervención (por ejemplo, las actividades de mantenimiento) con el fin de reflejar los cambios en las condiciones (incluidas las condiciones cambiantes derivadas del cambio climático) y las variaciones en el desempeño de los proyectos (Bridges *et al.*, 2021). El manejo adaptativo es un tema integral y transversal de la implementación de las SbN (Bridges *et al.*, 2021; Silva Zuniga *et al.*, 2020, y Banco Mundial, 2017). Asimismo, el monitoreo regular y a largo plazo subyace a todo manejo adaptativo eficaz y establece una base sólida para la futura implementación de soluciones basadas en la naturaleza.

El monitoreo implica un proceso continuo de seguimiento, tanto del proceso de implementación de una SbN (es decir, qué ocurre y cuándo dentro del ciclo del proyecto) como de su desempeño en relación con los resultados esperados o los criterios de medición establecidos (Skodra *et al.*, 2021). El desempeño —en este contexto— se define como el grado en que “las SbN abordan un reto identificado o cumplen un objetivo concreto en un lugar, momento y contexto socioeconómico específicos” (Raymond *et al.*, 2017 en Skodra *et al.*, 2021, p. 49). El monitoreo permite evaluar los cambios en comparación con las condiciones de referencia o en relación con la consecución de determinados objetivos o umbrales, y constituye una fuente esencial de información sobre la eficacia de cualquier proyecto de manejo de riesgos por inundación con base en una SbN. El monitoreo proporciona la base empírica que permite fundamentar los proyectos de SbN actuales y futuros.

El presente informe se propone impulsar la adopción e implementación de soluciones basadas en la naturaleza en comunidades costeras, para lo cual pone a disposición de personas y entidades responsables de la toma de decisiones y profesionales en el manejo de riesgos por inundación información práctica, orientación y herramientas en relación con el monitoreo de la eficacia e impacto de las SbN, al tiempo que aborda lagunas de información y barreras previamente identificadas.

Elaborado por Adaptaciones Transcosteras: Centro de Soluciones Basadas en la Naturaleza (*TransCoastal Adaptations: Centre for Nature-Based Solutions*, TCA) de la Universidad de Saint Mary (*Saint Mary's University*, SMU) y CB Wetlands and Environmental Specialists Inc. (CBWES), este documento forma parte de una serie de materiales integrada por DHI Water and Environment Inc. (DHI), por encargo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), que se recomienda consultar en su conjunto:

- Cobeneficios
- Reconversión de infraestructura en pie
- Monitoreo de la eficacia
- Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos (*el presente documento*)

Este informe se distingue del documento de orientación asociado también sobre monitoreo de las soluciones basadas en la naturaleza, ya que proporciona enfoques, parámetros y metodologías de monitoreo con mucho mayor detalle.

1.1 Objetivos y alcance

Como parte de un proyecto de la CCA en curso (*Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en ciudades costeras*) destinado a promover la implementación generalizada de las SbN para el manejo riesgos por inundación en comunidades costeras de América del Norte, DHI organizó una serie de talleres intersectoriales en la primavera de 2022 (DHI, 2022). Los talleres consistieron en siete sesiones celebradas a lo largo de cinco semanas en mayo y junio de 2022, con 95 participantes de Canadá, Estados Unidos y México, procedentes de múltiples instituciones académicas, el sector privado, gobiernos y organizaciones no gubernamentales (ONG), y actividades grupales que permitieron generar ideas e identificar lagunas de información, obstáculos y oportunidades en relación con los cobeneficios de las SbN. Dos de dichas sesiones se centraron exclusivamente en el

monitoreo de la eficacia de las SbN, y durante las mismas los asistentes participaron en la generación de ideas y en la identificación de vacíos y omisiones por cuanto a datos, así como obstáculos y oportunidades relacionadas con el monitoreo de las soluciones basadas en la naturaleza.

El presente documento aborda las lagunas de conocimiento y los obstáculos respecto de la implementación de SbN identificadas en la serie de talleres; sintetiza la información disponible, y proporciona herramientas prácticas a fin de planificar, evaluar e implementar programas de monitoreo efectivos asociados al uso de tales soluciones para el MRI en comunidades costeras. Como se señaló ya, esta publicación forma parte de un conjunto de documentos de orientación destinados a apoyar a personas y entidades responsables de la toma de decisiones en la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza con miras a hacer frente a los riesgos de inundación costera en América del Norte.

En concreto, este informe tiene por objeto:

- presentar un resumen de los objetivos y principios rectores del monitoreo;
- proporcionar orientación y prácticas recomendadas para el diseño de programas de monitoreo;
- establecer criterios de medición e indicadores de desempeño básicos y adicionales (u opcionales) para el monitoreo, con base en las referencias internacionales de que se dispone;
- describir de manera sucinta consideraciones específicas para distintos tipos de SbN y ecosistemas;
- presentar una síntesis de aspectos clave relacionados con el análisis, la disponibilidad y la difusión de datos de monitoreo;
- resumir las principales consideraciones técnicas para la formulación de planes de monitoreo, incluidos criterios de medición e indicadores, métodos, entornos físicos diversos y escalas temporales y espaciales;
- aportar estudios de caso en relación con el diseño y la implementación de planes de monitoreo y su utilidad para evaluar la eficacia, el desempeño y la resiliencia de las SbN, y
- en lo posible, colmar las lagunas y franquear los obstáculos detectados durante la serie de talleres intersectoriales realizados.

Su propósito consiste en brindar orientación y datos que sirvan de apoyo a personas y entidades responsables de la toma de decisiones respecto de la implementación a mayor escala y el monitoreo de soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos derivados de inundaciones en las comunidades costeras. Lejos de tratarse de una guía técnica detallada o de una revisión exhaustiva de la cada vez más abundante bibliografía sobre SbN y la metodología para su monitoreo, este informe tiene por objeto ayudar en todas las fases del proceso de un proyecto, desde su conceptualización hasta el diseño y la puesta en marcha.

1.2 Principios rectores

El monitoreo permite detectar si un proyecto está siendo eficaz o no, y en qué medida. La efectividad (o eficacia) puede definirse como “el grado en que se logran los objetivos y la medida en que se resuelven los problemas que la solución propuesta busca atender. A diferencia de la eficiencia, la eficacia se determina sin consideración de los costos” (Raymond *et al.*, 2017, p. 6).

En su manual para profesionales en torno a la evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza (*Evaluating the impact of nature-based solutions: a handbook for practitioners*), Dumitru y Wendling (2021) esbozan tres elementos básicos que caracterizan a las evaluaciones del desempeño y el impacto de las SbN bien diseñadas, identificados con base en un análisis exhaustivo de estudios de caso realizados en Europa. Estos elementos básicos son:

1. La evaluación del impacto responde a una pregunta concreta.
2. Se emplea una metodología sólida que equilibra el entendimiento de la complejidad y diversidad de los resultados de la o las SbN —incluida la correlación entre ventajas y desventajas, y las posibles concesiones o compromisos a realizar—, por un lado, y su viabilidad en relación con los recursos disponibles y el contexto socioeconómico específico, por el otro.
3. Se integra un equipo de evaluación transdisciplinario y multisectorial en función de los tipos de SbN y los resultados de interés.

Un componente primordial de las SbN es su capacidad para proporcionar cobeneficios sociales, ambientales y económicos, además de los beneficios directos relativos al manejo de riesgos por inundación. Por lo tanto, resulta fundamental que los protocolos de monitoreo incluyan indicadores de desempeño que abarquen las cuatro categorías de beneficios interconectados. También es importante tener en cuenta las sinergias de los diferentes impactos de una SbN y los elementos de concesión o compromiso entre los cobeneficios, en función de posibles consecuencias adversas. Dadas las lagunas en los datos sobre los efectos a largo plazo de las SbN, los programas de monitoreo también deben ser lo más prolongados posible e incluir, en la evaluación de una solución, posibles servicios o efectos contraproducentes (por ejemplo, la reducción del suministro de sedimentos en riberas situadas aguas abajo) (Dumitru *et al.*, 2020). Se sugiere consultar el capítulo 2 del recién mencionado manual sobre evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza, publicado por la Dirección General de Investigación e Innovación de la Comisión Europea (Dumitru y Wendling, 2021).

Además, hay una serie de principios rectores que deben tenerse en cuenta al elaborar y aplicar un plan para monitorear SbN (Skodra *et al.*, 2021). Tanto los planes de monitoreo como los indicadores de desempeño seleccionados deberán apegarse a los siguientes principios:

- tener una base científica sólida y basarse en criterios **SMART** (ser específicos, medibles, alcanzables, pertinentes y con plazos establecidos);
- ser **prácticos** y sencillos, al tiempo que responden plenamente a los requisitos técnicos del proyecto;
- corresponder a una **escala adecuada** (espacial y temporal), que tenga en cuenta la variabilidad del indicador objeto de medición, así como elementos relacionados con las características regionales, el cambio climático y la morfología urbana;
- emplear una escala adecuada (espacial y temporal), que corresponda a diferentes contextos de toma de decisiones, principios de política y **requisitos de registro y presentación de informes**;
- establecer con claridad **condiciones de referencia** y apoyarse en evaluaciones de referencia;
- facilitar la evaluación rápida de **trayectorias y tendencias**, así como el manejo adaptativo;
- basarse en un enfoque **transdisciplinario**, y
- corresponder a elementos **comunes o estándar** (siempre que sea posible), de manera que resulte posible comparar la eficacia de las SbN entre sitios distintos y, con ello, garantizar que los resultados puedan **transferirse y ampliarse**.

1.3 Definiciones clave

Los objetivos fundamentales, los criterios de medición del desempeño y los indicadores de desempeño son aspectos que cumplen una función importante en los programas de monitoreo. Para efectos del presente documento se utilizan las siguientes definiciones:

- **Objetivos fundamentales:** corresponden a aquello que el proyecto busca alcanzar en su nivel más básico (por ejemplo, reducir el impacto de siniestros por tormentas).

- **Criterios de medición del desempeño:** se refieren a las metas alcanzables (que pueden traducirse directamente en acciones concretas) específicas del sitio, por las condiciones y los retos presentes en el mismo (por ejemplo, reducir el riesgo de inundación asociado a un evento determinado).
- **Indicadores de desempeño:** constituyen elementos del proyecto de SbN medibles u observables, que indican los avances del sistema hacia las metas y objetivos establecidos (por ejemplo, extensión o área máxima de inundación).

1.4 Lecturas complementarias

En la elaboración del presente informe se examinaron y consultaron numerosas publicaciones, las cuales —aunadas a las conclusiones derivadas de la serie de talleres de la CCA sobre SbN— sirvieron de base para la formulación de las orientaciones, procesos y consideraciones que se exponen en este documento. A continuación se enumeran los principales materiales de referencia que podrán brindar al lector más información y orientación técnica. Asimismo, en el apartado 4 (*infra*) se ofrecen otras referencias clave específicas para entornos costeros concretos.

- *Evaluating the impact of nature-based solutions: A handbook for practitioners* [Evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza: manual para profesionales] (Dumitru y Wendling, 2021) 
- *Mejorando la resiliencia de la infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN): guía técnica de 12 pasos para desarrolladores de proyectos* (Silva Zúñiga et al., 2020) 
- *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management* [Directrices internacionales sobre atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza para el manejo de riesgos por inundación] (Bridges et al., 2021b) 
- *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management* [Soluciones basadas en la naturaleza para el manejo de riesgos asociados a las inundaciones y la erosión costeras y fluviales] (Vouk et al. 2021) 
- *An overview of monitoring methods for assessing the performance of nature-based solutions against natural hazards* [Descripción general de los métodos de monitoreo para evaluar el desempeño de las soluciones basadas en la naturaleza frente a los riesgos naturales] (Kumar et al., 2021) 
- *Introducing Indicators: A First Look At Using Indicators To Measure Adaptation Progress* [Introducción a los indicadores: primera mirada al uso de indicadores para medir los avances en la adaptación] (ICLEI, 2022) 

2 Metodología de monitoreo propuesta

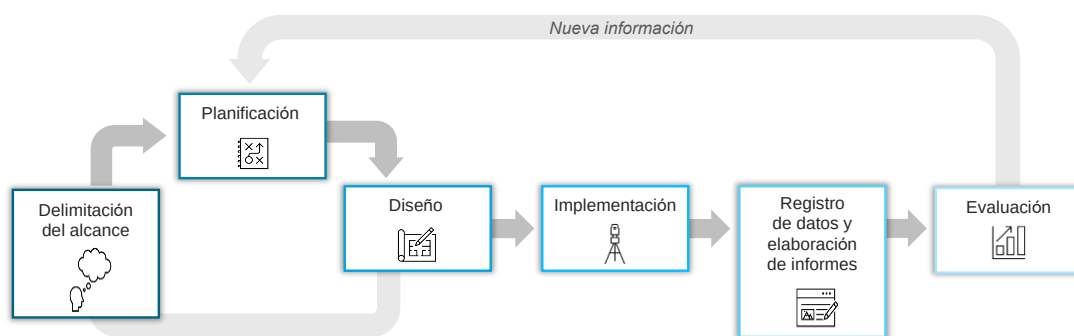
2.1 Proceso de monitoreo

Como se indica en el informe *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente documento), los proyectos de SbN entrañan por lo general cinco fases principales: 1) delimitación del alcance, 2) planificación, 3) diseño, 4) implementación y 5) operación. Estas cinco fases forman parte de un proceso cíclico, de manera que resulta preciso contar con un plan de monitoreo y manejo adaptativo en una etapa temprana del ciclo (desde las fases de delimitación del alcance y planificación del proyecto). Ello implica, a su vez, una reevaluación continua y, de ser necesario, actualizaciones al

plan durante la ejecución del proyecto. El monitoreo, por su parte, comprende seis fases generales, mismas que se ilustran en la gráfica 1 y se describen a continuación (De Looft *et al.*, 2021). Al igual que con el ciclo de las SbN, el proceso de monitoreo es iterativo por naturaleza.

- **Delimitación del alcance:** Identificar la escala y el alcance del plan de manejo adaptativo; priorizar las acciones; definir las partes interesadas (incluidas las poseedoras o titulares de derechos), y trazar las estrategias de financiamiento. Durante esta fase conviene establecer mecanismos para garantizar una participación temprana y significativa.
- **Planificación:** Determinar los parámetros de interés; establecer indicadores de desempeño; realizar un inventario de las redes de monitoreo con que se cuenta, e identificar tanto lagunas de datos como posibles recursos y personal para llevar a cabo el programa de monitoreo.
- **Diseño:** Preparar un programa de monitoreo (que incluya el monitoreo de las condiciones iniciales de referencia) previo a la implementación del proyecto; determinar qué tipo de monitoreo es adecuado para cada criterio de medición o indicador del desempeño; identificar metodologías apropiadas, y establecer protocolos de recolección y gestión de datos.
- **Implementación:** Llevar a cabo el programa o programas de monitoreo, adaptándolos según sea necesario en función de las condiciones del terreno.
- **Presentación de informes:** Revisar, analizar y comunicar los datos derivados del monitoreo; transmitir las conclusiones al equipo del proyecto (y al contratista durante las fases de construcción —implementación— y operación), y orientar a otras partes interesadas.
- **Evaluación:** Sobre la base de los resultados del monitoreo, evaluar el desempeño de las SbN; proponer modificaciones a las mismas conforme se requiera (aplicando un manejo adaptativo), y reevaluar y adaptar el programa de monitoreo de acuerdo con la información recopilada.

Gráfica 1. Marco de monitoreo



Mientras que en los proyectos tradicionales de manejo de riesgos asociados con los eventos de inundación el monitoreo suele incluirse únicamente durante la fase de operación (con frecuencia para determinar el grado de cumplimiento), en los proyectos de SbN resulta crucial que este proceso de supervisión comience en una etapa temprana, desde las fases de delimitación del alcance y planificación del proyecto (es decir, con anterioridad a la implementación), y se extienda a largo plazo. Integrar el diseño completo del programa de monitoreo en un momento temprano del ciclo de vida del proyecto garantizará la asignación de presupuesto y recursos suficientes a las actividades de monitoreo y manejo adaptativo; asimismo, permitirá contar con definiciones y un lenguaje de trabajo comunes. Además, los datos de referencia (datos históricos y condiciones iniciales) son fundamentales para determinar la viabilidad del proyecto y orientan respecto al método de SbN más adecuado para cada lugar. El monitoreo temprano incidirá tanto en el diseño del proyecto como en su planificación (por ejemplo, cómo y cuándo debe implementarse cada fase), y también en el modo en que se ejecutará.

Sin este conocimiento temprano, el éxito general del proyecto puede verse comprometido. El monitoreo temprano reviste particular importancia cuando un proyecto de SbN entraña complejidades como la presencia de hábitats de especies en peligro de extinción, que exigen sensibilidad en el trabajo o intervención en determinados momentos (por ejemplo, la temporada de anidación). Ahora bien, al evaluar la eficacia de los proyectos de SbN, resulta esencial guardar coherencia —desde un punto de vista temporal, espacial y metodológico— entre los datos de referencia y los obtenidos después de la construcción o implementación. Ello permitirá, además, comprender en qué medida el cambio climático puede modificar las condiciones de referencia. Por lo tanto, con el fin de lograr el máximo rigor científico y obtener la información más útil, el monitoreo de la situación de partida ha de iniciarse con anterioridad a la intervención, tanto en el emplazamiento del proyecto como en el sitio de referencia.

La integración completa del proceso de monitoreo a todo lo largo del ciclo de vida del proyecto también reviste importancia para fundamentar el manejo adaptativo. Definido como “aprender en la práctica” (Thom, 2000, y PWA y Faber, 2004), el manejo adaptativo se considera crucial en la gestión de las SbN a efectos de reducir las incertidumbres en el diseño de los proyectos, aumentar su flexibilidad y permitir que éstos evolucionen con el tiempo en respuesta a los cambios en las condiciones ambientales (De Looft *et al.*, 2021), así como para corregir acontecimientos imprevistos o indeseables (Thom, 1997). Si se determina que el desempeño de un proyecto se ha desviado del rango aceptable (un rango que se determina caso por caso y en relación con el sitio de referencia respectivo), el manejo adaptativo garantiza la puesta en marcha de un plan para ajustarse a una trayectoria más aceptable. A fin de aplicar con eficacia el manejo adaptativo, se requiere un monitoreo que (Thom, 2000):

1. mida las condiciones del sistema mediante indicadores seleccionados;
2. evalúe los avances respecto a los objetivos y los indicadores de desempeño, y
3. dé sustento a las decisiones sobre las medidas que deben adoptarse.

Las diversas medidas a adoptar —adecuadas en función de las circunstancias de cada caso— van desde la inacción (no hacer nada), hasta la modificación de los objetivos inicialmente establecidos, pasando por medidas correctivas (Thom, 2000). En el documento de orientación asociado *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* se ofrece un análisis más detallado por cuanto al manejo adaptativo.

2.2 Pensamiento sistémico en el monitoreo

Al elaborar el programa de monitoreo (al igual que el plan de monitoreo adaptativo) de un proyecto de SbN, conviene tomar en consideración el papel que el sitio desempeña dentro del sistema global, de forma integral en el contexto de los objetivos generales del proyecto. Las zonas costeras se encuentran en la interfaz entre sistemas terrestres y acuáticos, y presentan un gran dinamismo. También suelen ser zonas importantes desde los puntos de vista social, cultural, económico y biológico. Los sistemas costeros son intrínsecamente complejos y están interconectados. Por ello, es preciso tener en cuenta no solamente los circuitos de retroalimentación al interior del sistema, sino también los circuitos adyacentes. Por ejemplo, cuando se utiliza el reposicionamiento controlado de diques para la restauración de un humedal intermareal, resulta crucial comprender los procesos físicos subyacentes que crean y mantienen las funciones deseadas del humedal. Si un proyecto de tal índole se encuentra dentro de un sistema estuarino, deberán tenerse en cuenta los impactos potenciales desde y hacia las zonas situadas aguas arriba (por ejemplo, considerar si existen infraestructuras críticas que podrían verse afectadas por la adición de una hidrología más natural o, por el contrario, si existen factores aguas arriba, como el desmantelamiento de una presa, que pudieran dar lugar a una mayor

entrada de agua dulce). Por consiguiente, el programa de monitoreo y la aplicación del manejo adaptativo a un proyecto de este tipo deberán dar prioridad al monitoreo de las funciones de los humedales y las estructuras de interés o preocupación, así como a la entrada de agua dulce.

Cabe destacar que este enfoque integral es aplicable en términos no nada más ecológicos, sino también sociales y culturales. El uso que los seres humanos hacen de la zona del proyecto y los aspectos social y culturalmente importantes también pueden influir de manera significativa en la concepción, el monitoreo y la aplicación del manejo adaptativo. Así pues, si un proyecto aborda la degradación de un sistema dunar, es fundamental tener en cuenta cómo y por qué las personas utilizan las dunas (por ejemplo, tráfico peatonal o vehículos todoterreno, entre otros factores). En caso de que la zona revista gran relevancia recreativa para la comunidad local o impulse el turismo y la actividad económica de la región, intentar restringir por completo el acceso público a la misma sería poco realista. Ahora bien, dado que las dunas se caracterizan por ser especialmente sensibles al uso humano, un proyecto de restauración de dunas bien diseñado desde el punto de vista ecológico puede verse entorpecido si no se tiene debidamente en cuenta dicho uso. En lugar de restringir por completo el acceso, tal vez sería necesario incluir en el diseño, presupuesto y objetivos del proyecto elementos de educación pública (por ejemplo, señalizaciones), así como estructuras para limitar o dirigir el uso humano (como pasarelas y vallas, entre otras). Estas consideraciones también influirán en los aspectos objeto de monitoreo (por ejemplo, habrá que vigilar el uso humano y la integridad de los paseos marítimos o malecones) y en la forma de aplicar el manejo adaptativo (por ejemplo, quizá pueda requerirse también un componente de divulgación).

Al enfocar los proyectos de forma integral y utilizar esa lente para determinar lo que conviene monitorear y cómo aplicar el manejo adaptativo, también se brinda la oportunidad de que el sitio evolucione de forma natural; esto redundará en condiciones ambientales más adecuadas, al tiempo que se optimizan los recursos necesarios para las fases de diseño, implementación y mantenimiento del proyecto. En este sentido, merece la pena recordar que el objetivo del manejo adaptativo no es reproducir un sistema histórico, sino permitir que el paisaje evolucione de forma natural en equilibrio y en consonancia con las condiciones ecológicas presentes y futuras.

2.3 Metodología general

Como se señala en el apartado 2.1, el monitoreo debe incorporarse a lo largo de todo el ciclo del proyecto de SbN, y puede incluir monitoreo histórico, de referencia, de cumplimiento y operativo (a largo plazo). Aparte de un conjunto básico de indicadores de desempeño aplicables a todos los programas de monitoreo de SbN, al diseñar y elegir los indicadores adicionales específicos, “la selección [...] dependerá del proyecto en cuestión y de sus objetivos, la escala, los riesgos asociados, el grado de innovación, el presupuesto con que se cuenta, las directivas de política aplicables y demás factores logísticos” (CCA, 2025a). Conforme a lo expuesto con anterioridad, el diseño del programa de monitoreo y la selección de los indicadores de desempeño deben llevarse a cabo lo antes posible en el ciclo de vida del proyecto, durante las fases de delimitación del alcance y planificación. Si bien los indicadores de desempeño (véase el apartado 3) pueden variar de un proyecto a otro (con la excepción de los indicadores básicos), en todos los proyectos de SbN será necesario identificar y abordar las causas subyacentes de la degradación o los factores de presión de los ecosistemas a fin de lograr una implementación satisfactoria. Para responder a estas necesidades y a estándares científicos básicos, lo recomendable es seguir uno de los dos enfoques generales de monitoreo que se indican a continuación:

- Metodología de evaluación BACI (“antes-después, control-impacto”)
- Enfoque de condición de referencia RCA

2.3.1 Enfoque BACI

El enfoque BACI es de utilidad en casos en que los sitios de intervención y de control (referencia) no pueden asignarse de forma aleatoria, lo que ocurre predominantemente en los proyectos de SbN. En muchos proyectos de este tipo, el sitio de tratamiento suele seleccionarse en respuesta a un área de interés o preocupación humana (como costas erosionadas o infraestructuras importantes en riesgo por impactos derivados del cambio climático) y, a menudo, en el marco de restricciones de acceso y limitantes relacionadas con la propiedad de tierras. El enfoque BACI evalúa los impactos de las perturbaciones naturales o inducidas por el ser humano en un ecosistema al tiempo que permite un diseño experimental de gran potencia en términos estadísticos (Conner *et al.*, 2016; Smokorowski y Randall, 2017). Este enfoque presenta una gran eficacia por cuanto a separar los impactos del proyecto o intervención y aislarlos de la variabilidad natural, por lo que se ha convertido en uno de los modelos más favorables para los programas de monitoreo de efectos ambientales (Smokorowski y Randall, 2017). Esto se debe a que la metodología BACI se compone de dos partes: 1) *antes-después* y 2) *control-impacto*.

El muestreo o evaluación *antes-después* proporciona información relativa a los cambios producidos en el tiempo con respecto al estado histórico o inicial, como resultado del proceso de implementación de la o las SbN. Consiste en recopilar datos de monitoreo de referencia con anterioridad al inicio de la fase de implementación de un proyecto de SbN, a fin de determinar cuáles son las condiciones *antes* de la ejecución del proyecto, y luego evaluar las condiciones *después* de dicha implementación, con miras a determinar qué cambios se produjeron en el sistema.

El muestreo o evaluación *control-impacto* requiere un sitio o área de referencia (es decir, emplazamiento de control), que luego se compara con el sitio o área de impacto. Ello permite discernir los efectos del impacto de la solución y distinguirlos de las tendencias ambientales subyacentes (como el aumento del nivel del mar o la acidificación de los océanos), la variabilidad natural y los procesos estocásticos. Con objeto de garantizar resultados más precisos para el análisis de datos, lo ideal es que el monitoreo de ambos sitios comience al mismo tiempo —antes de dar inicio a la intervención—, y se realice de forma simultánea a lo largo de la implementación de la SbN, continuándose posteriormente con la misma duración. Asimismo, las muestras en ambos sitios han de tomarse con la misma frecuencia, utilizando las mismas metodologías y dentro de los mismos plazos. Por ejemplo, si el muestreo para el monitoreo de referencia en el lugar de impacto se realiza entre 2022 y 2028, el muestreo en el lugar de control también deberá realizarse entre 2022 y 2028. Si el muestreo de referencia se realizó el 3 de septiembre, en condiciones ideales también deberían efectuarse muestreos de control ese mismo día o en una fecha lo más cercana posible; además, en el mejor de los casos, el monitoreo subsiguiente de cada año consecutivo también debería realizarse el 3 de septiembre. Ahora bien, si se dispone de datos preexistentes para el sitio de control, es posible utilizarlos como datos de referencia (en lugar de los datos de lo que habría sido el muestreo de partida) a efecto de definir la condición inicial para el control, con el consiguiente ahorro en recursos (dinero y tiempo). Del mismo modo, por motivos de tiempo y eficiencia económica, puede ser aceptable reducir la frecuencia de muestreo en el sitio de control (por ejemplo, cada dos años, mientras que el sitio de impacto sigue sometándose a monitoreo todos los años). Estas opciones requieren un escrutinio de los datos disponibles y el conocimiento de la variabilidad inherente al sistema de control. Si el alcance y condiciones (financiamiento, mano de obra, entorno, etc.) del proyecto lo permiten, la adición de más lugares de control aumentarán la confiabilidad y la capacidad para determinar la causalidad del impacto (es decir, a mayor número de lugares de control, mejor interpretación de las tendencias a partir de los datos). Los estudios de caso 2 y 3 presentan programas de monitoreo que utilizan diseños BACI.

Existen diversas formas de analizar los datos en términos estadísticos, dependiendo del proyecto, pero todas conllevan algún tipo de análisis de la varianza. Green (1979) y Hurlbert (1984) describen

análisis estadísticos básicos. Actualmente se dispone de un número cada vez mayor de trabajos que apoyan el uso de pruebas estadísticas adicionales, con una metodología precisa que depende de los datos disponibles y de las preferencias en lo que respecta a su presentación (Conner *et al.*, 2016; Stewart-Oaten *et al.*, 1986, y Underwood, 1991). En el apartado 5 se analizan otras consideraciones relativas al análisis, el acceso y la difusión de los datos.

2.3.2 Enfoque RCA

El enfoque de condición de referencia (RCA) es una metodología de evaluación o monitoreo centrada principalmente en la evaluación biológica, aunque también puede ampliarse para incluir otros indicadores de tipo ambiental, social, económico o de manejo de riesgos por inundación. El enfoque RCA —similar como concepto a la parte “control-impacto” del enfoque BACI— permite reconocer la diversidad de la biota y de las características y atributos ambientales a partir de la definición de “condiciones de referencia” basadas en múltiples sitios con manifestaciones variables que denotan “buen estado”. Una vez establecida la condición de referencia (definida por múltiples sitios y equivalente al lugar de control), se le compara con el sitio que ha recibido el impacto de los factores de presión que afectan el ecosistema. El grado y la forma en que el sitio afectado difiere de la condición de referencia sirven como medida del impacto recibido.

La principal diferencia entre los enfoques BACI y RCA radica en que el segundo se aplica en casos en que el impacto ya se ha producido, por lo que no puede realizarse un muestreo de las condiciones previas a la afectación (“antes del impacto”). Cabe señalar que esta metodología no es la opción idónea y que, en la medida de lo posible, conviene utilizar el enfoque BACI. Otra diferencia clave entre ambos enfoques es que el RCA se suele centrar en la fauna. Todo muestreo físico y químico en el marco del enfoque RCA se realiza teniendo en cuenta su relación con la fauna (por lo general invertebrados); en cambio, en el enfoque BACI la fauna puede ser un parámetro indicador opcional. Bowman y Somers (2005) describen de manera clara y amplia los pasos del enfoque RCA, al igual que los análisis estadísticos apropiados que deben emplearse al utilizarlo. Aunque el RCA se ha aplicado tradicionalmente a los recursos de agua dulce, en los últimos años su uso se ha extendido a un conjunto más amplio de ecosistemas (Herlihy *et al.*, 2019). En teoría, cualquier indicador de desempeño (incluidos indicadores sociales, ambientales y económicos) puede compararse utilizando un enfoque RCA, siempre y cuando se integre la condición de referencia para cada indicador a partir de datos de múltiples sitios (véase el estudio de caso 1).

Estudio de caso 1. Enfoque de condición de referencia de la marisma de Converse

Restauración de la marisma de Converse:

Enfoque RCA en la marisma de Converse

Río Missaguash,
Nueva Escocia, Canadá

El proyecto de reposicionamiento del dique de retención en la marisma de Converse y de restauración del ecosistema salobre se puso en marcha debido a la erosión que afectaba tanto a los humedales de la costa como al dique que protegía las tierras de labranza y las carreteras a lo largo de la desembocadura del río Missaguash (parte alta de la bahía de Fundy, Nueva Escocia y Nuevo Brunswick, Canadá). Como consecuencia del aumento de los costos de mantenimiento y reparación del dique y de la amenaza de inundación de las tierras adyacentes, se decidió que el mejor enfoque para este lugar era la restauración de las marismas saladas después del reposicionamiento controlado del dique.

En 2017 y 2018 se recopilaban datos de referencia sobre la historia del sitio, atributos geoespaciales, hidrología, suelos y sedimentos, y vegetación. La construcción de 150 metros de dique nuevo se completó en otoño de 2018 y el dique antiguo se derribó en diciembre de 2018 (Bowron *et al.*, 2019). Las condiciones de referencia para el programa de monitoreo se extrajeron de una base de datos regional que recogía datos sobre las condiciones de los hábitats de humedal intermareal e incluía múltiples sitios de referencia de varios proyectos diseñados con el enfoque BACI. Cada sitio de referencia se representó por medio de parcelas de réplica correspondientes a los principales gradientes de elevación de cada sitio. Con el fin de determinar qué parcelas de referencia de la base de datos resultaban adecuadas para su comparación con aquellas de los sitios de estudio de Converse, se seleccionaron sitios cuya categoría pertenecía a la misma clase morfológica (es decir, la clase de marisma salobre fluvial intermareal). De estos sitios de referencia se eligieron parcelas que coincidieran en elevación, frecuencia de inundación e hidropereodo, de forma que el rango de cada variable en las parcelas de referencia coincidiera en gran medida con el de las parcelas del sitio de estudio. El tamaño de las parcelas y los métodos de muestreo de la base de datos de referencia son idénticos a los utilizados en el programa de monitoreo del sitio de estudio, por lo que se pueden hacer comparaciones directas. Las parcelas de referencia se utilizaron para comparar la cubierta vegetal y la composición de las especies vegetales a lo largo del tiempo en el sitio de estudio de Converse, con el rango de valores encontrados en las parcelas de referencia.

Tres años después del reposicionamiento, el sitio sigue en transición, pero presenta una trayectoria de restauración satisfactoria. Con el regreso de las inundaciones provocadas por las mareas, las comunidades agrícolas fueron desapareciendo y las tasas de sedimentación alcanzaron niveles elevados al principio, aunque disminuyeron en los años siguientes a medida que los sedimentos se asentaron y consolidaron. Del emplazamiento, 74 por ciento se convirtió en terreno desnudo en el primer año de restauración, porcentaje que ha disminuido hasta 40 en el tercer año (véase la gráfica 2). La vegetación de las parcelas de monitoreo comienza a coincidir con la composición y diversidad de especies de las parcelas de referencia en algunas zonas de Converse (Bowron *et al.*, 2022).

Gráfica 2. Vista aérea oblicua del sitio de reposicionamiento controlado del dique de Converse, en el istmo de Chignecto



Fuente: Fotografía tomada el 25 de julio de 2021 (~2.5 años después de la restauración), por Samantha Lewis, CBWES, con un dron DJI Phantom 4.

2.3.3 Otros enfoques

Si bien las metodologías de monitoreo BACI y RCA representan las mejores prácticas, debe reconocerse la posibilidad de emplear otras metodologías cuando se comprenden bien los impactos del proyecto; durante fases específicas del ciclo de vida del proyecto, o cuando los plazos o recursos disponibles para el proyecto son limitados. Así, por ejemplo, cuando la intensidad del desarrollo o ejecución impide un control adecuado, o cuando los plazos del proyecto exigen una recopilación limitada de datos de referencia (como en los escenarios de respuesta a emergencias), puede resultar necesario recurrir a evaluaciones rápidas, al monitoreo del cumplimiento o a diseños con enfoques de evaluación *antes-después* (BA) o *control-impacto* (CI).

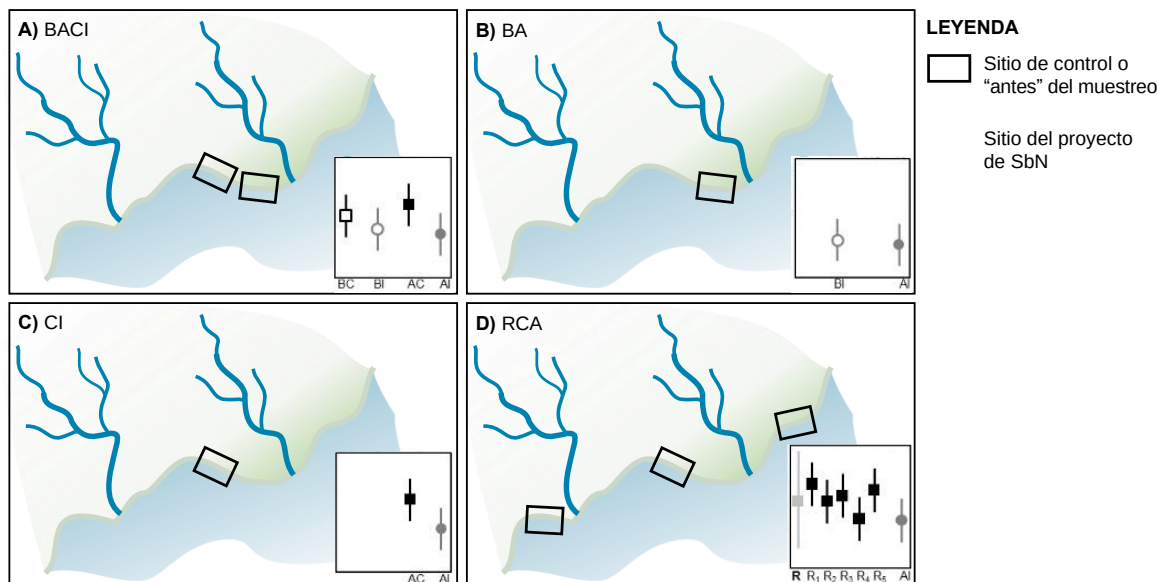
Las evaluaciones rápidas son útiles para “explorar” de forma preliminar las condiciones de un sitio, y la metodología específica a emplear dependerá de los objetivos del proyecto. En todos los casos, el propósito será registrar observaciones *in situ* que permitan adquirir un conocimiento más profundo que el que se lograría desde un escritorio, pero sin que ello implique un gasto elevado de recursos en un emplazamiento cuyo acceso puede resultar inviable. Cuando los sitios presentan condiciones de viabilidad, entonces será necesario llevar a cabo procesos de monitoreo más exhaustivo.

El monitoreo del cumplimiento —que puede incluir el monitoreo de una construcción, estudios de obra o levantamiento final y algunos o todos los protocolos de monitoreo a largo plazo— se lleva a cabo durante la implementación del proyecto, como se explica en el informe asociado sobre monitoreo de la eficacia de las SbN. Esta manera de monitorear garantiza el apego a los planes y programas del proyecto, así como el cumplimiento de los requisitos reglamentarios, además de aportar información con base en la cual sustentar el manejo adaptativo y cualesquiera cambios necesarios en el diseño. Más aún, el monitoreo del cumplimiento puede servir como punto de partida para el monitoreo a largo plazo.

Los enfoques de evaluación BA y CI se describieron ya (*supra*) como parte del enfoque BACI, aunque conviene señalar que cuando se utilizan de forma individual o separada, ambos presentan limitaciones. Determinar en qué medida los cambios observados se deben al “ruido” natural de fondo del entorno cambiante (que —se prevé— variará cada vez más como resultado del cambio climático) y hasta qué punto dichos cambios obedecen a la implementación del proyecto plantea grandes dificultades.

La gráfica 3 ilustra el modo en que los diseños de monitoreo BACI, BA, CI y RCA, y el correspondiente análisis estadístico, pueden presentarse.

Gráfica 3. Ejemplos de análisis espacial y estadístico para planes de monitoreo BACI, BA, CI y RCA



Nota: Los diagramas corresponden a datos hipotéticos para mostrar cómo se realizan las comparaciones entre sitios de control y de intervención (del proyecto), así como los periodos de muestreo. Los elementos en gris representan los sitios de intervención, y los negros, los de control; los puntos o cuadros abiertos corresponden a los sitios antes del inicio de la implementación, y los cerrados, a los sitios luego de la intervención.

Fuente: Figura modificada, tomada de Douglas *et al.*, 2019.

2.3.4 Consideraciones metodológicas generales

Independientemente de la metodología o enfoque de monitoreo que se seleccione para un proyecto concreto, la calidad del diseño experimental y las técnicas de muestreo influirán sobremanera en los resultados. El dicho “basura dentro, basura fuera” se aplica por igual al diseño experimental y al muestreo sobre el terreno. Si bien resulta inevitable tener cierto grado de error (por ejemplo, dos personas distintas que tomen muestras de un mismo elemento tendrán resultados o juicios o técnicas un tanto diferentes), la mejor práctica consiste en tratar de identificar cualesquiera posibles errores y planificar formas de minimizarlos en todos los ámbitos del proyecto. Por ejemplo, podría introducirse un sesgo de muestreo tan simple como elegir la estación o el momento en que se realiza el muestreo sin comprender cabalmente el sistema. Si el objetivo del muestreo de una zona consiste en determinar la diversidad de especies y su utilización, y la toma de muestras coincide con la época de migración de una determinada especie de peces, los resultados se sesgarán, mostrando que la especie más abundante que utiliza esa zona es la especie migratoria, cuando en realidad la especie más abundante a lo largo de todo el año puede ser una especie residente. Esto sería evidente si el lugar se sometiera a muestreo varias veces durante el periodo de trabajo de campo y a lo largo de varios años.

Para determinar la cantidad de puntos de muestreo, puede ser útil la realización de un análisis de potencia (cálculo formal que indica el número de muestras necesarias para detectar una diferencia significativa desde el punto de vista estadístico), aplicable tanto a la cantidad de repeticiones de un único punto de muestreo a lo largo del tiempo como a la cantidad de muestras dentro de una zona a fin de que resulte relevante en términos estadísticos (Brooks *et al.*, 2002). Si los sitios son de gran tamaño, puede resultar útil utilizar transectos permanentes (por lo general, espaciados uniformemente

a menos que sea importante capturar una característica de interés) o parcelar el emplazamiento en zonas de hábitat, ya sea con transectos o con puntos de muestreo ubicados aleatoriamente en función del tamaño de las zonas. La cuestión es que cada zona de hábitat tenga suficientes puntos de muestreo para que los datos puedan analizarse en forma estadística. Sin embargo, en muchos ecosistemas, la zonificación del hábitat carece de límites claros —en especial vistos desde el suelo—, por lo que su demarcación y monitoreo resultarán difíciles. El espaciado, ya sea para puntos de ubicación aleatoria o a lo largo de transectos, también puede ser complicado debido a la dificultad de acceso a estaciones de monitoreo o a consideraciones relacionadas con la seguridad de quienes realizan las inspecciones técnicas de campo, aspectos que deben tenerse en cuenta al diseñar la disposición de las estaciones. A lo anterior pueden sumarse consideraciones ambientales adicionales específicas de cada región (por ejemplo, zonas con nieve y hielo durante el invierno) que podrían afectar al acceso o aumentar el riesgo de pérdida de equipos instalados en el largo plazo.

Otra consideración relevante para el diseño de un programa de monitoreo es la frecuencia de la recopilación de datos. Aunque muchos factores pueden influir en esta elección, los aspectos más importantes a tener en cuenta suelen ser los objetivos del proyecto, el presupuesto, los recursos y las condiciones climatológicas. También hay que considerar la magnitud y el ritmo de cambio de ciertos indicadores de desempeño: algunos pueden progresar a un ritmo lento y con una magnitud que reduzca la capacidad de detectar cambios de forma fiable (por ejemplo, la elevación en un entorno micromareal); otros pueden cambiar rápida y drásticamente (por ejemplo, la posición de la línea costera tras una gran tormenta) y, por tanto, requieren una mayor frecuencia de muestreo (véase el apartado 4.4 del documento de orientación *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, asociado al presente informe). Además, la frecuencia de la recopilación de datos deberá tomar en cuenta el nivel de esfuerzo necesario para recabarlos, de manera que resulte adecuado, es decir, que corresponda con la información que tales datos pueden proporcionar a efecto de fundamentar el manejo adaptativo.

La definición que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) brinda de las SbN incluye como elemento inherente a este tipo de soluciones la necesidad de “abordar de manera efectiva y adaptativa los desafíos de la sociedad, beneficiando simultáneamente a las personas y la naturaleza” (Cohen-Shacham *et al.*, 2016, p. 19). Sin embargo, los impactos potenciales de las SbN en términos de resultados ambientales, sociales y económicos aún son poco conocidos y, en particular, los impactos socioeconómicos a menudo no se evalúan de forma sistemática. Por lo tanto, resulta clave integrar criterios de medición e indicadores de desempeño socioeconómicos en los programas de monitoreo de soluciones basadas en la naturaleza. Para lograrlo es importante incluir equipos multidisciplinarios y multisectoriales en el proceso de diseño y evaluación (Dumitru *et al.*, 2021). En el multimencionado documento de orientación sobre monitoreo de la eficacia de las SbN (asociado al presente informe) se encontrará información adicional en torno a las funciones y responsabilidades del monitoreo.

Una vez seleccionado un enfoque de monitoreo (como parte de la fase de planificación), los siguientes pasos consisten en identificar los indicadores de desempeño y las metodologías a utilizar (fases de planificación y diseño). En el apartado 3 se presentan los objetivos fundamentales, los criterios de medición y los indicadores de desempeño que suelen emplearse en los planes de monitoreo de SbN, a partir de las fuentes identificadas en el apartado 1.4 y de otros documentos pertinentes.

3 Criterios de medición, indicadores de desempeño y técnicas de monitoreo

Los indicadores de desempeño a considerar en el marco de un programa de monitoreo de SbN para el manejo de riesgos por inundación se eligen en función de los objetivos fundamentales y metas generales del proyecto (Neckles *et al.*, 2015). A su vez, tales objetivos y metas (definidos en colaboración con las personas o entidades titulares de derechos y las partes interesadas) determinan los criterios de medición del desempeño aplicables; es decir, en la fase de planificación del proceso de monitoreo se aplican diversos criterios de medición para determinar de qué manera se lograrán dichos objetivos y metas. En conjunto, objetivos fundamentales, metas generales y criterios de medición sirven de guía para elegir los indicadores de desempeño apropiados.

Las SbN en el marco de proyectos de manejo de riesgos por inundación se sustentan en las condiciones biofísicas y ecológicas que se crean para proporcionar beneficios derivados del MRI. Por lo tanto, muchos de los indicadores de desempeño críticos para los proyectos de MRI en sistemas ecológicos (parte intrínseca de las SbN) son factores físicos de control o parámetros de respuesta ecológica (Neckles y Dionne, 2000, y Neckles *et al.*, 2002), entre los que se incluyen elementos del entorno natural relacionados con la elevación, la geomorfología, las condiciones meteorológicas, las características del suelo y la hidrología. Estos factores físicos de control se combinan con aspectos biológicos, sociales y económicos que determinan los beneficios colaterales del MRI y de la SbN en cuestión. Así, los indicadores de desempeño incluyen parámetros biológicos (por ejemplo, comunidades de vegetación y uso de la fauna); parámetros sociales (como uso, estética y bienestar de la comunidad), y mediciones económicas (como el análisis costo-beneficio). Los criterios de medición corresponden a objetivos o metas alcanzables (que pueden traducirse directamente en acciones concretas); los indicadores de desempeño, por su parte, son los elementos que es preciso medir y muestrear para determinar en qué medida se están alcanzando los criterios de medición establecidos.

Por ejemplo, para un proyecto hipotético de manejo de riesgos por inundación que implique la restauración del hábitat de peces (en un humedal intermareal) mediante el reposicionamiento controlado de un dique, los objetivos fundamentales podrían ser: 1) restaurar el área de la llanura aluvial y la conectividad a fin de reducir el impacto de siniestros por tormentas y lograr un mejor manejo de las inundaciones; 2) restaurar los procesos costeros para mejorar la salud y función ecológicas del sistema, y 3) mantener la diversidad biológica típica del tipo de ecosistema en cuestión (es decir, velar por la sustentabilidad). Estos tres objetivos fundamentales determinarán, a su vez, los criterios de medición del desempeño aplicables, al igual que los correspondientes indicadores de desempeño a seleccionar. El cuadro 1 ofrece un breve ejemplo de cómo los objetivos fundamentales —o metas— de este proyecto teórico de MRI orientarán los posibles criterios de medición e indicadores de desempeño del proyecto.

Cuadro 1. Ejemplo de objetivos fundamentales de un proyecto y los correspondientes criterios de medición e indicadores de desempeño seleccionados en el plan de monitoreo

Objetivos fundamentales del proyecto	Criterios de medición del desempeño	Indicadores de desempeño
Reducir el impacto de siniestros por tormentas	Reducción del área de riesgo de inundación para un evento determinado	Nivel máximo de inundación, duración de la inundación (hidroperiodo), extensión o área máxima de inundación, índice de peligrosidad, frecuencia de inundación,

Objetivos fundamentales del proyecto	Criterios de medición del desempeño	Indicadores de desempeño
		condiciones del oleaje, mediciones de la forma o estructura del lecho
	Reducción de los efectos del oleaje en zonas determinadas	Atenuación del oleaje
	Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado	Prevención de daños materiales (infraestructura, viviendas, empresas)
Mejorar la salud y la función ecológicas	Restablecimiento del régimen natural de las mareas (condiciones hidrológicas)	Amplitud de las mareas, hidroperiodo, frecuencia de inundación, salinidad
	Restablecimiento de la dinámica de los sedimentos	Cambio positivo en la elevación de la superficie de la marisma, procesos naturales restablecidos (redistribución de sedimentos como resultado de perturbación por tormentas y depósitos de inundación)
	Aumento de la calidad del agua	Salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto coherentes con el sitio de referencia
Mantener la diversidad biológica	Mejora de las comunidades de vegetación natural de los humedales intermareales y expansión hacia terrenos aledaños alterados o con presencia de especies invasoras	Porcentaje de cobertura por especie, aumento en área, abundancia y densidad de vegetación halófila, comparación con el sitio de referencia
	Aumento o mantenimiento de las poblaciones de comunidades naturales de peces	Composición de la comunidad de peces, abundancia relativa por especie
	Optimización de la producción primaria de la vegetación autóctona	Composición de las especies, altura, densidad

Los protocolos de monitoreo y evaluación entrañan una serie de indicadores destinados a medir el éxito de la adaptación —incluidas adaptaciones basadas en los ecosistemas (o SbN)—, sobre todo por cuanto a los beneficios y cobeneficios relacionados con la resiliencia (Rizvi *et al.*, 2014). En general, estos indicadores corresponden a dos tipos: los que se basan en procesos (es decir, indicadores de entrada y de salida) y aquellos basados en el desempeño (es decir, que miden los resultados y el impacto) (Ritzi *et al.*, 2014). A estos últimos se les denomina también indicadores de resultados (ICLEI, 2022; Pearce-Higgins *et al.*, 2022).

Los indicadores basados en procesos se utilizan para realizar un seguimiento o medir el progreso hacia la consecución de un objetivo o meta concretos (ICLEI, 2022; Pearce-Higgins *et al.*, 2022). Su finalidad es monitorear el desarrollo y la implementación de estrategias de adaptación (Ritzi *et al.*, 2014), y pueden ser especialmente valiosos en horizontes temporales de corto a medio plazo, ya que aportan flexibilidad y alertan sobre posibles necesidades de manejo adaptativo (ICLEI, 2022, y Ritzi *et al.*, 2014.)

Los indicadores basados en los resultados se utilizan para medir el éxito o la eficacia de políticas, actividades, proyectos y programas de adaptación (ICLEI, 2022, y Ritzi *et al.*, 2014). Con frecuencia se les aplica en periodos más prolongados, en el entendido de que la medición del resultado o el éxito de una acción sólo puede realizarse una vez que ésta se ha implementado o completado. Por ejemplo, durante una tormenta, el éxito en la reducción de la erosión o en la disipación de la energía de las olas en una línea costera viva totalmente vegetada puede considerarse un resultado satisfactorio para un proyecto específico de SbN. Sin embargo, identificar un punto final para la medición puede resultar

complicado respecto de muchos indicadores ecológicos o ambientales. De ahí la dificultad de medir el “éxito” de una intervención cuando éste se define en términos de persistencia de especies, funcionamiento del ecosistema y suministro de servicios ambientales en el contexto de un clima cambiante (Pearce-Higgins *et al.*, 2022).

Para su selección, ambos tipos de indicadores del éxito de la adaptación —los basados en procesos y los basados en resultados— comparten muchas de las mismas consideraciones que suelen aplicarse al resto de los indicadores de desempeño descritos en el presente informe; es decir, han de basarse en criterios SMART, establecer condiciones de referencia (que permitan una base comparativa) y corresponder a objetivos asequibles (Ritzi *et al.*, 2014; ICLEI, 2022).

3.1 Aspectos generales de las categorías de desempeño

En términos generales, los indicadores de desempeño corresponden a beneficios que pueden dividirse en cuatro categorías interconectadas (Bridges *et al.*, 2021, y Shiao, 2020), claramente identificadas en el documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (complementario al presente informe), a saber:

- Beneficios por cuanto a manejo de riesgos por inundación (apartado 2.2),
- Cobeneficios ambientales (apartado 2.3),
- Cobeneficios sociales (apartado 2.4)
- Cobeneficios económicos (apartado 2.5).

Estas cuatro categorías guardan relación entre sí y son dinámicas. En la práctica, numerosos indicadores de desempeño pueden asociarse a más de una categoría de beneficios, siendo los objetivos del proyecto los que dictarán tanto la técnica de medición como la interpretación de los resultados. Un programa de monitoreo eficiente y eficaz suele incluir indicadores que cumplen una “doble función”, en el sentido de que permiten evaluar con una sola medición los avances registrados por cuanto a múltiples objetivos. En el cuadro 2 se presenta un resumen de posibles criterios de medición del desempeño (en correspondencia con los objetivos específicos de los proyectos) que suelen adoptarse en muchos programas de monitoreo de América del Norte, organizados por ecosistema (tipo de costa) y por categoría o tipo de beneficio. Por ejemplo, para todas las SbN analizadas, se utilizan componentes estructurales como criterio de medición por cuanto a MRI a fin de determinar la estabilidad de la solución (y a veces para confirmar su conformidad con permisos o autorizaciones), en tanto que elementos como el área y la cubierta vegetal (uno de los posibles componentes de una SbN) permiten estimar el valor del hábitat en la categoría de cobeneficios ambientales.

Los criterios de medición e indicadores pueden ser básicos (es decir, primarios, necesarios) o adicionales (secundarios, opcionales). **Los criterios de medición e indicadores básicos son fundamentales en la mayoría de los tipos de SbN, y pueden aplicarse en una amplia gama de contextos. Los indicadores adicionales pueden incluirse en función de los objetivos específicos de cada proyecto**, y se recomiendan también para sitios más complejos, para entornos donde las SbN en cuestión no han sido aplicadas ampliamente con anterioridad, o bien para aportar información a la futura implementación o investigación de las soluciones basadas en la naturaleza. Toda métrica que se aplique a más de la mitad del ecosistema identificado se categorizará como *criterio de medición básico*, aunque un mismo criterio podrá omitirse en aquellos sitios o costas donde no resulte de importancia crítica o no sea aplicables. Además, un mismo indicador de desempeño (por ejemplo, la elevación de la superficie) puede estar asociado a varios criterios de medición diferentes; por ello, hay casos en que algunos indicadores se clasifican como básicos y también como adicionales.

Los criterios de medición e indicadores básicos (primarios o necesarios) y adicionales (secundarios u opcionales) que deben tenerse en cuenta al abordar cada una de las cuatro categorías se examinan en los apartados siguientes.

Cuadro 2. Criterios de medición del desempeño organizados por categoría de beneficio y objetivos del proyecto para diferentes ecosistemas y tipos de SbN

Categoría de beneficio	Objetivos fundamentales del proyecto	 Criterio de medición básico  Criterio de medición adicional  No procede	Elementos sumergidos	Humedales y bajos intermareales	Bosques costeros y zonas boscosas	Playas y dunas	Islas	Elementos híbridos
Beneficios por cuanto a manejo de riesgos por inundación	Reducir el impacto de siniestros por tormentas	Reducción del área de riesgo de inundación para un evento determinado						
		Reducción de los efectos del oleaje en zonas determinadas						
		Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado						
	Mantener la integridad estructural y el desempeño	Mantenimiento de la estabilidad de los componentes estructurales						
	Mejorar la resiliencia del sistema	Mejora de la resistencia de la infraestructura o de las medidas de contingencia en caso de fallos						
Cobeneficios ambientales	Aumentar el valor del hábitat	Restablecimiento de un régimen hidrológico más natural						
		Mejora o mantenimiento de los atributos esenciales del hábitat, así como de la conectividad al interior de un sitio						
		Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (flora y fauna)						
		Aumento de la conectividad del hábitat con hábitats adyacentes						

Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos – Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras

Categoría de beneficio	Objetivos fundamentales del proyecto	Criterios de medición del desempeño  Criterio de medición básico  Criterio de medición adicional  No procede	Elementos sumergidos	Humedales y bajos intermareales	Bosques costeros y zonas boscosas	Playas y dunas	Islas	Elementos híbridos
		Mejora de la resiliencia del ecosistema						
		Productividad del suelo						
	Mitigar los efectos del cambio climático y fomentar la captación y almacenamiento de carbono	Reducción de la contaminación						
		Reducción de las emisiones de carbono						
		Captación y almacenamiento de carbono						
		Capacidad de amortiguamiento (química del agua)						
		Regulación del microclima						
	Mejorar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas	Reducción de la carga de sedimentos						
		Reducción de nutrientes						
		Recarga y almacenamiento de aguas subterráneas						
		Adecuación del hábitat acuático						
		Eliminación de toxinas y patógenos						
Cobeneficios sociales	Mejorar la salud y el bienestar	Mayor seguridad y tranquilidad						
		Conectividad con espacios verdes y sistemas naturales						

Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos – Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras

Categoría de beneficio	Objetivos fundamentales del proyecto	Criterios de medición del desempeño  Criterio de medición básico  Criterio de medición adicional  No procede	Elementos sumergidos	Humedales y bajos intermareales	Bosques costeros y zonas boscosas	Playas y dunas	Islas	Elementos híbridos
		Reducción del ruido						
		Seguridad alimentaria						
	Fomentar la equidad y la justicia	Equidad e inclusión						
		Reducción de la pobreza						
	Mejorar la estética y la protección del medio ambiente	Mejora de la estética						
		Mayor participación de la comunidad y custodia del medio ambiente						
		Percepción pública favorable del proyecto						
	Lograr consonancia con valores culturales y religiosos; proteger el patrimonio	Aportación de valor cultural, religioso o espiritual						
		Participación de comunidades indígenas o grupos marginados y custodia ambiental						
		Obtención de alimentos, recolección y usos tradicionales						
		Restablecimiento de usos históricos						
	Aportar usos recreativos y oportunidades para la educación	Espacios recreativos y de reunión (en mayor cantidad y más amplios)						
		Oportunidades educativas y para la investigación científica						

Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos – Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras

Categoría de beneficio	Objetivos fundamentales del proyecto	Criterios de medición del desempeño  Criterio de medición básico  Criterio de medición adicional  No procede	Elementos sumergidos	Humedales y bajos intermareales	Bosques costeros y zonas boscosas	Playas y dunas	Islas	Elementos híbridos
	Brindar beneficios adicionales en materia de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos	Mitigación de la mala calidad del aire o adaptación a sus consecuencias						
		Mitigación del calor extremo o adaptación al mismo						
Cobeneficios económicos	Aportar beneficios monetarios	Reducción de los costos de capital						
		Reducción de los costos operativos y de mantenimiento						
		Menores costos de infraestructuras adyacentes (prevención de pérdidas por inundación)						
		Disminución de las primas de seguros ante inundaciones						
		Aumento del valor de la tierra o la propiedad						
		Aumento de los ingresos fiscales						
	Tener un impacto positivo en la economía y las comunidades locales	Mejora de los medios de subsistencia pesqueros, agrícolas o artesanales						
		Oportunidades de empleo local						
		Oportunidades de ecoturismo						
		Disminución del costo de vida						
		Reducción del impacto de las inundaciones en las comunidades						

Los apartados a continuación se refieren también a los tipos de técnicas que pueden aplicarse para la medición cuantitativa o cualitativa de los indicadores de desempeño. Las técnicas identificadas se obtuvieron y adaptaron a partir de un taller realizado en 2017 por la Federación Nacional de Vida Silvestre (*National Wildlife Federation Workshop*) (MARCO, 2017), en el que se estableció un marco de monitoreo integral apoyado en iniciativas de ciencia comunitaria para la observación de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza. Las técnicas se dividen en métodos dirigidos por especialistas en la materia y métodos de ciencia participativa (aplicables por participantes en actividades de monitoreo comunitario y también en comunidades con recursos más limitados). Es importante reconocer que ambos métodos presentan una variación considerable en cuanto a dificultad y exigen distintos niveles de conocimientos, financiamiento y recursos. Los métodos que se emplean en la ciencia comunitaria suelen implicar el uso de indicadores indirectos en lugar de mediciones directas y suelen requerir cierta capacitación (desarrollo de habilidades) previa, a efecto de aprovechar al máximo su potencial. Estos métodos también pueden combinarse con tecnologías de mayor resolución con el fin de lograr una mayor precisión. Por ejemplo, quienes participen en el monitoreo pueden tomar fotografías de una zona inundada y proporcionar un marcador provisional de la extensión de la inundación; una vez que las aguas de la tormenta se hayan retirado, este marcador puede analizarse con un GPS de alta precisión e introducirse los datos en un programa informático de cartografía para delimitar y calcular con exactitud el área de inundación. Las técnicas identificadas también se fundamentan en los resultados de la serie de talleres intersectoriales sobre SbN que organizó DHI en nombre de la CCA en la primavera de 2022, así como en el informe complementario *Cobeneficios - Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*. Asimismo, se obtuvo material adicional a través de la extensa revisión de los métodos de monitoreo que llevaron a cabo Kumar *et al.* (2021). Cabe señalar que en la actualidad no se dispone de técnicas de ciencia comunitaria para ciertos indicadores, limitación que conviene abordar en trabajos futuros.

3.2 Indicadores de manejo de riesgos por inundación y técnicas de monitoreo

En las zonas costeras urbanas y periurbanas, el manejo de los riesgos derivados de las inundaciones constituye una cuestión de gran importancia. Como se ha mencionado, esta cuestión cobra especial importancia ante el aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático. Al evaluar el desempeño de las SbN en lo que concierne a sus beneficios por cuanto a MRI, deben seleccionarse indicadores que permitan conocer en qué medida la solución está reduciendo los riesgos de inundación (desempeño del sistema), así como el estado físico de la estructura a lo largo del tiempo (desempeño de la estructura) (Science and Resilience Institute, 2020, y Bridges *et al.*, 2021).

3.2.1 Criterios de medición básicos

Los objetivos fundamentales de los proyectos de SbN por cuanto a manejo de riesgos por inundación incluidos en el cuadro 2 son: 1) reducir el impacto de siniestros por tormentas; 2) mantener la integridad estructural y el desempeño, y 3) mejorar la resiliencia del sistema. Para determinar la consecución de estos tres objetivos pueden emplearse los criterios de medición básicos que se mencionan a continuación:

- Reducción del área de riesgo de inundación para un evento determinado
- Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado
- Reducción de los efectos del oleaje en zonas determinadas
- Mantenimiento de la estabilidad de los componentes estructurales
- Mejora de la resiliencia de la infraestructura o de las medidas de contingencia en caso de fallos

En función de tales criterios de medición se seleccionarán los correspondientes indicadores de desempeño del proyecto; es decir, los factores que deben medirse y monitorearse para determinar si se están cumpliendo los criterios básicos establecidos. Por ejemplo:

- Nivel máximo de inundación y profundidad del agua
- Extensión o área máxima de inundación
- Hidroperiodo: duración de la inundación
- Índice de peligrosidad: profundidad-velocidad
- Frecuencia de inundación
- Condiciones del oleaje
- Mediciones de la forma o estructura del lecho
- Prevención de daños materiales (infraestructura, viviendas, empresas)
- Atenuación del oleaje
- Elevación y localización de elementos (prospección)
- Medidas (dimensiones) de los elementos
- Integridad estructural de los materiales
- Características de los sedimentos

En el cuadro 3 se resumen los criterios de medición básicos determinados en función de los objetivos del proyecto y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

Las profundidades del agua o los niveles de anegamiento, la extensión de los desbordamientos y su duración son factores críticos para conocer el litoral y los efectos de las inundaciones y marejadas ciclónicas. Las marcas de agua, como la línea de pleamar ordinaria y el nivel medio del agua, son fundamentales en el monitoreo de procesos costeros, como la erosión y la distribución de componentes bióticos (vegetación, peces y otros elementos de la fauna). Este tipo de marcas —por ejemplo, la línea de marea alta, la pleamar superior o más alta, las predicciones de marejadas ciclónicas, el ascenso del oleaje (la distancia y elevación que alcanzan las olas tras romper) y el rebase del oleaje (desbordamiento de las olas por encima de la corona de la estructura costera)— constituyen también la base de muchos protocolos de evaluación de los riesgos por inundación. Así pues, se trata de indicadores fundamentales para la mayoría de los proyectos de MRI. Un ejemplo de excepción es la reducción de los efectos del oleaje, que puede no ser crucial o aplicable a todos los proyectos (por ejemplo, los que buscan crear llanuras de inundación en los tramos superiores de un estuario), aunque sí representa un criterio de medición básico en muchos casos. Cuando el objetivo principal del proyecto sea la disipación de energía o el control de la erosión, también puede resultar importante medir la atenuación del oleaje, además de las condiciones de las olas. Los efectos del oleaje pueden inferirse a partir de mediciones de la altura de las olas, ya sea de forma directa al medir el volumen de desbordamiento o rebase del oleaje o mediante monitoreo por video, o bien de forma indirecta a través de evaluaciones de daños u otros indicadores apropiados.

Otro criterio de medición básico de crucial importancia es la reducción de la exposición de los bienes materiales (incluidas infraestructuras, viviendas y empresas) al riesgo de inundaciones y tormentas. Indicadores como el número de propiedades que no han sufrido daños después de una tormenta gracias a la aplicación de una SbN deben considerarse *básicos* o clave, y son fáciles de medir utilizando datos anteriores y posteriores a la tormenta (por ejemplo, imágenes aéreas, levantamientos topográficos, cartografía municipal). Otros indicadores como la pérdida de vidas, el impacto en el acceso a servicios esenciales y el impacto en la calidad de vida pueden considerarse adicionales. Asimismo, algunos indicadores pueden combinarse para crear índices de riesgo adicionales, como ocurre con las matrices de profundidad-velocidad, que a menudo se utilizan para indicar niveles de riesgo de inundación en aumento, pero que pueden adaptarse o modificarse a fin de reflejar

diferencias en el riesgo (por ejemplo, el riesgo para personas adulta en contraste con el riesgo para menores de edad).

Los indicadores básicos relativos a los componentes estructurales y de estabilización de la línea costera incluyen la elevación y localización de elementos (de la SbN en cuestión); sus dimensiones y componentes; la integridad estructural; las características de los sedimentos, y el índice de cambio de la línea costera. Estos indicadores permiten establecer las condiciones iniciales, al comienzo de la implementación de la SbN, y realizar un seguimiento de la resiliencia de la solución a lo largo del tiempo. La dirección y la magnitud del cambio dependerán en gran medida del tipo de SbN que se implemente. Por ejemplo, se espera que el cambio de elevación sea positivo para estructuras en las que se prevé una acumulación de sedimentos (por ejemplo, humedales e islas), y acorde con los patrones anticipados si se prevé una pérdida a lo largo del tiempo (por ejemplo, playas en las que se planea un reabastecimiento o regeneración adicional). El monitoreo de los componentes estructurales también es importante en la toma de decisiones de manejo adaptativo en casos en que se espera que las dimensiones permanezcan estables; que disminuyan al ritmo previsto (por ejemplo, dado el deterioro de componentes grises), o bien que mejoren con el tiempo (por ejemplo, gracias al desarrollo de componentes verdes).

Cuadro 3. Criterios de medición básicos para el manejo de riesgos por inundación, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Reducción del área de riesgo de inundación para un evento determinado	Nivel máximo de inundación y profundidad del agua	Registro del nivel del agua (mediante registradores de datos HOBO y multímetros de la empresa Yellow Springs Instruments [YSI])	Aplicaciones para teléfonos inteligentes; entrevistas a la comunidad y recuerdos generacionales; registro manual del nivel del agua y de la línea de pleamar
	Extensión o área máxima de inundación	Superficie y porosidad de la marisma	Estimación de la superficie de la marisma; entrevistas a la comunidad y recuerdos generacionales
		Imágenes aéreas o topografía con drones RTK (línea de pleamar y marca de inundación)	Imágenes (fotografías) de teléfono móvil con geoetiquetado
	Duración de la inundación (hidroperiodo)	Registro del nivel del agua mediante registrador y SIG	Observación de líneas de pleamar; observación de la duración de la inundación
		Volumen de agua (modelo de cambio hidrodinámico)	Imágenes de teléfono móvil con geoetiquetado
	Frecuencia de inundación	Registro del nivel del agua a largo plazo	Registro del nivel del agua (registrador manual graduado o de banda)
		Repetición de mediciones RTK de las marcas de inundación	Entrevistas a la comunidad y recuerdos generacionales
		Repetición de imágenes por satélite de alta resolución (ejemplo, Sentinel)	Imágenes de teléfono móvil con geoetiquetado
	Condiciones del oleaje	Boyas metoceanicas de oleaje, perfilador acústico de corrientes por efecto Doppler (ADCP)	Formularios de la Red LEO de observadores ambientales locales

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		Sensores de presión del oleaje	Observaciones (por ejemplo, videos) del tráfico de embarcaciones y de las tormentas; mediciones con Google Earth del campo o alcance del viento; observación visual o automatizada de los medidores verticales de vara de cuerdas teñidas; datos anecdóticos de pescadores o navegantes recreativos
	Índice de peligrosidad (profundidad-velocidad)	Perfilador de corrientes (ADCP, velocímetro acústico Doppler)	Índices de caudal con disolución
		Volumen de agua (modelo de cambio hidrodinámico)	Videos de lapso de tiempo (<i>time-lapse</i>)
		Registro del nivel del agua	Registro del nivel del agua (registrador manual graduado o de banda)
	Mediciones de la forma o estructura del lecho	Sonar de barrido lateral (SSS), morfología del lecho	N/A
Reducción de los efectos del oleaje en zonas determinadas	Atenuación del oleaje	Modelos de altura de ola	Movimiento de material de sustitución
		Conjunto de sensores de presión (perfiladores ADCP o registradores de oleaje)	
		Altura del frente de las olas	
Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado	Prevención de daños materiales (infraestructura, viviendas, empresas)	Porcentaje de reducción de daños materiales (edificios, infraestructuras) como resultado de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza	Comparación de imágenes de Google Earth, Google Streetview, datos de fuentes abiertas (por ejemplo, mapas de calles de dominio público).
Mantenimiento de la estabilidad de los componentes estructurales	Elevación y localización de elementos (prospección)	Mediciones RTK GPS; modelo digital de elevación (MDE) con tecnología LiDAR	Fotografía aérea con dron, sin puntos de control
		Documentos de obra o levantamiento final	
		Drones aéreos con puntos de control	
		Batimetría y sonar de barrido lateral (SSS)	Fotografías geoetiquetadas, obtenidas a partir de recorridos en kayak o senderismo
	Medidas (dimensiones) de los elementos	Imágenes aéreas	Fotografías panorámicas
		Fotogrametría de los elementos	Fotografías antes y después de las tormentas
			Posición en relación con la pleamar o la bajamar medias
			Posición relativa a un elemento natural existente
			Distancia de amarre (mediciones de distancia a marcas fijas)

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Mejora de la resiliencia de la infraestructura o de las medidas de contingencia en caso de fallo	Integridad estructural de los materiales	Estudio de ingeniería por láser	Distancia desde la ubicación original
			Localización GPS de estructuras con base en planos de obra o levantamiento final
			Estancamiento o acumulación de agua
			Medición de las distancias de amortiguamiento o de retiro
	Medidas (dimensiones) de los elementos	Fotogrametría	Fotografías de la estructura o de las “líneas de percebes” (alcance del agua de mar)
			Altura/peso/longitud/volumen
	Características de los sedimentos	Granulometría de sedimentos (contador Coulter o difracción láser)	Integridad relativa (componentes no presentes, porcentaje de componentes faltantes, pérdida de suelo, desbordamiento)
			Estudio por cuadrantes
			Medición de dimensiones de materiales
			Observación del estado o condiciones de los materiales
			Evaluación visual de daños
			Análisis de la textura de los sedimentos
			Tamaño de roca o grano
			Altura/peso/longitud/volumen

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

3.2.2 Criterios de medición adicionales

Dependiendo de la naturaleza particular del proyecto de SbN, otros indicadores de desempeño relacionados con el manejo de riesgos por inundación pueden ser relevantes. Con miras a determinar el cumplimiento de los tres objetivos fundamentales antes mencionados, convendrá tener en cuenta criterios de medición adicionales; por ejemplo:

- Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado
- Reducción de la erosión
- Mejora del manejo de sedimentos (suministro y retención)

Los indicadores de desempeño —es decir, los factores cuya medición y monitoreo son necesarios para determinar si se están logrando los objetivos del proyecto— se seleccionarán en función de tales criterios de medición adicionales. Por ejemplo:

- Pérdida de vidas
- Impacto en el acceso a servicios esenciales
- Impacto en la calidad de vida
- Velocidad del flujo y caudal

- Mediciones de la forma o estructura del lecho
- Índice de cambio de la línea costera a lo largo del tiempo
- Cambio de elevación a lo largo del tiempo
- Características adicionales de los sedimentos

En el cuadro 4 se resumen los criterios de medición adicionales determinados y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

La selección de indicadores de desempeño adicionales dependerá del tipo de SbN que se implemente, de los objetivos específicos del proyecto y de la disponibilidad de recursos (entre otros, instrumentación y personal capacitado). Los indicadores adicionales asociados con la reducción de la exposición al riesgo de inundación incluyen la reducción de la pérdida de vidas, así como de los impactos en el acceso a servicios y en la calidad de vida. Es posible que la atribución directa de estos indicadores a las SbN implementadas se dificulte. En ese sentido, el monitoreo puede comprender la realización de encuestas comunitarias reiteradas, la comparación de las estadísticas vitales de las unidades de salud o la obtención de información de los medios de comunicación. Otra opción es utilizar sistemas de información geográfica (SIG) para identificar y cuantificar la longitud de las vías inundadas y la duración de las inundaciones que afectan al acceso a servicios esenciales.

El monitoreo de indicadores adicionales relativos a la consecución de los objetivos de reducción de marejadas ciclónicas e inundaciones —como el caudal, la velocidad del flujo y las mediciones de la forma o estructura del lecho en las zonas intermareales o mar adentro— puede requerir técnicas más intensivas y resulta de particular importancia para proyectos de gran envergadura o complejidad. Tales indicadores pueden evaluarse de manera directa, mediante equipos *in situ* y enfoques de modelización, o indirecta, mediante el monitoreo de estructuras que desempeñan un papel en la reducción de energía, como las formas o estructura del lecho (batimetría). La medición del índice de cambio de la línea costera podrá realizarse a corto o largo plazo, dependiendo del objetivo del proyecto.

Asimismo, entre los indicadores adicionales relativos a la prevención de la erosión podrían incluirse métodos más especializados o complejos de medición del cambio de elevación y características adicionales de los sedimentos, como la densidad aparente, el tamaño del grano y la capacidad portante. Estas características influyen en la estabilidad del litoral y en la capacidad de los componentes bióticos para establecerse y desarrollarse.

Cuadro 4. Criterios de medición adicionales para el manejo de riesgos por inundación, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Reducción de la exposición al riesgo de inundación en un evento determinado	Pérdida de vidas	Estadísticas vitales, de agencias comunitarias o de salud pública	Obituarios, estadísticas vitales, informes de los medios de comunicación
	Impacto en el acceso a servicios esenciales	Análisis SIG de carreteras inundadas y diferencias en el tiempo de acceso a servicios esenciales; informes comunitarios; estadísticas de acceso a servicios esenciales (visitas a clínicas y	Declaraciones en los medios de comunicación, redes sociales, imágenes fotográficas de carreteras inundadas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		hospitales, por mencionar un ejemplo); encuestas previas y posteriores, sondeos, grupos de discusión	
	Impacto en la calidad de vida	Encuestas previas y posteriores en los hogares; encuestas en la comunidad; grupos focales	Redes sociales, entrevistas a la comunidad
Reducción de la zona de riesgo de inundación en un evento determinado	Mediciones de la forma o estructura del lecho: dimensiones y movimiento	Sonar de barrido lateral (SSS): morfología del lecho	Fotografías tomadas con celular: geoetiquetadas y en las que aparezca algún objeto físico (por ejemplo, una regla o un cuaderno) como referencia de escala
		Estudios aéreos a baja altitud, topografía 3D	
Reducción de la erosión	Índice de cambio de la línea costera a lo largo del tiempo	Mediciones RTK GPS	Estación para la medición de la erosión costera: medición repetida de la distancia hasta la orilla o el borde de la marisma a partir de dos marcadores distintos (perpendiculares a la orilla, para mantener la línea recta)
		Imágenes aéreas; SIG	Plataforma Google Earth Engine
		Estudio de ingeniería	N/A
		Reconocimiento con drones (medición de cambios temporales y espaciales en los elementos)	Videos de lapso de tiempo (<i>time-lapse</i>) y fotografías tomadas con celular geoetiquetadas
Mejora del manejo de sedimentos (suministro y retención)	Cambio de elevación a lo largo del tiempo	Modelo digital de elevación (MDE); perfil de elevación a lo largo del transecto (mediciones RTK GPS); modelos de transporte de sedimentos	Nivel láser a punto de referencia
			Videos o imágenes fotográficas obtenidas con drones de uso recreativo
		Tabla de elevación de sedimentos	Marcadores de feldespatos o de arcilla feldespática (miden la acumulación de sedimentos)
		Fotografías	Fotografías (antes y después de las tormentas)
		Indicadores de horizonte	Soporte o base de medición y tránsito
			Monumento permanente (por ejemplo, varilla de acero)
			Aplicación móvil o web que recopila datos GPS de teléfonos celulares

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		Topografía con drones (3D); teledetección con tecnología LiDAR; batimetría por satélite	Video o imágenes de drones de uso recreativo
		Prospección costera: sonar de superficie	Movimiento de la superficie del sedimento en relación con el punto de referencia permanente
	Características adicionales de los sedimentos	Densidad aparente	Llenado de contenedores de volumen establecido
		Capacidad portante (estabilidad)	
		Sonar de barrido lateral (SSS); tipo de grano (por ejemplo, a partir de teledetección con tecnología LiDAR)	
		Mediciones RTK GPS	

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

3.3 Indicadores ambientales y técnicas de monitoreo

3.3.1 Criterios de medición básicos

Los objetivos fundamentales de un proyecto de SbN por cuanto a cobeneficios ambientales incluidos en el cuadro 2 son: 1) aumentar el valor del hábitat; 2) mitigar los efectos del cambio climático y fomentar la captación y almacenamiento de carbono, y 3) mejorar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Su consecución estará determinada por los siguientes criterios básicos de medición del desempeño:

- Restablecimiento de un régimen hidrológico más natural
- Mejora o mantenimiento de los atributos esenciales del hábitat, así como de la conectividad al interior de un sitio
- Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (flora y fauna)
- Mejora de la resiliencia del ecosistema
- Captación y almacenamiento de carbono

En función de tales criterios de medición se seleccionarán los correspondientes indicadores de desempeño del proyecto; es decir, los factores que deben medirse y monitorearse para determinar si se están cumpliendo los criterios básicos establecidos. Por ejemplo:

- Nivel del agua
- Extensión de la inundación
- Hidroperiodo (proporción, frecuencia y tiempo medio de inundación)
- Dimensión y geoposición de atributos o elementos esenciales del hábitat (por ejemplo, dunas, arrecifes, lechos de pastos marinos, entre otros)
- Porcentaje de cobertura de flora y diversidad o composición de especies

- Porcentaje de cobertura de taxones sésiles
- Salud de la flora y la fauna (condición o estado y supervivencia)
- Índice de persistencia y recuperación tras la tormenta
- Abundancia o densidad de especies indicadoras
- Densidad o altura de las plantas
- Reservas de carbono
- Acumulación neta de carbono en la biomasa
- Acumulación neta de carbono en el suelo

En el cuadro 5 se resumen los criterios de medición básicos determinados en función de los objetivos del proyecto y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

Las costas se definen por su interfaz tierra-agua, por lo que las variables hidrológicas constituyen importantes indicadores ambientales. La elevación relativa y la posición de los elementos terrestres o sumergidos pueden representar un indicador importante de la eficacia de proyectos en los que se ha elevado el terreno con el propósito de crear hábitats o mejorar la protección costera (véanse los cuadros 3 y 5). La superficie de tierra a una altitud determinada o con mayor elevación que la prevista también constituye un criterio de medición útil para indicar el desempeño de una SbN, en tanto que la profundidad del agua, al igual que la extensión, frecuencia y duración de las inundaciones, son indicadores hidrológicos importantes, relevantes no solamente en términos de MRI sino también por cuanto a las dimensiones ecológicas de los proyectos de soluciones basadas en la naturaleza (Wijsman *et al.*, 2021).

En la mayoría de los proyectos de SbN en sitios costeros, el seguimiento de los cambios en la elevación del terreno a lo largo del tiempo tiene una importancia crucial para la salud del ecosistema (Wijsman *et al.*, 2021). Las elevaciones dictan qué componentes bióticos y hábitats pueden ocupar la zona. Dado que las costas evolucionan con rapidez ante los cambios, comprobar visualmente la erosión o las alteraciones en los patrones del caudal puede resultar particularmente importante en las primeras fases del proyecto, como base para un manejo adaptativo. La selección de la técnica de monitoreo a emplear dependerá tanto de la frecuencia del monitoreo como de la magnitud del cambio. El monitoreo anual de los perfiles de elevación por medio de datos topográficos, tecnología LiDAR u otros modelos de elevación representa un componente común del monitoreo de SbN costeras (véase el cuadro 5).

Los procesos de transporte y acumulación de sedimentos guardan relación con los cambios de elevación. El monitoreo del movimiento de sedimentos puede realizarse mediante observaciones visuales o por medio del cálculo del cambio volumétrico (a partir de las diferencias en modelos digitales de elevación [MDE] obtenidos con tecnología LiDAR u otros modelos de elevación a lo largo del tiempo). Una opción frecuente para medir directamente la acumulación de sedimentos consiste en utilizar horizontes estratigráficos y tablas de sedimentos, que permiten diferenciar los procesos que tienen lugar en la superficie del suelo de los que ocurren en el subsuelo y detectar los cambios con una resolución más fina (de mm a cm) que otras técnicas. Estas técnicas suelen repetirse cada año durante las primeras fases de desarrollo de los proyectos de soluciones basadas en la naturaleza.

La vegetación es otro indicador de desempeño fundamental para muchas funciones ecológicas clave en los proyectos de SbN. Las plantas cumplen una función importante en la protección del litoral, la resiliencia y el manejo de la erosión. La cubierta vegetal y la abundancia de las especies que la conforman constituyen indicadores del éxito global de las SbN que entrañan procesos de plantación. Por cobertura se entiende en términos sencillos la superficie cubierta por cualquier tipo de vegetación (Wijsman *et al.*, 2021), que suele cuantificarse en forma de porcentaje. Los altos niveles de cobertura

vegetal suelen indicar funciones relevantes como la estabilidad del sustrato y la reducción de las tasas de erosión. La abundancia de especies en un sistema se determina asignando un valor de cobertura (porcentual) para cada especie o para un subconjunto de especies dominantes o significativas. Es importante identificar la abundancia relativa y la diversidad de las diferentes especies vegetales, incluidas las invasoras, cuyo impacto negativo en los sistemas puede ser duradero. Para ello, los inventarios de vegetación resultan de suma utilidad.

Al detectar todas las especies vegetales presentes en un lugar, o todas aquellas presentes en parcelas o transectos muestreados, los inventarios de vegetación permiten calcular también la riqueza de especies (el número de especies detectadas en cada zona) u otros parámetros de la biodiversidad. Dependiendo del contexto del sitio del proyecto, resumir los datos relativos a la abundancia de plantas en categorías funcionales de especies puede ayudar a evaluar indicadores respecto de las condiciones del lugar o de la integridad ecológica (por ejemplo, las halófilas —plantas adaptadas a la sal— pueden ser indicadores clave de la recuperación de la vegetación de las marismas salobres). Además, las inspecciones de la flora y la fauna antes y después de un evento de tormenta (persistencia, supervivencia, recuperación), así como de sus condiciones de salud a lo largo del tiempo, pueden utilizarse como indicadores de la resiliencia del ecosistema.

Los indicadores de vegetación cambian con el tiempo, sobre todo en el contexto de un sitio recién restaurado, por lo que un monitoreo continuado reviste gran importancia. La mayoría de los programas incluyen monitoreos anuales de la vegetación y, en los casos de proyectos de SbN en los que la creación de hábitats es prioritaria, se suelen incorporar comparaciones con uno o más lugares de referencia (Graham *et al.*, 2021). Dichas comparaciones permiten evaluar el grado de coincidencia de diversos indicadores entre los hábitats creados o restaurados mediante SbN y aquéllos de los sitios naturales de referencia.

Para los proyectos de SbN que afectan a hábitats sumergidos, como arrecifes de ostras o lechos de pastos marinos, también resultan de utilidad los indicadores de cobertura, abundancia relativa de especies y riqueza de organismos sésiles sumergidos, mismos que pueden seguir protocolos similares a los utilizados para la vegetación, así como dividirse en diferentes grupos funcionales que podrían indicar el desempeño de las SbN (por ejemplo, la cobertura de los organismos filtradores). De modo similar, la cobertura relativa de los distintos tipos de sustratos puede ser relevante tanto en las zonas sumergidas como en las terrestres; en ese sentido, dependiendo del contexto regional de la SbN, el rastreo o seguimiento de sargazo y otras algas, escombros, hormigón u otras cubiertas superficiales puede resultar pertinente (Wijsman *et al.*, 2021).

Las SbN costeras, en particular las que contemplan la creación de humedales, suelen dar lugar a la captación y almacenamiento de carbono azul. Si las evaluaciones del carbono azul se consideran de interés, los criterios de medición básicos podrían incluir la captación y almacenamiento de carbono (densidad de carbono orgánico —por unidad de superficie— y el ritmo de su acumulación —por superficie, por año—), en tanto que los indicadores clave de desempeño podrían corresponder a las reservas de carbono (cantidad de carbono que retiene el ecosistema en un momento dado) y a los volúmenes de carbono captado (procedente de la atmósfera o de otras fuentes) y almacenado (acumulado en biomasa y en el suelo) (Howard *et al.*, 2014). Ahora bien, para evaluar plenamente el papel de las SbN en la dinámica del carbono, conviene cuantificar las cantidades netas de carbono o equivalentes de CO₂, toda vez que las pérdidas debidas a la descomposición o la erosión deben tenerse en cuenta en el balance global del carbono o de los gases de efecto invernadero. En los hábitats dominados por plantas herbáceas, habrán de tomarse en cuenta las reservas de carbono subterráneo y los correspondientes índices de acumulación, ya que la biomasa sobre la superficie no constituye un sumidero de carbono estable, sino que se va sustituyendo año tras año. En cambio, en hábitats con plantas leñosas (por ejemplo, manglares o matorrales costeros) es importante evaluar las reservas de carbono tanto superficiales como subterráneas.

Cuadro 5. Criterios de medición básicos para cobeneficios ambientales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos de monitoreo	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Restablecimiento de un régimen hidrológico más natural	Nivel del agua	Registro del nivel del agua	Aplicaciones para teléfonos inteligentes
	Extensión de la inundación	Superficie y porosidad de la marisma	Estimación de la superficie de la marisma
		Imágenes aéreas o topografía con drones RTK (línea de pleamar y marca de inundación)	Imágenes (fotografías) de teléfono móvil con geoetiquetado
	Hidroperiodo (proporción de inundación, frecuencia de inundación, tiempo medio de inundación)	Volumen de agua (modelo de cambio hidrodinámico)	Observación de líneas de pleamar
		Registro del nivel del agua mediante registrador y SIG	Imágenes de teléfono móvil con geoetiquetado
Mejora o mantenimiento de los atributos esenciales del hábitat, así como de la conectividad al interior de un sitio	Dimensión, geoposición y elevación de atributos o elementos esenciales del hábitat (dunas, arrecifes, lechos de pastos marinos y demás), y cambios de elevación (por sedimentación o cobertura de desechos, entre otros)	Reconocimiento aéreo geoetiquetado (dron)	Medición de características diversas: altura, longitud, anchura y pendiente mediante cinta métrica y nivel láser sencillo, o clinómetro
		RTK GPS	
		Modelización numérica	Medición con cinta métrica
		Escaneado láser 3D (elementos sumergidos)	Medición de características de los elementos sumergidos (altura, longitud, anchura y rugosidad) utilizando cadenas métricas o fotografías
		Sonar de barrido lateral (SSS instalado en kayak o en embarcación)	Sondeo con ecosonda (frecuencia única) desde kayak o embarcación
		Niveles láser	Niveles láser
		Modelo digital de elevación (MDE); perfil de elevación a lo largo del transecto (mediciones RTK GPS); modelos de transporte de sedimentos	Nivel láser a punto de referencia
			Videos o imágenes fotográficas obtenidas con drones de uso recreativo
		Tabla de elevación de sedimentos	Marcadores de arcilla feldespática (para medición de acumulación de sedimentos)
		Mediciones RTK GPS	Examen por cuadrantes

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos de monitoreo	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (flora y fauna)	Porcentaje de cobertura vegetal	Ortomosaico georreferenciado con dron	Google Earth o equivalente
	Diversidad de especies	Índice de diversidad Shannon y otras mediciones de ausencia, abundancia y riqueza	Métodos de transectos o cuadrantes para el recuento y evaluación de la riqueza de especies; identificación de presencia o ausencia de grupos o gremios de organismos; operaciones relámpago de monitoreo de especies (<i>bioblitz</i>) con teléfonos móviles para captura de fotografías e identificación (por ejemplo, iNaturalist); núcleos bentónicos; muestreo de organismos acuáticos o sedimento con cerco, red de inmersión o tamiz; encuestas realizadas a practicantes de la pesca, la observación de aves y otras actividades relacionadas
	Porcentaje de cobertura de taxones sésiles	Imágenes aéreas (identificación, diversidad, cobertura)	Observación fotográfica
		Estudios bentónicos	Software de gestión de datos de la Red Canadiense de Biomonitorio Acuático (<i>Canadian Aquatic Biomonitoring Network, CABIN</i>)
	Abundancia o densidad de especies indicadoras	Índice de integridad o variaciones biológicas	N/A
		Marcado acústico/satelital	N/A
	Aumento del tamaño de la población a lo largo del tiempo	Crecimiento, reproducción y supervivencia de la flora y la fauna (por ejemplo, estudios de recursos florísticos)	N/A
	Densidad o altura de las plantas	Análisis de imágenes	Muestreo de parcelas (recuento de tallos); medición de alturas con cinta métrica
Mejora de la resiliencia del ecosistema	Salud de la flora y fauna (estado y supervivencia estacional)	Muestreo en cuadrantes y registro de condiciones de salud (densidad, estado saludable, en condiciones	Repetición de imágenes fotográficas geoetiquetadas; fotografías de muestreo en

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos de monitoreo	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		de estrés, en extinción); tasa de supervivencia anual de ejemplares de plantas identificados mediante un sistema RTK GPS	cuadrantes, y comparación con la escala de salud
	Persistencia y recuperación tras las tormentas	Repetición de muestreos aéreos a baja altitud o con cuadrantes pre y post tormenta; porcentaje de cobertura y rastreo de ejemplares vegetales	Repetición de imágenes fotográficas geoetiquetadas; fotografías de muestreo en cuadrantes, y porcentaje de cobertura
Captación y almacenamiento de carbono	Reservas de carbono	Mediciones de biomasa	Contenido de materia orgánica (por ejemplo, pérdida por ignición) y densidad aparente
		Reservas de carbono (acumulado en plantas y conversión de la cubierta vegetal)	
	Acumulación neta de carbono en la biomasa	Cambio en la biomasa subterránea o sobre la superficie	
	Acumulación neta de carbono en el suelo	Cambio en el carbono orgánico del suelo	
		Materia orgánica por conversión	
		Datación con plomo-210 para determinar el ritmo de captación y almacenamiento	

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

Estudio de caso 2. Reposicionamiento del dique y restauración del humedal intermareal

Sitio Belcher St. Marsh:

Reposicionamiento del dique y restauración del humedal intermareal

Belcher St. Marsh, Nueva Escocia
Canadá

Este proyecto consistió en la reconstrucción tierra adentro de un dique en mal estado y el restablecimiento de la hidrología de marea en la parte frontal del nuevo dique (véase la gráfica 4) (Graham *et al.*, 2021). La evaluación de referencia se llevó a cabo en 2017; el sitio, compuesto en su mayor parte por pastos abandonados y vegetación de humedales de agua dulce antes del reposicionamiento del dique, se halla cerca del punto más al interior de influencia de las mareas a lo largo del río Jijuktu'kwejk (río Cornwallis). La reconstrucción del dique se llevó a cabo en la primavera de 2018. El programa de monitoreo adoptó un enfoque BACI e incluyó varios indicadores de desempeño básicos (véase el cuadro 6), principalmente en las categorías de beneficios por cuanto a MRI y cobeneficios ambientales. Tras el restablecimiento de la hidrología mareal, la recuperación de la vegetación se produjo a gran velocidad después de la afluencia inicial de grandes cantidades de sedimentos. Entre las conclusiones extraídas cabe mencionar la importancia del impacto heredado de la maquinaria pesada en los sedimentos durante el proceso de reposicionamiento: la compactación de los sedimentos provocó erosión, que pudo resolverse mediante un manejo adaptativo (excavación de canales para dirigir el flujo e instalación de elementos vivos en el litoral).

Gráfica 4. Estado sin vegetación tras la construcción (año 1) y estado con vegetación (año 4)



Cuadro 6. Lista de métodos de monitoreo con indicadores de desempeño

Categoría	Indicadores de desempeño	Método de muestreo	Frecuencia de muestreo
Geoespacial	Dimensiones de los elementos del hábitat crítico	Imagen de ortomosaico tomada por un sistema de aeronave no tripulada (UAS); Modelo digital de superficie (DSM); unidad de prospección GNSS RTK	Según se requiera
	Elevación y localización de elementos	Modelo digital de elevación (DEM); unidad de prospección GNSS RTK G8 (o equivalente)	Anual
	Mapa de hábitats	Fotografía aérea de baja altitud; datos de vegetación	Anual
Hidrología	Hidroperiodo; nivel del agua	Registrador automático del nivel del agua (intervalos de 5 minutos)	Periodo mínimo de 29 días
	Extensión de la inundación	DEM; Señal de marea	Anual
Suelos y sedimentos	Cambio de elevación en el tiempo	Tabla de elevación de la superficie de la barra (RSET); horizontes estratigráficos (MH)	Anual
	Características de los sedimentos	Densidad aparente, contenido de materia orgánica, tipo de sedimento, contenido de agua	Anual
Vegetación	Porcentaje de cobertura vegetal	Basado en transectos; método de puntos de intersección (parcelas de 1 m ²)	Anual
	Diversidad de especies		
	Abundancia de especies indicadoras		
Recorrido durante el invierno	Condiciones invernales	Paseos invernales estructurados y documentación fotográfica	Anual

3.3.2 Criterios de medición adicionales

Dependiendo de la naturaleza particular del proyecto de SbN, otros indicadores de desempeño ambientales y relacionados con las funciones ecológicas resultarán relevantes. Así, a fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos fundamentales antes mencionados, convendrá tener en cuenta criterios de medición adicionales; por ejemplo:

- Aumento de la conectividad del hábitat con hábitats adyacentes
- Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (en términos de productividad de la vegetación)
- Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (en términos de aprovechamiento de la fauna)
- Productividad del suelo
- Reducción de la contaminación (mejora de la calidad del aire)
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero
- Capacidad de amortiguamiento (química del agua)
- Regulación del microclima
- Reducción de la carga de sedimentos
- Reducción de nutrientes
- Recarga y almacenamiento de aguas subterráneas
- Adecuación del hábitat acuático
- Eliminación de toxinas y patógenos

En función de tales criterios de medición adicionales se seleccionarán los correspondientes indicadores de desempeño —es decir, los factores cuya medición y monitoreo son necesarios para determinar si se están logrando los objetivos del proyecto—; por ejemplo:

- Mayor acceso a y entre hábitats por parte de organismos sésiles
- Altura y número de tallos de plantas (por unidad de superficie)
- Floración o fructificación de las plantas
- Densidades de población
- Éxito de anidación (aves)
- Hábitats bentónicos (peces)
- Calidad del agua (peces)
- Concentraciones de nutrientes en el suelo
- Mediciones de gases CO₂, CH₄, N₂O
- pH del agua
- Concentraciones de CO₂ en el agua
- Carbonatos
- Oxígeno disuelto
- Salud de las poblaciones de moluscos y crustáceos
- Temperatura (aire, suelo y agua)
- Total de sólidos en suspensión o concentración de sedimentos en suspensión
- Concentraciones de nutrientes en el agua
- Número de eventos o casos de contaminación
- Índice de recarga de las aguas subterráneas
- Capacidad de almacenamiento
- Niveles de bacterias en el agua
- Concentraciones tisulares

En el cuadro 7 se resumen los criterios de medición adicionales determinados y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

La conectividad de los hábitats es un factor de impulso que favorece la resiliencia a largo plazo de las poblaciones de organismos móviles presentes en sitios donde se implementan las SbN (Wijsman *et al.*, 2021). El valor de las SbN aumenta cuando los lugares logran y guardan conexión con otros hábitats de alta calidad. En ese sentido, los criterios de medición para determinar la conectividad a escala de paisaje pueden ser tan sencillos como evaluar la extensión de los hábitats naturales frente a la de la(s) infraestructura(s) artificial(es) presente(s) o adyacente(s): cuanto mayor sea el hábitat natural adyacente, mayor la conectividad (Sowińska-Świerkosz y García, 2021).

Un muestreo adicional de la biodiversidad suele resultar indicado cuando la creación de hábitats se orienta a la conservación de especies raras. Muchos proyectos de SbN se dirigen a crear o mejorar hábitats de reproducción para aves y requieren una serie de indicadores que permitan conocer las densidades de población, el éxito de anidación u otras variables; por lo general, el monitoreo en estos casos es anual y debe completarse con protocolos adecuados para minimizar el daño o perturbación de las poblaciones que anidan.

En numerosos programas de monitoreo también se incluye a las poblaciones de peces para evaluar la contribución de las SbN a la creación o mejora del hábitat de peces. Al igual que ocurre con el muestreo de poblaciones de aves, el muestreo de peces suele realizarse mediante procedimientos de captura y liberación, pero también es posible incluir otros indicadores del hábitat de peces, entre los que se incluyen superficie de diferentes hábitats bentónicos, así como profundidad, velocidad, calidad y temperatura del agua (Braun *et al.*, 2019). Asimismo, la evaluación de la calidad del agua puede incluir un muestreo del pH, el oxígeno disuelto, los nutrientes, la concentración de sedimentos en suspensión, la salinidad u otros parámetros, mismos que pueden constituir indicadores relevantes en situaciones en las que éstos pudieran resultar factores limitantes para los organismos acuáticos.

Otros indicadores de desempeño relacionados con la vegetación pueden incluir la altura y el número de tallos de plantas (por unidad de superficie), variables que pueden revelarse importantes para comprender la salud general y la productividad de las comunidades vegetales, pero que también son determinantes de la capacidad de la vegetación para moderar la altura y la energía de las olas (Denny, 2021), y cuyo muestreo —sobre todo un muestreo de plantas más detallado— suele requerir más tiempo que las estimaciones de cobertura, por lo que la decisión por cuanto a su utilización debe evaluarse con detenimiento. La floración o fructificación de las plantas también representa un indicador significativo del desempeño del sistema, especialmente si se incluyen hábitats de plantas raras como parte de los objetivos del proyecto o si el sitio de aplicación de la SbN es adyacente a tierras agrícolas y puede servir de apoyo a los polinizadores. Además, la floración puede monitorearse a un costo no muy elevado mediante la estimación visual de la cobertura, composición y riqueza de especies, y también puede incluirse como componente del monitoreo fotográfico.

Cuadro 7. Criterios de medición adicionales para cobeneficios ambientales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Aumento de la conectividad de	Mayor acceso a y entre hábitats por parte de organismos sésiles	Análisis SIG de hábitats adyacentes	Google Earth o sistema equivalente

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
hábitats con hábitats adyacentes			
Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (en términos de productividad de la vegetación)	Altura y número de tallos de plantas (por unidad de superficie)	Medición de la altura de las plantas y recuento de tallos	Medición de la altura de las plantas y recuento de tallos
	Floración o fructificación de las plantas	Estimación visual de la cobertura; composición o riqueza de especies; observación fotográfica (fotografía aérea de alta resolución a baja altitud)	Estimación visual de la cobertura; composición o riqueza de especies; observación fotográfica
Aumento de la biodiversidad y del uso del hábitat (en términos de aprovechamiento de la fauna)	Densidades de población; éxito de anidación (aves); hábitats bentónicos (peces); calidad del agua (peces)	Muestreos de especies (por ejemplo, captura y liberación); muestreo y gestión de datos en el marco de la red CABIN (invertebrados); estudios bentónicos	Inspección visual; monitoreo y muestreos de eBird y CABIN; observación fotográfica
Productividad del suelo	Concentraciones de nutrientes en el suelo	Análisis de nutrientes en el suelo (laboratorios públicos o comerciales)	Paquetes de análisis del suelo (de uso en jardinería) para el análisis de nutrientes básicos
Reducción de la contaminación (mejora de la calidad del aire)	Índice de la calidad del aire	Monitoreo continuo (en tiempo real, automatizado); monitoreo no-continuo (discreto, manual); monitores móviles	Monitores móviles
	Ozono troposférico (O ₃); partículas finas (PM _{2.5}); monóxido de carbono (CO); dióxido de azufre (SO ₂); azufre total reducido (TRS); óxidos de nitrógeno (NO _x); compuestos orgánicos volátiles (COV)		
Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero	Mediciones de gases CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Analizador portátil de gases de efecto invernadero (GEI), con cámaras de flujo automatizadas	Cámaras estáticas —hechas a mano— para muestreo de gases, extracción del gas con jeringa y envío de la muestra al laboratorio de análisis
Capacidad de amortiguamiento (química del agua)	pH del agua	Sensores de conductividad, temperatura y profundidad	Sensores de conductividad, temperatura y profundidad
	Concentraciones de CO ₂ en el agua		
	Carbonatos		
	Oxígeno disuelto		

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
	Salud de las poblaciones de moluscos y crustáceos	Estudios de moluscos y crustáceos	Estudios de moluscos y crustáceos
Regulación del microclima	Temperatura (aire, suelo y agua)	Estación meteorológica en tiempo real o sensor de temperatura	Estación meteorológica
Reducción de la carga de sedimentos	Total de sólidos en suspensión o concentración de sedimentos en suspensión	Análisis de muestras de agua para determinar el total de sólidos en suspensión; muestreador de agua automatizado	Evaluación de la claridad o turbidez del agua (por ejemplo, con disco de Secchi); kit comercial de muestreo (por ejemplo, medición de clorofila-a)
Reducción de nutrientes	Concentraciones de nutrientes en el agua	Muestreo del agua (a gran escala)	Observación de la aparición de floraciones de algas
		Capacidad de filtración de los moluscos (pequeña escala)	Medición de la densidad y el tamaño de las ostras
		Mediciones de la carga de nutrientes (antes y después o control y referencia)	Kits comerciales de muestreo
		Reducción modelizada basada en bibliografía o protocolos aprobados	<i>Ninguno conocido</i>
		Modelización de la carga de nitrógeno (por ejemplo, uso del suelo en la cuenca)	<i>Ninguno conocido</i>
		Multímetros (por ejemplo, YSI)	Multímetros (por ejemplo, YSI)
	Número de eventos o casos de contaminación	Frecuencia o volumen de descargas por desbordamiento del alcantarillado combinado	Notificación de descargas de desbordamiento del alcantarillado combinado, o problemas de infraestructura de alcantarillado o drenaje; notificación de muerte de peces o fauna silvestre
Recarga y almacenamiento de aguas subterráneas	Índice de recarga de las aguas subterráneas	Análisis de hidrogramas y fluctuaciones del nivel freático	<i>Ninguno conocido</i>
	Capacidad de almacenamiento	Cálculos o análisis de almacenamiento de aguas subterráneas	<i>Ninguno conocido</i>
Adecuación del hábitat acuático	O ₂ disuelto		
	pH del agua		

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
	Temperatura del agua	Sensores de conductividad, temperatura y profundidad (muestreo directo del agua)	Sensores de conductividad, temperatura y profundidad (muestreo directo del agua)
Eliminación de toxinas y patógenos	Niveles de bacterias en el agua	Muestreo de coliformes fecales o enterococos	Kits comerciales de muestreo; notificación de cierre de playas
	Concentraciones tisulares	Muestras de tejidos vegetales (para determinar niveles tóxicos)	Recolección y envío de muestras vegetales
		Análisis de metales pesados en peces o en sedimentos	Envío de peces capturados para su análisis

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

3.4 Indicadores sociales y técnicas de monitoreo

3.4.1 Criterios de medición básicos

Los objetivos fundamentales de los proyectos de SbN por cuanto a cobeneficios sociales esbozados en el cuadro 2 son: 1) mejorar la salud y el bienestar; 2) fomentar la equidad y la justicia; 2) mejorar la estética y la protección del medio ambiente; 4) lograr consonancia con valores culturales y religiosos, y proteger el patrimonio; 5) aportar usos recreativos y oportunidades para la educación, y 6) brindar beneficios adicionales en materia de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos. Con vistas a determinar la consecución de estos seis objetivos fundamentales, se establecen criterios básicos de medición del desempeño entre los que destacan:

- Mayor seguridad y tranquilidad
- Conectividad con espacios verdes y sistemas naturales
- Mejora de la estética
- Mayor participación de la comunidad y custodia del medio ambiente
- Percepción pública favorable del proyecto
- Aportación de valor cultural, religioso o espiritual
- Reducción de la pobreza
- Participación de comunidades indígenas o grupos marginados y custodia ambiental
- Equidad e inclusión
- Aportación de beneficios adicionales en materia de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos

En función de tales criterios de medición se seleccionarán los correspondientes indicadores de desempeño del proyecto; es decir, los factores que deben medirse y monitorearse para determinar si se están cumpliendo los criterios básicos establecidos. Por ejemplo:

- Percepción pública de la seguridad
- Salud física
- Salud mental y bienestar
- Sensación de pertenencia al lugar

- Valor cultural o indígena
- Redes sociales: publicaciones positivas
- Noticias y artículos de prensa
- Población en situación de pobreza
- Demografía de la población (sexo, etnia, edad)
- Cambio en la cantidad de basura tirada o arrojada en espacios públicos o naturales
- Índice de uso
- Implicación de la comunidad
- Conectividad entre el proyecto y espacios verdes y sistemas naturales

Los principales criterios de medición básicos e indicadores de desempeño correspondientes se sintetizan en el cuadro 8, junto con las posibles técnicas o métodos de monitoreo.

Los cobeneficios sociales constituyen un componente fundamental de las SbN. Por lo tanto, la aceptación social y la percepción pública favorable de la solución son elementos esenciales para determinar su desempeño. Las mediciones del grado de conocimiento, concientización y participación pueden utilizarse para seguir los avances por cuanto a la consecución de determinados objetivos de comunicación de un proyecto (Harley y Van Minnen, 2009). Estos indicadores son útiles para calibrar el interés y la aceptación de las SbN por parte de la comunidad. Además, puesto que los beneficios de las SbN en lo tocante a mitigar el cambio climático no se distribuyen de manera uniforme entre los grupos sociodemográficos, a la hora de diseñar programas de monitoreo y evaluación de este tipo de soluciones resulta importante seleccionar mediciones de referencia adecuadas para los indicadores de desempeño (Dumitru *et al.*, 2020), que pueden variar en función de las distintas comunidades y sus valores. Las SbN ofrecen también la posibilidad de fomentar la creación de entornos humanos sustentables mediante la mejora de los espacios verdes, el fortalecimiento del vínculo entre las personas y la naturaleza, la promoción de la cohesión social y la mejora del bienestar general de la población (Wendling *et al.*, 2021; Dumitru *et al.*, 2020). Los indicadores básicos de desempeño se relacionan, pues, con el impacto directo del proyecto en la comunidad o el grado de interacción comunitaria con el proyecto. Incluyen encuestas de percepción en las que se cotejan los objetivos de desempeño anticipados por el proyecto con las percepciones del público respecto al resultado previsto. Para ello pueden utilizarse encuestas o grupos focales, y con los resultados crearse campañas educativas específicas o introducirse cambios en la comunicación y los mensajes públicos. Los métodos primarios de medición incluyen encuestas, grupos de discusión y reuniones comunitarias. Alternativamente, entre las mediciones indirectas se cuentan el monitoreo de plataformas de redes sociales, prensa y medios de comunicación, y las entrevistas con líderes de confianza dentro de la comunidad. En el documento de orientación *Cobeneficios - Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (complementario al presente informe) se ofrecen más detalles, mismos que se encuentran en forma ampliada en *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: Appendix of Methods* [Evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza: apéndice de métodos] de Dumitru y Wendling (2021).

Con el fin de aumentar la probabilidad de una gestión sustentable y justa, un proyecto exitoso de SbN debe integrar de manera respetuosa y apropiada a las diferentes comunidades —con sus respectivas culturas y sistemas de conocimiento— que puedan verse afectadas por un cambio en las estrategias de manejo (por ejemplo, la transición de una infraestructura gris a la utilización de soluciones basadas en la naturaleza) (Van Proosdij *et al.*, 2021). Esta aproximación incluye consideraciones de equidad, inclusión y mayores participación y custodia ambiental por parte de comunidades indígenas y grupos marginados, aspectos que pueden considerarse criterios básicos de medición del desempeño, en tanto que los correspondientes indicadores de desempeño comprenderían variables sociodemográficas (por ejemplo, ingresos, raza, sexo, género, idioma, ciudadanía, edad y capacidad) que pueden derivarse de encuestas censales. Ahora bien, es posible que no se disponga de datos estadísticos a la escala

necesaria para su consideración en áreas pequeñas, en cuyo caso puede recurrirse a personal de gobiernos y de organizaciones de planificación y desarrollo comunitario locales, así como integrantes de organizaciones que prestan servicios, que conocen sus comunidades y pueden compartir conocimientos locales mediante entrevistas y encuestas semiestructuradas (Van Proosdij *et al.*, 2021).

Cuadro 8. Criterios de medición básicos para cobeneficios sociales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Mayor seguridad y tranquilidad	Percepción pública de la seguridad	Encuestas previas y posteriores, grupos de discusión, sondeos y entrevistas	Encuestas y sondeos en línea, entrevistas
	Medios de comunicación: información favorable	Monitoreo automatizado de noticias (incluidos artículos o piezas sobre el impacto de las tormentas); análisis de contenido	Registro del número de artículos en prensa y otros medios de comunicación
	Redes sociales: publicaciones positivas	Monitoreo automatizado de redes sociales	Opiniones positivas o “me gusta” en plataformas de redes sociales vinculadas a grupos de miembros de la comunidad
	Salud mental y bienestar	Encuestas previas y posteriores, grupos de discusión, sondeos y entrevistas; seguimiento y registro de encuestas de salud mental y bienestar comunicadas por integrantes de la comunidad	Encuestas y sondeos en línea; publicaciones (contenido) en redes sociales
Percepción pública favorable del proyecto	Percepción pública (del proyecto)	Encuestas previas y posteriores, grupos de discusión, sondeos, entrevistas	Encuestas y sondeos en línea, entrevistas
	Redes sociales: publicaciones positivas	Monitoreo automatizado de redes sociales	“Me gusta” y “compartir” en plataformas de redes sociales vinculadas a grupos de miembros de la comunidad
Mejora de la estética	Redes sociales: fotografías	Monitoreo automatizado de redes sociales	Fotos cargadas, compartidas y etiquetadas con “me gusta”
Mayor participación de la comunidad y custodia del medio ambiente	Cambio en la cantidad de basura tirada o arrojada en espacios públicos o naturales	Análisis de eventos de limpieza del entorno; estadísticas y registros de servicios municipales de manejo de residuos;	Registro de la cantidad de basura recogida en eventos comunitarios de limpieza del entorno

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		denuncias de descargas ilegales de residuos.	
	Índice de uso	Encuestas sobre disposición de usuarios a pagar; conteo de personas	Registro de número de voluntarios y participación pública en los eventos, así como número de eventos realizados
	Implicación de la comunidad	Identificación de prioridades de ONG por cuanto a financiamiento	Donaciones
Conectividad con espacios verdes y sistemas naturales	Conectividad entre el proyecto y espacios verdes y sistemas naturales	Análisis SIG	Google Earth, encuestas
Aportación de valor cultural, religioso o espiritual	Sensación de pertenencia al lugar	Entrevistas, grupos de discusión, encuestas; arte y expresiones creativas	Entrevistas, encuestas; arte y expresiones creativas
Participación de comunidades indígenas y custodia ambiental	Valor cultural o indígena	Entrevistas, grupos de discusión, encuestas	Participación de comunidades indígenas
Obtención de alimentos, recolección y usos tradicionales	Uso tradicional	Encuestas sobre conocimientos tradicionales; entrevistas	Entrevistas, medios sociales
Reducción de la pobreza	Reducción del número de hogares que viven en condiciones de pobreza	Encuestas, censos, entrevistas, estadísticas sociodemográficas	Censos, entrevistas, encuestas disponibles de forma pública
Equidad e inclusión	Diversidad sociodemográfica	Censos sociodemográficos, encuestas, entrevistas	Censos, sondeos, encuestas disponibles de forma pública
Participación de minorías o grupos históricamente marginados y custodia ambiental	Valor cultural o social	Entrevistas, grupos de discusión, encuestas	Participación de minorías o grupos históricamente marginados
Beneficios adicionales en materia de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos	Encuesta de percepción	Entrevistas a expertos; adopción de SbN en planes municipales de adaptación al cambio climático	Conferencias o presentaciones de especialistas invitados; número de asistentes; encuestas de percepción y experiencia del público
	Salud física	Comparación de los efectos de fenómenos extremos; hospitalizaciones y visitas	Número de avisos o advertencias sobre calidad del aire; número

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Mitigación de la mala calidad del aire o adaptación a sus consecuencias Mitigación del calor extremo o adaptación al mismo		a urgencias (por eventos de calor y enfermedades respiratorias)	de alertas por calor; número de avisos de eventos de inundación

3.4.2 Criterios de medición adicionales

En función de la naturaleza particular del proyecto de SbN, otros parámetros de desempeño relacionados con aspectos o beneficios sociales podrán revestir importancia. A continuación se enumeran posibles criterios de medición adicionales que pueden contribuir a determinar el cumplimiento de los objetivos fundamentales identificados y antes mencionados:

- Reducción del ruido
- Seguridad alimentaria
- Restablecimiento de usos históricos
- Espacios recreativos y de reunión (en mayor cantidad y más amplios)
- Oportunidades educativas y para la investigación científica

En función de tales criterios de medición adicionales se seleccionarán los indicadores de desempeño; es decir, los factores que han de medirse y monitorearse para determinar si se están logrando los objetivos del proyecto. Por ejemplo:

- Nivel de ruido
- Disponibilidad de alimentos
- Usos históricos actuales
- Uso recreativo
- Condición física (de la población)
- Estudios científicos
- Oportunidades educativas

En el cuadro 9 se resumen los criterios de medición adicionales determinados y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

Otras mediciones relativas al desempeño y el éxito de las SbN se refieren al fortalecimiento de las capacidades sociales y la participación comunitaria en actividades de educación ambiental. Junto con la custodia del medio ambiente, la educación ambiental es un factor decisivo en el aumento del apoyo comunitario y su participación en actividades relacionadas con las SbN (Wendling *et al.*, 2021). La participación comprometida también guarda relación con el sentido de pertenencia y el apego a un lugar, ambos aspectos a menudo asociados con valores culturales. Los criterios de medición del valor cultural o indígena pueden incluir el restablecimiento de usos históricos y la expresión de la sensación de pertenencia a un lugar, entre muchos otros. Además, los proyectos de SbN pueden aumentar el uso recreativo y proporcionar importantes beneficios colaterales para la salud y el bienestar (Wendling *et al.*, 2021).

Cuadro 9. Criterios de medición adicionales para cobeneficios sociales, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Reducción del ruido	Nivel de ruido	Sonómetro y dosímetro	Número de quejas por ruido
Seguridad alimentaria	Disponibilidad de alimentos	Encuestas; estudios sobre uso de bancos de alimentos y mercados de agricultores o productores locales	Encuestas; registro de número de vendedores de comida local; entrevistas locales
Restablecimiento de usos históricos	Uso contemporáneo de actividades o prácticas históricas	Entrevistas; grupos de discusión; sondeos y encuestas	Publicaciones en redes sociales; encuestas sobre el uso de elementos del entorno
Espacios recreativos y de reunión (en mayor cantidad y más amplios)	Uso recreativo	Encuestas sobre el uso de elementos del entorno (tipo y cantidad); recuentos por teledetección; registros de número de visitantes, alquileres, etc.; monitoreo automatizado de redes sociales	Registro del número de sitios de accesos públicos; observaciones de uso; recuento de automóviles; encuestas de entrada; publicaciones (contenido) en redes sociales
		Métricas de la aplicación Fitbit o seguimiento automatizado de la condición física de la población	Publicaciones (contenido) en redes sociales, grupos y aplicaciones relacionadas con el acondicionamiento físico
	Condición física de la población	Prevalencia de enfermedades cardiovasculares o respiratorias	Encuestas
Oportunidades educativas y para la investigación científica	Estudios científicos	Registro de número de publicaciones con revisión de pares y de estudios inéditos; presentaciones en congresos	Registro del número de estudios científicos; informes en medios de comunicación
	Oportunidades educativas	Integración de las SbN en los planes de estudios académicos (todos los niveles); señalización educativa	Registro de número de cursos; excursiones, públicas y escolares; eventos de divulgación

3.5 Indicadores económicos y técnicas de monitoreo

Lo que distingue a las SbN de otros enfoques, como el enfoque ecosistémico o la ingeniería ecológica, es que las soluciones basadas en la naturaleza exigen tener en cuenta múltiples perspectivas de los vínculos entre y al interior de los sistemas ecológicos, sociales y económicos,

así como considerar las diversas consecuencias sociales y ambientales de cualquier intervención (Nesshöver *et al.*, 2017). Si bien muchos costos asociados a las SbN tienen valores monetarios claros que pueden cuantificarse, son numerosos los cobeneficios (en particular, los ecológicos o ambientales y los sociales) cuya naturaleza es menos tangible o incluso intangible; sin embargo, no por ello dichos beneficios intangibles dejan de tener un valor real para las comunidades (Van Proosdij *et al.*, 2021). En ese sentido, cuando un proyecto de SbN tiene objetivos tanto ambientales como económicos, el marco estadístico Contabilidad de los Ecosistemas, del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE), constituye una herramienta alternativa y de gran alcance que ayuda a cuantificar —e incluso optimizar— los cobeneficios del proyecto en lo ambiental y en lo económico (véase el recuadro 1).

Al igual que se hizo para las otras categorías, a continuación se resumen los posibles criterios de medición e indicadores de desempeño —tanto básicos como adicionales— que pueden emplearse para determinar el logro de cobeneficios económicos de un proyecto de SbN.

3.5.1 Criterios de medición básicos

Los objetivos fundamentales de un proyecto de SbN por cuanto a cobeneficios económicos esbozados en el cuadro 2 son: 1) aportar beneficios monetarios, y 2) tener un impacto positivo en la economía y las comunidades locales. Con miras a su consecución, se proponen criterios básicos de medición del desempeño entre los que destacan:

- Reducción de los costos de capital
- Reducción de los costos operativos y de mantenimiento
- Mejora de los medios de subsistencia pesqueros, agrícolas o artesanales
- Oportunidades de empleo local

A su vez, en función de tales criterios de medición, se seleccionarán los correspondientes indicadores de desempeño del proyecto; es decir, los factores que deben medirse y monitorearse para determinar si se están cumpliendo los criterios básicos establecidos. Por ejemplo:

- Costos de capital
- Costos de mantenimiento y reparación
- Ingresos económicos
- Número de puestos de trabajo y otras estadísticas de empleo

Los principales criterios de medición básicos e indicadores de desempeño correspondientes se sintetizan en el cuadro 10 (junto con las posibles técnicas o métodos de monitoreo).

Las SbN pueden requerir grandes inversiones en materiales y energía, de manera que resulta necesario reconocer la correlación entre ventajas y desventajas, y las posibles concesiones o compromisos a realizar, sobre todo desde el punto de vista económico, como parte de su instrumentación (por ejemplo, la restauración de humedales puede proporcionar protección ante inundaciones, además de beneficios colaterales asociados como la purificación del agua, aunque podría repercutir desfavorablemente en la agricultura local por la reconversión de tierras de cultivo de alta calidad). Por lo tanto, a fin de comprender en términos económicos tales concesiones o compromisos a realizar entre los diversos cobeneficios de una SbN, puede ser de utilidad utilizar una moneda común (por ejemplo, el dólar estadounidense) para la evaluación de las distintas soluciones, mismas que han de determinarse con una lente que vincule los pilares del desarrollo sustentable y evalúe las dimensiones sociales, ambientales y económicas por igual (Nesshöver *et al.*, 2017). Los análisis costo-beneficio suelen ser herramientas útiles para personas y entidades responsables de la toma de decisiones; no obstante, lograr un análisis costo-beneficio riguroso puede plantear grandes

dificultades o desafíos, sobre todo cuando muchos de los cobeneficios no disponen de pautas para su monetización concreta (es decir, algunos beneficios colaterales son intangibles) o los datos no están disponibles para determinadas regiones. Por otra parte, es probable que las decisiones cruciales sobre el diseño y los costos de las SbN conciernen a un amplio abanico de partes interesadas y, aunque el objetivo es encontrar una solución claramente beneficiosa para todas las partes, que favorezca una triple rentabilidad —la tridimensionalidad del desarrollo sustentable: medio ambiente, sociedad y economía—, la realidad es que a menudo existen elementos de concesión o compromiso difíciles de cuantificar y con diferentes costos, beneficios, impactos y riesgos asociados (Eger *et al.*, 2022; Halpern *et al.*, 2013, y Nesshöver *et al.*, 2017). Para captar todo el valor de los resultados previstos de un proyecto, los métodos de valoración requerirán la orientación de especialistas, así como las aportaciones de la comunidad. En el informe complementario *Cobeneficios - Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* se ofrecen más detalles, mismos que se encuentran en forma ampliada en *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: Appendix of Methods* [Evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza: apéndice de métodos] de Dimitru y Wendling (2021).

Cada vez se reconoce más el valor de los servicios que los activos naturales aportan y se observa un mayor interés por incorporar los servicios ambientales o ecosistémicos en la planificación y la toma de decisiones (considérese, por ejemplo, la Iniciativa de Activos Naturales [*Natural Assets Initiative*] de Canadá). Existen evaluaciones específicamente orientadas a identificar y cuantificar los servicios y beneficios que proporciona el medio ambiente, proceso que también permite explorar las implicaciones sociales más amplias de un proyecto o decisión en materia de SbN y examinar los elementos de concesión o compromiso asociados, al igual que posibles desigualdades y elementos intangibles del bienestar humano (Van Proosdij *et al.*, 2021).

Cuadro 10. Criterios de medición básicos para cobeneficios económicos, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Reducción de los costos de capital	Costos de capital	Contabilización de los costos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto	Ninguno conocido
Reducción de los costos operativos y de mantenimiento	Costos de mantenimiento y reparación		
Mejora de los medios de subsistencia pesqueros, agrícolas o artesanales	Ingresos económicos	Análisis de ingresos económicos	Ninguno conocido
Oportunidades de empleo local	Número de puestos de trabajo	Estadísticas de empleo; datos o encuestas socioeconómicas	Estadísticas de empleo, anuncios de empleo; revisión de estudios de caso

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

3.5.2 Criterios de medición adicionales

De acuerdo con la naturaleza particular del proyecto de SbN, otros parámetros de desempeño relacionados con aspectos o beneficios económicos podrán revestir importancia. A continuación se enumeran posibles criterios de medición adicionales que pueden contribuir a determinar el cumplimiento de los objetivos fundamentales identificados en el cuadro 2:

- Menores costos de infraestructuras adyacentes (prevención de pérdidas por inundación)
- Aumento del valor de la tierra o propiedad
- Disminución de las primas de seguros ante inundaciones
- Aumento de los ingresos fiscales
- Oportunidades de ecoturismo
- Disminución del costo de vida

En función de tales criterios de medición adicionales se seleccionarán los indicadores de desempeño; es decir, los factores que han de medirse y monitorearse para determinar si se están logrando los objetivos del proyecto. Por ejemplo:

- Costos de capital, mantenimiento y reparación
- Valor percibido
- Valor real
- Costo o número de reclamaciones de seguros
- Sistemas de valoración
- Modelización de riesgos
- Ingresos fiscales
- Percepción de la comunidad (sobre la iniciativa o proyecto)
- Costo de vida

En el cuadro 11 se resumen los criterios de medición adicionales determinados y los posibles indicadores de desempeño correspondientes, junto con los métodos o técnicas de monitoreo sugeridos.

Cuadro 11. Criterios de medición adicionales para cobeneficios económicos, indicadores de desempeño correspondientes y técnicas de monitoreo sugeridas

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
Reducción de los costos de las infraestructuras protegidas (pérdidas evitadas por inundaciones)	Costos de capital, mantenimiento y reparación	Contabilización de los costos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto	<i>Ninguno conocido</i>
		Análisis costo-beneficio	
Aumento del valor de la tierra o propiedad	Valor percibido	Encuestas sobre el valor percibido por parte de la comunidad	Compartición en línea

Criterios de medición	Indicadores de desempeño	Métodos	
		Métodos a cargo de especialistas	Métodos en el marco de iniciativas de ciencia comunitaria
		Entrevistas sobre la percepción de los beneficios por cuanto a protección derivados de los atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza	Resultados en línea
	Valor real	Registro y análisis de transacciones y valores inmobiliarios	<i>Ninguno conocido</i>
Disminución de las primas de seguros contra inundaciones	Costo o número de reclamaciones de seguros	Reclamaciones de seguros contra inundaciones	Revisión de estudios de caso
	Sistemas de valoración	Puntaje obtenido en el sistema de clasificación comunitaria (puntaje CRS del Programa Nacional de Seguro contra Inundaciones [NFIP, por sus siglas en inglés] de Estados Unidos) en relación con los atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza	<i>Ninguno conocido</i>
	Modelización de riesgos	Modelización numérica intensiva	<i>Ninguno conocido</i>
Aumento de los ingresos fiscales	Ingresos fiscales	Solicitud de datos a la autoridad gubernamental competente	<i>Ninguno conocido</i>
Oportunidades de ecoturismo	Percepción de la comunidad (sobre la iniciativa o proyecto)	Entrevistas; sondeos o encuestas sobre la disposición de la población al pago	<i>Ninguno conocido</i>
Disminución del costo de la vida	Costo de vida	Análisis del costo de vida	Análisis observacionales

Fuente: Adaptado de MARCO, 2017.

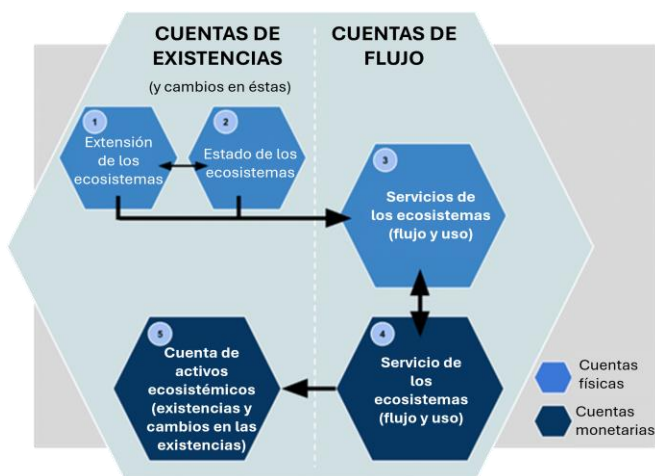
Recuadro 1. Caso especial: Contabilidad de los Ecosistemas del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica

Puesto que “los cobeneficios económicos [...] rara vez generan cobeneficios ambientales significativos [...], dar prioridad a los cobeneficios económicos de las SbN puede resultar contraproducente para el medio ambiente (es decir, generar consecuencias adversas que, a su vez, entrañarán elementos de concesión)” (CCA, 2025b). El marco Contabilidad de los Ecosistemas del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE) es una herramienta alternativa y eficaz para ayudar a cuantificar y optimizar los beneficios ambientales y económicos asociados a una SbN en proyectos cuyos objetivos fundamentales entran en ambas categorías. La Contabilidad de los Ecosistemas del SCAE “integra datos económicos y ambientales para proporcionar una visión más completa y polivalente de las relaciones e interacción entre la economía y el medio ambiente, así como de las existencias o reservas —y cambios en éstas— de activos ambientales que aportan beneficios a la humanidad” (Naciones Unidas, 2021). Este marco de contabilidad ecosistémica aporta un método de cálculo exhaustivo y estadístico que ayuda a determinar el impacto total de un proyecto de SbN; asimismo, proporciona cifras monetarias, que las personas y entidades responsables de la toma de decisiones pueden comprender y manejar con mayor facilidad, permitiendo su comparación con otros bienes y servicios. La Contabilidad de los Ecosistemas del SCAE permite, por tanto, completar análisis costo-beneficio de forma más estandarizada; planificar la política económica con mayor conocimiento, y comparar de forma sencilla los costos de capital y mantenimiento a lo largo de la vida útil de un proyecto. En suma, la contabilidad de los ecosistemas permite determinar el valor económico de un sistema y, por lo tanto, puede utilizarse como indicador del desempeño de una SbN, así como de sus contribuciones a la economía.

A fin de contabilizar los beneficios económicos de una SbN, la Contabilidad de los Ecosistemas del SCAE utiliza cinco criterios de medición e indicadores básicos (véase la gráfica 5):

1. *Extensión de los ecosistemas*: Captura el área total registrada de cada ecosistema y hace un seguimiento de cómo evolucionan los distintos tipos de ecosistemas a lo largo del tiempo.
2. *Estado de los ecosistemas*: Monitorea y registra las condiciones o estado que guardan ciertos atributos o características de los activos ecosistémicos en momentos definidos.
3. *Cuentas físicas (servicios de los ecosistemas – cobeneficios ambientales)*: Registra el suministro de servicios ambientales por parte de los activos ecosistémicos y su utilización por unidades económicas, incluidos los hogares.
4. *Cuentas monetarias (servicios de los ecosistemas – cobeneficios económicos)*: Captura la evaluación monetaria de los servicios ambientales y sus cobeneficios.
5. *Cuenta de los activos ecosistémicos*: Registra los cambios en las existencias o reservas de activos ecosistémicos y da cuenta tanto de la degradación como de la mejora de los ecosistemas.

Gráfica 5. Contabilidad de los ecosistemas y cómo los criterios de medición e indicadores básicos interaccionan y se relacionan entre sí



Fuente: Naciones Unidas, 2021.

4 Consideraciones especiales relacionadas con el tipo de ecosistema y de SbN

La selección de los indicadores de desempeño y de las técnicas de monitoreo correspondientes depende en gran medida de los ecosistemas en los que están situadas las SbN o con aquellos con los que guardan una estrecha relación. En este apartado se exponen los aspectos que deben tenerse en cuenta al desarrollar planes de monitoreo para una serie de ecosistemas y tipos de SbN. Las consideraciones especiales se agrupan a grandes rasgos en: playas y dunas, humedales y bajos intermareales, islas, bosques costeros y zonas boscosas, elementos sumergidos y elementos híbridos. A continuación se ofrece una breve descripción de cada tipo de hábitat y de cómo sus atributos o características pueden influir en el diseño y la implementación del plan de monitoreo. Además, se incluyen estudios de caso para destacar los conceptos clave.

4.1 Playas y dunas

Las playas y dunas son sistemas costeros arenosos presentes en las costas de Canadá, Estados Unidos y México. Son más extensos en las costas con borde de salida con amplias plataformas continentales del litoral del este, que se caracterizan por islas barrera, espigones y playas (Bird y Schwartz, 1985; Luijendijk *et al.*, 2018). También existen extensos campos de dunas en las costas occidentales de Estados Unidos y México, con la mayor extensión de dunas costeras en el estado de Oregón y los mayores campos de dunas en las zonas desérticas del suroeste (Sherman, 2021). Están presentes en muchos entornos, como en costas continentales, de barrera, de promontorio y estuarios, donde hay un suministro adecuado de sedimentos (Lodder *et al.*, 2021). Las playas y las dunas son sistemas dinámicos por naturaleza, conformados por procesos marinos (olas y mareas) y terrestres (eólicos) (Davidson-Arnott *et al.*, 2019). También desempeñan funciones protectoras con beneficios para el ambiente y recreativos (por ejemplo, turismo) (Lodder *et al.*, 2021).

Las SbN que comprenden sistemas de playas y dunas replican atributos de los entornos naturales a fin de proporcionar servicios específicos, como protección costera, uso recreativo o hábitat para especies en riesgo (Lodder *et al.*, 2021). Las SbN para sistemas arenosos pueden incluir, por ejemplo, la regeneración de playas (incluidos megaproyectos de recuperación o de rellenado de playas) o la restauración de dunas mediante diversas técnicas (Bridges *et al.*, 2021). También pueden incluir sistemas híbridos que incorporen revestimientos enterrados que proporcionen protección adicional durante tormentas con mucha energía, por ejemplo (Lodder *et al.*, 2021). Las playas y los sistemas de dunas se abordan con más detalle en el informe complementario *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza*.

Algunos de los impulsores principales de estos tipos de SbN son restaurar, mantener o mejorar los procesos costeros para aumentar la resiliencia. La resiliencia costera se refiere a la capacidad de un sistema para recuperarse tras un impacto, misma que variará según las características específicas del sistema y del nivel de impacto. Es por ello que las SbN dirigidas a mejorar la resiliencia serán específicas para cada lugar. En algunos casos pueden incluir la adición de sedimentos y vegetación autóctona, lo que aumenta el volumen de las playas, dunas y costas; ello, a su vez, contribuye a mejorar la protección existente contra la erosión y reducir los riesgos de inundación (por ejemplo, ayudar en el manejo de riesgos por inundación) (Lodder *et al.*, 2021).

Estos proyectos requieren flexibilidad en el diseño y mantenimiento, ya que los ambientes costeros son dinámicos y evolucionan a través de reacciones y procesos interconectados. Por ello es importante tener en cuenta los impactos de la estratificación descendente desde una perspectiva tanto ecológica y ambiental como económica. Por ejemplo, al agregar sedimentos mediante el reabastecimiento se

deberán tener en cuenta los efectos ecológicos y los cambios que resulten debido a la transición del hábitat. Aunado a esto, los programas de monitoreo deberán considerar los efectos del transporte (redistribución) de sedimentos a lo largo del litoral, lo mismo aguas arriba que aguas abajo, a medida que las SbN y los sistemas de playa-duna asociados evolucionan con el tiempo. Por ejemplo, un megaproyecto de reabastecimiento de la playa ubicado aguas arriba ejercerá influencia en la dinámica del transporte de sedimentos y las condiciones del hábitat, con afectación de los organismos bentónicos del lugar (lo que justificará un monitoreo ambiental adicional, como se muestra en el cuadro 7). Más aún, en todos los casos resulta muy importante reservar espacio para la migración natural de sedimentos tierra adentro (Lodder *et al.*, 2021).

El diseño y el monitoreo eficaces de las SbN de playas y dunas requieren un enfoque interdisciplinar. Entre las disciplinas esenciales se encuentran la ingeniería, la geomorfología costera, la ecología, la gobernanza y las ciencias sociales. Las prácticas de regeneración de playas suelen incluir ahora consideraciones relativas a la seguridad humana y las actividades acuáticas (por ejemplo, por las corrientes de resaca), dinámica de las aguas subterráneas e impactos en los ecosistemas (De Schipper *et al.*, 2021). Esto amplía el alcance del monitoreo tradicional de elementos físicos y ecológicos, como el ancho de playa, la inclinación, las dimensiones de las dunas y la cubierta vegetal, a estudios sobre los usuarios de las playas, el valor de los bienes raíces, los invertebrados bentónicos y las aves.

Estudio de caso 3: Restauración de las dunas de Playa Hermosa

Restauración de la duna de Playa Hermosa:

Ensenada, Baja California,
México

Incremento de los objetivos sociales fundamentales mediante la restauración de un sistema de dunas y playas

Playa Hermosa se encuentra en la localidad de Ensenada, Baja California, México. Aunque la playa está en la ciudad, a unos 3 km del centro, el acceso era a través de un camino de tierra, y la playa era poco utilizada. Algunas secciones de la playa tenían dunas bien conservadas, mientras que en otras estaban degradadas. En 2009 se inició la construcción de una carretera principal junto con un plan de recuperación de la playa. Como resultado, en 2010 el municipio llevó a cabo un proyecto para restaurar las dunas degradadas, crear accesos a la playa mediante pasarelas con el fin de preservar las dunas y restringir toda construcción en la orilla de la vialidad.

Gráfica 6. Cambios en el sistema de playas y dunas: antes (2006) y después de los trabajos de restauración (2011)



Fuente: Google Earth, 2022.

A pesar de que la playa sigue sufriendo problemas de calidad del agua debido a los vertimientos del arroyo en el extremo norte, ahora los lugareños la visitan y la utilizan mucho para hacer ejercicio y recreación. El proyecto se había visto amenazado por nuevas propuestas que habrían eliminado las dunas para crear una pista para patinetas, pero la presión social ayudó a mantener el proyecto y en 2023 la pista para patinetas se construyó en una ubicación diferente.

Gráfica 7. Instalación de un nuevo paseo marítimo sobre las dunas para facilitar el acceso a la playa



Fuente: Cortesía de Lorax, S. A. de C. V

La mayor disponibilidad de modelos digitales de elevación y superficie de alta resolución —obtenidos con tecnología LiDAR o por repetidos estudios aéreos a baja altitud con puntos de control examinados con gran precisión— ha permitido calcular mediciones volumétricas precisas de la arena de la playa en marea baja (véase el cuadro 5). Junto con repetidos estudios batimétricos de la zona cercana a la costa, se puede calcular un balance de sedimentos (entradas y salidas de sedimentos) y realizar un seguimiento

de los cambios a lo largo del tiempo (Davidson-Arnott *et al.*, 2019). Los cambios en el balance de sedimentos se traducirán en una serie de modificaciones en las características de las dunas, el ancho de la playa y la capacidad de la zona costera para recuperarse de perturbaciones como los huracanes (Ciarletta *et al.*, 2021). Entre las consideraciones importantes para calcular con precisión un balance de sedimentos se encuentran la selección de una escala espacial y temporal pertinente que se ajuste a los criterios de desempeño; la comprensión del sistema costero en cuestión y su dinámica y la consideración de las tendencias a largo plazo, y la variabilidad natural observada en los indicadores del estado costero (por ejemplo, erosión, progradación) (Lodder *et al.*, 2021).

Los sistemas de dunas y playas arenosas son por naturaleza muy dinámicos, con grandes cambios morfológicos estacionales (por ejemplo, el perfil de la playa en invierno frente al de verano) y después de tormentas importantes. Por lo tanto, hay que tener muy en cuenta el momento y la frecuencia de los estudios. Las evaluaciones estacionales y anuales de la sedimentación y la erosión pueden realizarse a lo largo de transectos utilizando una combinación de sistemas de posicionamiento global cinemático en tiempo real (RTK GPS) o barridos con tecnología LiDAR con datos de ecosondeo de haz único. Se debe tener cuidado al convertir las profundidades batimétricas (por lo general relativas al datum de la carta hidrográfica) a un datum vertical terrestre. Los estudios anuales deben realizarse en la misma época del año. Los perfiles pueden compararse entonces con una línea costera de referencia, una técnica utilizada habitualmente en los Países Bajos para elaborar planes de reabastecimiento de playas (Elias *et al.*, 2012). Además pueden realizarse estudios después de tormentas fuertes para cuantificar los impactos y hacer un seguimiento de la recuperación posterior. En los climas septentrionales, la capa de nieve y hielo, incluida la presencia (o ausencia en el caso de inviernos cálidos) de un cinturón de hielo, influirá en los procesos de transporte de sedimentos y en los cambios morfológicos. En los climas meridionales, las playas y dunas utilizadas principalmente para el turismo también responderán y se verán afectadas por las actividades de manejo costero (por ejemplo, rastrillado de playas, enterramiento o remoción de sargazo) y la actividad humana (por ejemplo, tránsito peatonal a través de las dunas, uso de vehículos recreativos), que influirán en el programa de monitoreo. La inclusión de componentes sociales como el tipo de uso de la playa, la frecuencia de la actividad y la seguridad pública (como el número de días en los que no se permite nadar debido a corrientes de resaca peligrosas) será importante para distinguir entre los impulsores de cambio naturales y antropogénicos.

4.2 Humedales y bajos intermareales

Los humedales y bajos intermareales desempeñan un papel importante en el sistema costero. Pueden incorporarse a distintos tipos de SbN con efectos diferentes. Por ejemplo, los humedales costeros adyacentes a diques o presas pueden reducir la energía de las olas y, por lo tanto, los riesgos de desbordamiento e inundación, mientras que los que se incorporan a estructuras costeras vivas estabilizan la línea costera y reducen las tasas de erosión y repliegue de playas. Estos hábitats cruciales, que se encuentran en entornos de energía baja y moderada en los que la acumulación de sedimentos conduce al establecimiento de la vegetación, pueden variar de forma en función del clima, la geografía, las características de los sedimentos, el hidropериодо, el régimen de salinidad y muchos otros factores. Las funciones protectoras y los servicios ecosistémicos también varían según el tipo de humedales y bajos intermareales presentes, pero a menudo incluyen la reducción del oleaje, la mejora de la capacidad de inundación, los servicios de tratamiento del agua, la captación y almacenamiento de carbono, el mantenimiento de la biodiversidad y el entretenimiento. Los tipos de humedales costeros incluyen marismas saladas, marismas salobres, marismas mareales de agua dulce, bosques de manglares y pantanos de coníferas, entre otros. Aunque en muchos bajos intermareales y humedales costeros predominan las hierbas y juncos de los géneros *Sporobolus* (*Spartina*) y *Juncus*, la presencia de arbustos y grandes especies arbóreas como el mangle (véase el recuadro 2) y el tupelo puede requerir enfoques diferentes al considerar los métodos de monitoreo (véase el apartado 4.4). Los humedales y los bajos

intermareales se analizan con más detalle en el informe asociado *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza*.

Los humedales presentan tres características principales que los distinguen de las tierras altas: hidrología, vegetación y suelos o sedimentos. Estas características constituyen indicadores aplicables en múltiples categorías de cobeneficios (véase el apartado 2), ya que corresponden a las funciones biofísicas en las que se sustentan los sistemas de humedales, y por ello mismo son un buen punto de partida a la hora de seleccionar los componentes de un programa de monitoreo. La adición de otros indicadores, como el uso público (social), los activos monetarios (económicos) o la diversidad de especies, puede mejorar en gran medida el valor del programa de monitoreo de SbN en humedales y bajos intermareales.

El principal control sobre la morfología y la estructura de los humedales y los bajos intermareales es la hidrología, que influye directamente en los procesos del suelo y los sedimentos y en la composición de la comunidad vegetal. Los parámetros hidrológicos pueden incluir el hidropereodo, las profundidades y los caudales del agua, la extensión de las inundaciones, la altura de las olas y la calidad del agua, y pueden asociarse con las dimensiones ecológicas y estructurales del programa de monitoreo (Science + Resilience Institute Jamaica Bay, 2020). Las metodologías se resumen en los cuadros 3, 5 y 6, y pueden variar tanto en complejidad como en costo. Por ejemplo, las evaluaciones visuales (de indicadores como la presencia de líneas de sargazo, la línea de pleamar ordinaria o la presencia de zonas erosionadas) pueden registrarse con un bajo nivel de esfuerzo y costo, mientras que la modelización hidrodinámica (por lo regular necesaria en escenarios complejos o de mayor riesgo) resulta costosa, lleva mucho tiempo y requiere un alto nivel de aportación por parte de especialistas.

La vegetación desempeña un papel fundamental en las funciones protectoras de los humedales al reducir la energía del oleaje, además de proporcionar un hábitat crucial y servicios ecosistémicos (véanse los cuadros 2 y 5). La vegetación puede medirse a varias escalas y los métodos pueden diferir en función de la escala focal (cuadro 5). La densidad de las especies, la diversidad y la biomasa suelen ser componentes importantes de los programas de monitoreo, ya que —además de ser indicadores de la biodiversidad— sirven para medir la capacidad de amortiguamiento del oleaje (capacidad para reducir la altura, energía o velocidad de las olas). A mayor escala, algunas actividades como la cartografía de la cubierta vegetal pueden contribuir a comprender los beneficios colaterales asociados, como la presencia de hábitats para especies exóticas.

Los suelos y los sedimentos son importantes para los humedales y los bajos intermareales en términos de productividad (las características del suelo se relacionan con el crecimiento vegetativo y la elevación con la zonación) y también de su capacidad para sobrevivir al aumento del nivel del mar. El que los humedales mareales puedan seguir el ritmo de la subida del nivel del mar se relaciona directamente con su capacidad para aumentar su elevación, sobre todo mediante procesos de sedimentación y de acumulación subterránea (subsuperficial) de sedimentos (Nolte *et al.*, 2013). Aunque los estudios sobre la elevación —a menudo realizados a por transectos a efecto de obtener perfiles— y los modelos digitales de elevación (MDE) de superficie son importantes para identificar los cambios a escala de paisaje en la morfología de la zona intermareal (véase el cuadro 5), con frecuencia son incapaces de captar de forma adecuada los pequeños pero importantes cambios en la elevación a corto plazo, sobre todo en áreas con bajas concentraciones de sedimentos en suspensión y pequeños rangos de marea. Uno de los atributos de los humedales intermareales que resultan más atractivos en términos de SbN es su capacidad para seguir verticalmente el ritmo del aumento del nivel del mar y crecer en la misma dirección dentro del área mareal (Cahoon *et al.*, 2006). A efecto de detectar cambios en la elevación con resoluciones subcentimétricas se pueden utilizar equipos especializados, como las tablas de elevación de superficie y los horizontes estratigráficos, que miden tanto los procesos subterráneos como los superficiales (Webb *et al.*, 2013, y Lynch *et al.*, 2015). Estas mediciones pueden utilizarse para evaluar si la plataforma del humedal mareal sigue el ritmo del aumento relativo del nivel del mar o se

hunde. También pueden utilizarse para determinar si es necesario añadir capas finas de sedimentos dragados como método de manejo adaptativo. Las técnicas para clasificar las condiciones del suelo pueden variar en costo y complejidad, desde protocolos de campo rápidos para clasificar la textura y el color del suelo según la evaluación funcional o la delimitación de humedales (NB DELG, 2018) hasta estudios de captación y almacenamiento de carbono a largo plazo que emplean cámaras estáticas de gases de efecto invernadero y perforación del suelo (Bartolucci *et al.*, 2021).

Recuadro 2. Caso especial: Manglares

Los manglares se están integrando cada vez más como estrategias de manejo de riesgos por inundación en zonas costeras bajas (Menéndez *et al.*, 2020; Gijsman *et al.*, 2021) y como soluciones de ingeniería híbrida (Sutton-Grier *et al.*, 2015). Al igual que los humedales intermareales, estos reducen los niveles de oleaje y atenúan las olas generadas por el viento; sin embargo, lo hacen a través de sistemas de raíces aéreas superficiales característicos. Estos sistemas radiculares y la forma física compacta de los manglares pueden dificultar en gran medida su monitoreo mediante métodos tradicionales. El acceso y la navegación pueden ser complicados. Además, llevarlo a cabo con éxito y darle seguimiento requiere una “comprensión mecanicista de la funcionalidad y persistencia de los manglares” (Gijsman *et al.*, 2021, 1). Como ocurre con los humedales intermareales, esto incluye procesos hidrodinámicos, morfológicos y ecológicos que tienen lugar a través de varias escalas temporales y espaciales. Estas interacciones a múltiples escalas abarcan la escala arbórea (centrándose en la dinámica local a corto plazo alrededor de los árboles y huertos de árboles), la escala forestal (que incluye la dinámica de transectos completos a lo largo de gradientes de elevación a través de bosques de manglares) y la escala del ecosistema (Gijsman *et al.*, 2021).

El monitoreo del medio suele centrarse en los procesos a escala de árbol y bosque, mientras que las técnicas de teledetección pueden aportar valiosos datos sobre los procesos a escala de bosque y ecosistema e identificar cambios en la estructura forestal. Las mediciones de la hidrodinámica, morfología y los parámetros ecológicos son similares a las ya mencionadas. Debe tenerse en cuenta que, en general, es difícil obtener datos topográficos en los bosques de manglares porque la densa vegetación obstaculiza los sistemas de posicionamiento global cinemático en tiempo real (RTK GPS) y las mediciones directas (Gijsman *et al.*, 2021). Muchos métodos de teledetección también se ven afectados por el dosel arbóreo. Las mediciones directas se realizan a escala arbórea, lo que implica la evaluación de la densidad de los árboles, las especies, el diámetro de los tallos, las alturas y las raíces a lo largo de un transecto para analizar de forma representativa el ecosistema.

Además de los factores que contribuyen a los cambios de elevación de la superficie ya mencionados para los humedales mareales, los manglares presentan otras contribuciones, como el crecimiento de algas y tapetes microbianos, así como la acumulación de hojarasca y detritus (Cahoon *et al.*, 2006). Los estudios de campo suelen abarcar varios procesos a escala arbórea, como el crecimiento de las raíces, de los árboles, de tapetes microbianos o algas y la acumulación de detritus y hojarasca. El crecimiento de los árboles se evalúa mediante mediciones manuales o bandas dendrométricas (bandas de acero inoxidable colocadas alrededor del tallo del árbol) (Lovelock *et al.*, 2011) o marcando y volviendo a medir árboles seleccionados (Feller *et al.*, 2015). El crecimiento de las raíces puede medirse con bolsas de crecimiento radicular, que son bolsas de malla de nailon rellenas de sedimentos naturales, las cuales se entierran en el lugar y después se recogen para medir la biomasa radicular que se produjo (Lovelock *et al.*, 2011). La contribución de la hojarasca o el detritus a los cambios de elevación de la superficie puede medirse utilizando bolsas de descomposición de hojarasca (Steinke y Ward, 1989). El crecimiento de algas o tapetes microbianos puede medirse construyendo pantallas superficiales (McKee, 2011) o a partir de cortes de neumatóforos (Steinke y Ward, 1989).

Estudio de caso 4. Restauración de la marisma salobre de Cheverie

Restauración de la marisma salobre de Cheverie:

Restauración de los servicios del ecosistema y protección del litoral

Cheverie, Nueva Escocia,
Canadá

En el otoño de 2005, el Departamento de Transportes y Renovación de Infraestructuras (*Department of Transportation and Infrastructure Renewal*) de Nueva Escocia y la empresa CBWES Inc. emprendieron obras de restauración del flujo mareal y el paso de peces al arroyo Cheverie Creek, en Nueva Escocia, Canadá, restaurando 43 hectáreas de hábitat de marisma salobre. Al mismo tiempo, se formó la Sociedad Cheverie Crossway Salt Marsh, que proporcionó un sólido apoyo comunitario al proyecto y condujo a la construcción de una ruta de senderismo, señalización interpretativa y una cámara oscura (Nova Scotia: Off the Beaten Path, 2019).

Gráfica 8. Instalación de nuevo paso de agua en 2005



El programa de monitoreo se centró principalmente en indicadores ecológicos y se proponía:

- Documentar la eficacia de la compensación emprendida;
- Determinar la naturaleza, el alcance y la dirección del cambio, y
- Documentar los avances de la restauración y determinar el éxito del proyecto.

Para cuantificar los cambios se adoptó un enfoque BACI, en el que se utilizaron tanto las condiciones de referencia como las de partida. Entre 2002 y 2005, el Centro de Acción Ecológica (*Ecology Action Centre*), la Universidad de Saint Mary y CBWES recopilaron datos de referencia. CBWES estableció y ejecutó un programa de monitoreo exhaustivo a largo plazo tras la restauración que abarcó los años uno a tres (2006-2008), cinco (2010) y siete (2012). Durante los años cuatro y seis las actividades de monitoreo tuvieron un alcance limitado. El programa de monitoreo debía diseñarse para las condiciones únicas de la bahía de Fundy, un estuario con mareas excepcionalmente altas, elevadas concentraciones de sedimentos en suspensión y condiciones invernales variables. Con este fin, CBWES adaptó el programa del Protocolo de Seguimiento Regional del Golfo de Maine (*Gulf of Maine Regional Monitoring Protocol*) (Neckles *et al.*, 2002). Los parámetros muestreados incluyeron:

- Hidrología (niveles de agua, hidroperiodo, aguas subterráneas);
- Suelos y sedimentos (acreción, elevación, características);
- Vegetación (composición, abundancia, altura, cartografía del hábitat);
- Especies de necton (composición, riqueza de especies, densidad, longitud), e
- Invertebrados (abundancia, riqueza de especies); condición invernal (evaluación visual).

Gráfica 9. Marisma de Cheverie a quince años de su restauración



Fuente: CBWES Inc.

Las metodologías empleadas incluyeron enfoques de bajo costo o baja tecnología y medidas más complejas y costosas. El monitoreo realizado durante los siete años siguientes a la restauración indicó que el sistema de Cheverie Creek cumplía los objetivos de restauración previstos. El desarrollo de la nueva marisma superó la extensión prevista del hábitat de humedal mareal, mientras que el humedal existente tenía características (vegetación, suelos) que se ajustaban bien al sitio de referencia. El nuevo régimen hidrológico fue suficiente para inundar toda la marisma de 43 hectáreas con aguas de marea en los episodios de marea alta de primavera.

4.3 Islas

Las islas suelen caracterizarse por entornos con una energía del oleaje relativamente alta y por su exposición a los procesos costeros. El aumento del nivel del mar y la mayor intensidad de las tormentas exigen prestar especial atención a los cambios en la línea costera que pueden afectar la resistencia general de una isla. Las islas suelen funcionar como barreras que protegen la costa continental y aportan numerosos beneficios a las regiones que disponen de ellas, como actividades recreativas, mantenimiento de rutas para la navegación en barco, oportunidades comerciales y hábitats para especies exóticas (Gallani *et al.*, 2021). Una isla en su conjunto puede representar una SbN debido a las funciones de protección costera que proporciona al continente, pero también pueden brindar la oportunidad de implementar múltiples tipos de SbN a menor escala, como la creación o restauración de humedales o la creación de arrecifes de ostras. La aplicación de las SbN puede implicar la creación de islas enteras con material de dragado, o la restauración o mejora de elementos isleños clave. Debido a su distanciamiento del continente, algunas pueden ofrecer oportunidades únicas para las SbN, como la creación de hábitats para albergar colonias de aves marinas exóticas que sería imposible desarrollar en el continente (Babcock y Booth, 2020, y Bracey *et al.*, 2022) (véase el recuadro 3). Las SbN en islas se abordan con más detalle en el documento de orientación *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza* (asociado al presente informe).

Los principales impulsores de la resiliencia de las islas son la exposición a las olas y al viento, el transporte de sedimentos y la vegetación. El diseño de las SbN que implican a las islas exige evaluar las condiciones previas de oleaje y viento, el nivel del mar, las mareas y la disponibilidad de sedimentos. Así pues, los programas de monitoreo de islas hacen hincapié en los indicadores que determinan la estabilidad y resistencia de una isla frente a los efectos costeros continuos y episódicos, incluido el cambio climático. La aplicación de las SbN en las islas y sus alrededores suele implicar la adición o el movimiento de sedimentos, por lo que los programas de monitoreo deben incluir indicadores específicos del transporte de sedimentos. Estos pueden incluir repetidos estudios batimétricos y de elevación (véase el cuadro 3), cartografía de rasgos subsuperficiales o temporalmente sumergidos, como las marismas, o evaluaciones periódicas del suministro regional de sedimentos mediante el monitoreo de la erosión costera similar al del apartado 4.1, así como de las concentraciones de sedimentos en suspensión en los ríos y los cambios en la batimetría (cuadros 3 y 4). Más allá de la distribución a gran escala y del movimiento de los sedimentos, las características de los propios sedimentos son muy importantes para los procesos fundacionales de las islas, como la construcción del suelo. El tamaño de las partículas, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica deben cuantificarse y compararse con los valores de referencia o previstos (cuadros 3 y 4).

Los estudios de elevación para obtener perfiles, a menudo a lo largo de transectos, son importantes para identificar cómo está cambiando la isla en relación con la amplitud de las mareas, los niveles de agua o las tormentas. La superficie de la isla a diferentes elevaciones, así como la altura de la cresta de la isla, pueden ser indicadores importantes en algunos casos (véase el cuadro 3). La energía y la altura del oleaje (incluso durante las tormentas), la velocidad de las corrientes, los índices de erosión, los niveles del ascenso del oleaje y la frecuencia, duración y superficie de inundación o desbordamiento son indicadores clave que pueden incluirse en los programas de monitoreo de las SbN en islas (cuadros 3 y 5). En los entornos septentrionales, la cobertura de hielo en invierno también puede ser una variable importante a incluir en los programas de monitoreo, ya que el hielo puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre el transporte de sedimentos y la erosión costera.

Los indicadores de calidad del agua como la salinidad, las concentraciones de sedimentos en suspensión, el contenido de oxígeno disuelto y la temperatura (véase el cuadro 7) también pueden ser importantes si los objetivos de las SbN incluyen hábitats de humedales o submareales (Gallani *et al.*, 2021). Los estudios de vegetación son importantes para documentar la cobertura y composición de la

vegetación, y la cobertura de los litorales por diversos tipos de residuo también es un indicador importante que puede influir en el éxito de las soluciones (cuadro 5).

Los costos de construcción pueden ser bastante más elevados en las islas en comparación con la instalación de SbN en tierra firme; por lo tanto, es crucial monitorear de cerca cualquier factor relacionado con esto que pueda afectar el desempeño de las SbN durante la fase de construcción. Este enfoque proactivo puede ayudar a mitigar la necesidad de costosas intervenciones una vez finalizada la instalación de las SbN, al tiempo que garantiza un impacto medioambiental mínimo (Gallani *et al.*, 2021). El monitoreo de los impactos de la construcción puede incluir la inspección visual para ayudar a detectar las zonas en las que el equipo ha causado la compactación de los sedimentos o alteraciones de los patrones del caudal (véanse los cuadros 3 y 4). En el caso de las islas relativamente alejadas de las poblaciones humanas, tras la instalación de las SbN deberían incluirse visitas periódicas al lugar para detectar cualquier cambio causado por acontecimientos repentinos, y también deberían planificarse visitas posteriores a las tormentas.

Las islas pueden clasificarse en tres grupos: islas barrera, islas deltaicas e islas dentro de una bahía (Gallani *et al.*, 2021). Las islas barrera, que suelen ser largas y estrechas, a menudo protegen de las tormentas las costas continentales. Suelen alejarse del océano abierto debido a la retirada de sedimentos del frente (lado del océano abierto) y su deposición en la trasplaya (Gallani *et al.*, 2021). Este proceso natural debe monitorearse para evaluar la capacidad de resiliencia general de las islas barrera. Su forma estrecha hace que la cubierta vegetal sea un indicador muy importante de la integridad de una isla barrera frente al aumento de la actividad de las tormentas y el aumento del nivel del mar. Las islas deltaicas se forman en los estuarios y son el resultado de procesos de deposición de sedimentos y de la acción de las olas y las corrientes. Las actividades humanas suelen alterar o reducir el suministro de sedimentos en los estuarios, por lo que los indicadores cruciales para el monitoreo incluyen el suministro de sedimentos y los cambios de elevación. Es importante señalar que las islas barrera y deltaicas, en especial en los sistemas arenosos, son dinámicas y cabe esperar que se desplacen y migren con el tiempo como parte de los procesos naturales de la línea costera. Las islas dentro de una bahía o un lago tienden a presentar una forma más redondeada que las islas barrera, pero también pueden migrar hacia tierra continental.

Recuadro 3. Caso especial: Islas hábitat de aves

Proyectos como la formación de islas o la mejora del hábitat se realizan con frecuencia para contribuir a la conservación de especies de aves en riesgo (Babcock y Booth, 2020). Las características de la cubierta del sustrato (por ejemplo, vegetación frente a grava abierta) pueden ser importantes para determinadas especies de aves y a menudo se incorporan a los programas de monitoreo (Rock *et al.*, 2007). Dado que las aves marinas suelen acceder a recursos bentónicos u otros recursos marinos, a veces a distancias considerables de la colonia, puede merecer la pena incorporar estudios de estos otros recursos, como las poblaciones de peces, para supervisar la disponibilidad de alimento, ya que puede verse afectada por muchos elementos relacionados con el cambio en las costas (Pratte *et al.*, 2021). Además, los efectos de las grandes colonias de aves marinas en las islas pueden dar lugar a cambios en los sustratos, como el enriquecimiento de nutrientes; los posibles cambios en la vegetación provocados por estos subsidios de nutrientes deben vigilarse con atención, al igual que los niveles de nutrientes del suelo en los casos en que sea probable que se produzcan efectos negativos (véase el cuadro 7). Asimismo, aunque las islas pueden desempeñar un papel importante en la conservación de las especies de aves en riesgo, las colonias de aves marinas pueden acabar completamente con la vegetación terrestre, lo que provoca destrucción del hábitat, erosión y pérdida de la superficie insular (Hebert *et al.*, 2014). En las regiones en las que especies como los cormoranes pueden causar estos efectos, se recomienda el monitoreo del uso de las islas por dichas especies con el fin de evaluar el riesgo de formación de nuevas colonias.

Estudio de caso 5. Isla Poplar

Proyecto de restauración ambiental de la isla Poplar: Restauración de hábitats de aves y humedales

Bahía de Chesapeake,
Maryland, Estados Unidos

El Proyecto de Restauración Ambiental de la Isla Poplar tiene lugar en la bahía de Chesapeake (Maryland, Estados Unidos). En la restauración se utilizó material de dragado aplicado a 460 hectáreas de hábitat. Las intervenciones de SbN comenzaron en 2003 con una celda de humedal con fines de demostración (13 hectáreas), y las instalaciones posteriores consistieron en completar celdas adicionales a lo largo de los últimos 20 años. Los hábitats que se han construido incluyen 230 hectáreas de marismas intermareales (80 por ciento de marismas bajas y 20 por ciento de marismas altas). Originalmente, en el siglo XIX, la isla ocupaba más de 400 hectáreas, pero en la década de 1990 su superficie se había reducido, como consecuencia de la erosión, a aproximadamente dos hectáreas (Erwin *et al.*, 2007).

El proyecto es fruto de la colaboración entre dependencias gubernamentales federales y estatales. Las intervenciones comenzaron en 2006 con un dique exterior de 6.1 metros blindado con rocas y varios diques interiores que definían celdas más pequeñas que más tarde se rellenarían con material de dragado con miras a la creación de hábitats. Los objetivos del proyecto incluyeron 80 por ciento de marismas bajas y 20 por ciento de marismas altas en zonas de humedal, y también se añadieron otros atributos del hábitat como marismas abiertas, aguas abiertas y pequeñas islas de nidificación. Las especies a las que se dirigió la creación de hábitats fueron charranes, ánades sombríos (*Anas rubripes*), águilas pescadoras (*Pandion haliaetus*) y garcetas.

El programa de monitoreo detallado guarda una estrecha relación con los objetivos del proyecto (Derrick *et al.*, 2007). Cada indicador (“atributo”) se asocia a un objetivo cuantitativo y a un intervalo de valores aceptable; por ejemplo, el indicador de composición de especies específica un objetivo de >80 por ciento de cobertura de la gramínea *Spartina alterniflora* en hábitats de marisma baja creados, con un límite inferior aceptable de >20 por ciento (Derrick *et al.*, 2007). La extensión (superficie) de los hábitats es un indicador, al igual que la cobertura de flora de humedal. Estos objetivos se determinaron mediante la evaluación de las necesidades de hábitat de las aves objetivo y otras especies. Otros parámetros de desempeño en relación con la biodiversidad incluyen indicadores como el uso de las marismas por peces, aves, invertebrados y herpetofauna, así como criterios de medición como la presencia o ausencia de los grupos objetivo. En cuanto a las zonas de nidificación, los indicadores clave utilizados fueron la extensión (superficie de la isla por encima de la línea de pleamar), la cubierta vegetal, la nidificación (presencia o ausencia) y la tasa de éxito de las nidadas (número de polluelos por nido). La mayoría de los indicadores se evaluaron con periodicidad anual (Derrick *et al.*, 2007).

Gráfica 10. Isla Poplar: plano del sitio



Fuente: Derrick *et al.*, 2007.

La presencia de depredadores condiciona en gran medida la viabilidad de las colonias de muchas especies de aves marinas, por lo que el monitoreo constituye un elemento importante para su detección precoz. En la isla Poplar se instalaron cámaras de video infrarrojas destinadas a determinar la presencia de búhos. Otras intervenciones continuas necesarias para el mantenimiento de los hábitats restaurados son la eliminación de vegetación de las zonas que deben mantenerse desprovistas de ella, o la adición de conchas, arena o grava (Erwin *et al.*, 2007).

El programa de monitoreo se amplió en 2014 con el análisis de imágenes aéreas (Prosser *et al.*, 2022). Estos datos se utilizaron para generar mapas de hábitats y muestran que en 2014 se habían creado alrededor de 16 hectáreas de marisma alta y 43 de marisma baja (Prosser *et al.*, 2022). En algunas de las celdas construidas se registra la reproducción de ánades sombríos y ratas almizcleras (*Ondatra zibethicus*). La isla alberga ahora la principal colonia de nidificación de charranes comunes (*Sterna hirundo*) de la bahía de Chesapeake.

4.4 Bosques costeros y zonas boscosas

Los árboles y arbustos se diferencian de las especies herbáceas por presentar tejidos leñosos de larga vida y ser capaces de acumular una importante biomasa por encima del suelo relativamente estable a lo largo del tiempo. Los manglares son árboles que pueden ser componentes importantes de los humedales intermareales en los trópicos y se analizan por separado en el apartado 4.2. Muchas comunidades vegetales consideradas importantes para las SbN son herbáceas, como las marismas salobres donde predominan los pastos, pero con frecuencia se encuentra vegetación leñosa en zonas de mayor elevación situadas tierra adentro de los humedales intermareales o de las dunas. Los hábitats ribereños también pueden albergar comunidades forestales y arbustivas. Árboles y arbustos constituyen importantes atributos del hábitat; por ejemplo, sirven de sustento para que las aves se posen y aniden, y de refugio a vertebrados terrestres. Estos bosques o matorrales costeros desempeñan importantes funciones de protección costera mediante la atenuación del viento, el debilitamiento del oleaje en caso de tormentas extremas y el desarrollo de raíces profundas que estabilizan el suelo. Además, contribuyen a la diversidad vegetal a escala del paisaje y pueden albergar especies raras. Otros beneficios colaterales que la vegetación leñosa aporta son el almacenamiento de carbono, el enfriamiento microclimático local y la mejora de la estética. Los bosques costeros y las zonas boscosas se analizan con más detalle en el informe complementario *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza*.

Los programas de monitoreo de sitios que incluyen bosques y matorrales costeros incorporan muchos de los mismos indicadores utilizados para la vegetación herbácea, como la cobertura o la diversidad de especies. Si el bosque o matorral costero ocupa un lugar prioritario en una SbN o es objeto de restauración, se suelen utilizar cuadrantes de mayor extensión para la obtención de muestras representativas de comunidades vegetales compuestas por individuos de mayor tamaño (por ejemplo, parcelas de 5x5 m o de 20x20 m). En el caso de las SbN en que el control de la erosión se considera un objetivo principal, la extensión de suelo desnudo sin cobertura de hojarasca, restos leñosos o plantas constituye una causa clave de erosión, por lo que es muy importante realizar un seguimiento de la cobertura de sustrato desnudo, sobre todo en pendientes o acantilados (Ellis *et al.*, 2022) (véase el cuadro 5). En zonas donde los efectos costeros por severos y limitarían el tamaño y la composición de las plantas leñosas, puede existir un “bordeado de árboles” en la costa, arbolado del que se espera un desplazamiento hacia el interior en escenarios de aumento de actividad de las tormentas y subida del nivel del mar. La altura de las plantas leñosas suele ser un indicador de los efectos de la exposición costera (viento, niebla salina, etc.). La pendiente también puede ser un indicador importante de la estabilidad de los matorrales o bosques, ya que la gran biomasa por encima del suelo puede favorecer el derribo en las tormentas de viento, lo que a su vez puede provocar el levantamiento de las raíces y la erosión del sustrato, además de provocar la muerte de árboles y arbustos.

Estudio de caso 6. Proyecto de línea costera basada en la naturaleza en el arroyo Bronx Kill

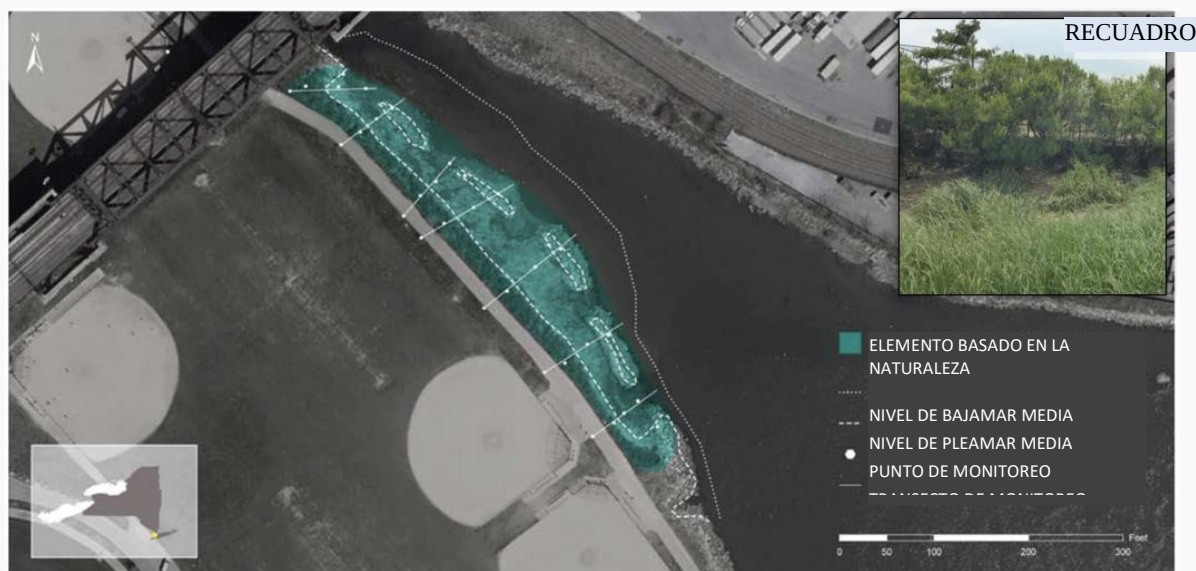
Proyecto de línea costera basada en la naturaleza en el arroyo Bronx Kill:

Río Harlem, East River, Nueva York, Estados Unidos

Restauración del litoral urbano

Este proyecto consistió en la creación de un hábitat de marisma salobre detrás de una barrera de rocas, así como un hábitat de matorrales adyacente a la marisma salobre en la parte terrestre (Science + Resilience Institute Jamaica Bay, 2020). El sitio originalmente presentaba una costa degradada protegida por escollera y carecía de vegetación autóctona. El Departamento de Parques y Recreación de la Ciudad de Nueva York (*NYC Parks*) introdujo cinco islas de roca dentro de una marisma salada para proteger la costa. El hábitat de matorral creado constó de dos especies autóctonas de arbustos halófilos (*Iva frutescens* y *Baccharis halimifolia*), que requieren una mayor elevación que la marisma salobre donde predomina el esparto (*Spartina alterniflora*). Los investigadores utilizaron siete líneas de perfil (transectos) con elevaciones registradas mediante un sistema RTK GPS con puntos de evaluación en cada transecto en cada una de las tres características (pedregal, marisma salobre, matorral). La evaluación social se llevó a cabo mediante entrevistas a los usuarios del lugar (ciclistas, observadores de aves, mariscadores, entre otros). Las tareas de custodia ambiental y monitoreo del sitio corresponden a la organización Randall's Island Park Alliance. Los resultados del monitoreo revelaron que la vegetación ha crecido a un ritmo considerable en ambos hábitats creados, que los mejillones autóctonos colonizaron la marisma salobre y que el uso por parte de la población ha aumentado desde la restauración, principalmente con fines recreativos.

Gráfica 11. Sitio Bronx Kill: elementos basados en la naturaleza y ubicación de los puntos de monitoreo



Nota: El recuadro superior derecho muestra los hábitats restaurados de marisma salobre y matorral arbustivo, con orientación hacia tierra adentro. *Fuente:* Science + Resilience Institute Jamaica Bay, 2020.

4.5 Elementos sumergidos

En el marco de las soluciones basadas en la naturaleza, se denomina “elementos sumergidos” a aquellas soluciones que se hallan por debajo de la zona intermareal y que incluyen, principalmente, la restauración de flora sumergida de importancia crítica (por ejemplo, lechos de pasto marino, bosques

de algas, arrecifes de coral); la creación de rompeolas o arrecifes sumergidos (por ejemplo, arrecifes artificiales y bancos de arena), y la instalación de espigones de madera (estructuras colocadas en ángulo respecto de la línea costera y de la dirección de la corriente; el ángulo determina hacia dónde se desvía la corriente, alejándola de la ribera, sobre todo para evitar la erosión). Cada uno de estos elementos tiene beneficios y cobeneficios diferentes. Si bien los espigones de madera son tradicionalmente elementos utilizados en cuerpos de agua dulce, también es posible adaptarlos al flujo bidireccional de los ríos mareales con el propósito de redirigir la corriente y, con ello, controlar la localización de la erosión. Por otra parte, los lechos de pasto marino y bosques de algas marinas restaurados, así como los arrecifes creados o restaurados, se han utilizado de manera generalizada en los sistemas costeros y son elementos y hábitats costeros fundamentales que sustentan una gran diversidad de biota, por lo que aumentan la producción pesquera, al tiempo que protegen la costa de la erosión y las inundaciones al atenuar la energía de las olas y atrapar los sedimentos (Oreska *et al.*, 2021; Orth *et al.*, 2020; Mora-Soto *et al.*, 2021, y Fabian *et al.*, 2013). Otros de sus cobeneficios incluyen la mejora de la calidad del agua y la creación de hábitats; la captación y almacenamiento de carbono y nitrógeno por parte de la flora sumergida, y la recuperación de arrecifes de coral o marisco en los rompeolas sumergidos (Oreska *et al.*, 2021, y Kroeger, 2012). En el documento de orientación *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza* (asociado al presente informe) se analizan con más detalle los elementos sumergidos como opciones de SbN.

Para que el monitoreo y la implementación del proyecto de restauración de la flora y los arrecifes sumergidos resulten exitosos, conviene identificar, mitigar o compensar los factores de presión y deterioro ecológico que provocaron la degradación antes de la restauración, y luego realizar un monitoreo posterior a la restauración que garantice la recuperación (Orth *et al.*, 2020). Algunos de estos factores de presión pueden ser de carácter medioambiental y producirse durante largos periodos de tiempo, como el cambio climático o la acidificación de los océanos, por lo que la mejor práctica para el éxito a largo plazo de un proyecto es tener en cuenta no sólo el hábitat concreto, sino el ecosistema en su conjunto (Orth *et al.*, 2020, y Oreska *et al.*, 2021). Esta consideración incluye la batimetría (especialmente crucial para la colocación de estructuras de arrecifes artificiales), el estado y la composición del sustrato, la calidad del agua, la distancia sobre el agua en la que el viento sopla sin obstáculos (campo o alcance del viento), la temperatura del agua, la profundidad, la granulometría de los sedimentos y los ecosistemas adyacentes (que son importantes para el suministro de alevines o semillas o larvas de moluscos) (véanse los cuadros 3, 4, 5 y 7). También debe tenerse en cuenta qué materiales se utilizan en los proyectos y elegir los adecuados para cada condición, procurando evitar el uso innecesario de plásticos (Walters *et al.*, 2022). El monitoreo de la flora sumergida recurre a muchos de los indicadores descritos en relación con la vegetación herbácea (véase el apartado 4.4), incluidos los cuadrantes de vegetación y el registro de los atributos del hábitat, como la diversidad de especies vegetales, la biomasa, la cobertura areal o la densidad de brotes (Orth *et al.*, 2020; Oreska *et al.*, 2021, y Mora Soto *et al.*, 2021). Por lo que toca al monitoreo de arrecifes o escolleras sumergidos, se incluyen los atributos biológicos, como la diversidad y abundancia de especies de peces o las primeras etapas del ciclo de vida y los patrones de reclutamiento de peces, y los atributos físicos, como los cambios en la forma del arrecife, la velocidad del flujo, la profundidad y el sustrato a lo largo del tiempo. Algo que puede pasarse por alto, si bien es relevante para garantizar el éxito a largo plazo del arrecife en cuanto al fomento de la biodiversidad (en caso de que ello se incluya entre los objetivos del proyecto), es el monitoreo de las especies invasoras, la acumulación de mantos algáceos y la sedimentación, así como el oleaje y la velocidad de las corrientes que reciben los arrecifes (si la energía es excesiva, los huevos de los peces pueden dañarse) (McLean *et al.*, 2015, y Hylkema *et al.*, 2021).

4.6 Elementos híbridos

Los elementos híbridos pueden utilizar una amplia gama de componentes grises y verdes para crear diversos ecosistemas. Las SbN se consideran “híbridas” cuando se utilizan elementos grises, como conchas de ostras, troncos, biomantas (a base de materiales naturales biodegradables, a menudo cáscara de coco) o rocas, para mejorar la función de los componentes verdes de la orilla, como la vegetación, la arena y la grava. Los elementos híbridos también pueden ser resultado de la reconversión (reacondicionamiento) o modificación de las infraestructuras grises por medio de SbN, lo que da lugar a un nuevo elemento híbrido. Muchos —o incluso la mayoría— de los proyectos de renovación o reconversión no emplearán necesariamente opciones de SbN como única estrategia (si bien ello daría lugar al retorno a procesos totalmente naturales), por lo que se podrían clasificar como elementos híbridos. Para obtener más información respecto a la implementación de soluciones con elementos híbridos, consúltese el documento de orientación *Reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza*, asociado al presente informe.

En el caso de las SbN híbridas, los componentes grises deben utilizarse en aquellos casos en que sirvan de apoyo a los procesos del sistema y mejoren la función de los componentes verdes de la costa. En general, esto significa que deben minimizarse en tamaño y extensión, y diseñarse con cuidado para limitar su impacto en los procesos costeros. Un ejemplo sería la construcción de una costa viva con barrera de rocas, un método habitual en la costa este de Estados Unidos y que está empezando a implementarse en Canadá. En Yucatán, investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) también instalaron y llevan a cabo un monitoreo del uso de una novedosa estructura de bambú y cuerdas para promover el crecimiento de las dunas (véase el estudio de caso 8).

Los componentes grises también pueden quedar enterrados por debajo de los componentes verdes de la costa con el fin de proporcionar protección adicional durante fenómenos extremos. Por ejemplo, un revestimiento enterrado dentro de un sistema de dunas puede proporcionar protección adicional durante grandes tormentas, aunque su concepción tiene en cuenta el transporte natural de arena y los procesos dunares (incluida la recuperación) después de tormentas menores. En algunos casos también se han utilizado geotextiles enterrados con relleno de arena.

Las soluciones híbridas suelen considerarse cuando los administradores de recursos buscan mejorar los cobeneficios (por ejemplo, la adecuación del hábitat) asociados a la infraestructura gris existente, o cuando existe una incertidumbre significativa en torno al desempeño de las SbN, en particular a lo largo de costas con mayor campo de viento o procesos costeros de mayor energía. Debido a los muchos beneficios potenciales de las soluciones híbridas, a menudo se tiende a introducir componentes grises en sistemas que, de otro modo, serían naturales, incluso cuando no es del todo necesario. Esta práctica limita los posibles beneficios colaterales del proyecto y no aprovecha el aprendizaje y la investigación en torno al uso de las SbN. En consecuencia, las soluciones híbridas pueden asociarse a un mayor impacto ambiental en la zona costera que los sistemas de protección de costas verdes y las costas naturales sin alteraciones (Green Shores for Homes, 2022).

El monitoreo de las SbN híbridas debe tener en cuenta tanto el componente de ingeniería gris como los elementos naturales y los indicadores de desempeño del sistema en su conjunto. Por lo tanto, las SbN híbridas pueden requerir la inclusión de indicadores de desempeño adicionales (en comparación con las SbN que incluyen un menor número de componentes), lo que debería considerarse en función de cada proyecto. El monitoreo ha de evaluar el valor actual y futuro para todos los beneficios, lo mismo los protectores que los no-relacionados con funciones de protección (es decir, otros cobeneficios ecológicos, sociales, económicos) (Suedel *et al.*, 2021). Resulta de especial interés comparar la opción híbrida con un análogo natural a fin de determinar si los componentes estructurales (grises) eran realmente necesarios. Además, es necesario monitorear la interacción y los

posibles procesos de retroalimentación entre los componentes grises y verdes de la SbN híbrida (por ejemplo, la socavación). Al inicio del proyecto, un equipo multidisciplinar y multisectorial debe crear de forma conjunta un marco de monitoreo. Un aspecto clave de este proceso es el establecimiento de un lenguaje de trabajo común para el debate, la colaboración y la reflexión entre los profesionales que participan en el proyecto (Wijsman *et al.*, 2021).

Estudio de caso 8: Innovador cercado de dunas en la ruta de playa Sisal-Chelem

Ruta de playa Sisal-Chelem:

Yucatán, México

Promoción y monitoreo del crecimiento dunar en el frente de playa:
una novedosa técnica de cercado híbrido

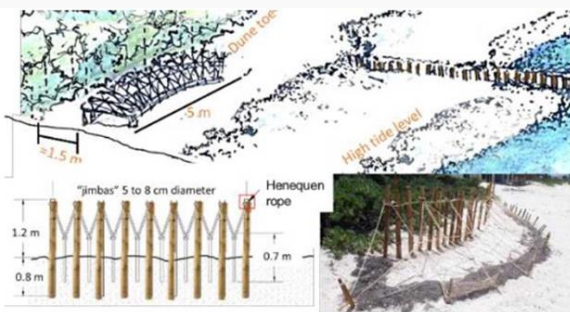
Las playas de Sisal y Chelem se encuentran en la costa norte de la península de Yucatán, ubicadas aproximadamente a 30 km una de la otra. Las playas de Chelem presentan un alto grado de urbanización y numerosas modificaciones a lo largo de los años, como la construcción de espigones (Leija y Lomas, 2018). Si bien Sisal se encuentra menos desarrollada, experimenta una rápida urbanización, lo que la hace más propensa a eventos extremos. Debido a sus bajas elevaciones dunares y a la falta de vegetación dunar, Chelem es ahora más vulnerable que nunca a la erosión y las inundaciones. Por su parte, Sisal corre el riesgo de experimentar compresión costera, fenómeno que supone la pérdida de hábitat natural debido a nuevos desarrollos urbanos que impiden la transgresión costera (migración tierra adentro de una línea costera), lo que podría provocar una pérdida de dunas significativa.

Mientras que la compresión costera en Chelem limita el espacio para la restauración de dunas, la densidad urbana más reducida en Sisal permite una mejor restauración y conservación de las dunas costeras. Estudiantes de la UNAM recibieron una beca de la Fundación Bepensa para restaurar las dunas de Sisal con materiales reciclados. A través de su proyecto, “Reciclando dunas” (<https://www.reciclandodunas.org/>), el equipo sembró con éxito más de 13,000 plantas de dunas nativas, que cubrieron un área de 5,500 metros cuadrados. El proyecto puso en marcha un programa de monitoreo mediante vuelos de drones con objeto de rastrear los cambios en la cubierta terrestre. A pesar de que el programa de monitoreo no contó con financiamiento en el marco del proyecto, el equipo pudo utilizar los recursos y la experiencia disponibles a través de la universidad para llevarlo a cabo. Por desgracia, el programa se interrumpió prematuramente debido a restricciones relacionadas con la pandemia y sólo se realizó un vuelo con dron antes del confinamiento.

Los casos de Chelem y Sisal demuestran que la obtención de recursos financieros para ejecutar programas de monitoreo puede suponer todo un reto. Sin embargo, la colaboración con institutos de investigación puede proporcionar recursos y conocimientos adicionales en apoyo de estos esfuerzos. En el caso del proyecto Sisal se espera que el programa de monitoreo recomience utilizando recursos de la UNAM. Asimismo, se prevé que el programa incluya las siguientes características:

- *Indicadores de desempeño:* Cobertura vegetal (m^2), número de especies, biodiversidad (índice de Shannon), número de especies invasoras retiradas, cambio volumétrico (m^3/m), cambio granulométrico.
- *Duración y frecuencia:* 24 meses, con inspecciones cada cuatro meses.
- *Técnicas:* cuantificación de la cubierta vegetal a partir de imágenes de drones, monitoreo mediante cuadrículas de 2x2 m colocadas aleatoriamente a lo largo de la franja de duna costera.

Gráfica 13. Bocetos y fotografía de estructura de biomimetismo dunar



Fuente: Leija y Lomas, 2018.

4.7 Análisis adicional referente a las técnicas

Como se describe en los apartados anteriores, la selección del indicador de desempeño dependerá del tipo de SbN, las condiciones climáticas, el diseño del programa de monitoreo, los objetivos del proyecto, el acceso a especialistas y equipos, y las limitaciones presupuestarias. Numerosos indicadores pueden adoptar múltiples metodologías (por ejemplo, caracterización del hábitat mediante cartografía o análisis estadístico) y las correspondientes técnicas y tecnologías (por ejemplo, imágenes de drones en lugar de una lista de especies o índices de vegetación). Muchas de las posibles técnicas identificadas en el apartado 3 conllevan posibles concesiones o compromisos a realizar en términos de costos, precisión o intensidad, por lo que deben considerarse con detenimiento. El cuadro 12 ofrece ejemplos de algunas consideraciones posibles en la selección de técnicas para tres proyectos indicativos y teóricos de humedales intermareales en Canadá, Estados Unidos y México; además, pone de relieve la necesidad de que el proyecto contemple, entre otros factores, las condiciones del clima, el tipo de SbN y el contexto regulatorio. Cabe señalar también que las técnicas de monitoreo cambian continuamente, por lo que esta guía constituye un documento vivo.

Cuadro 12. Posibles consideraciones e implicaciones para la selección de técnicas en un programa de monitoreo de humedales intermareales

Tipo de humedal, región	Ejemplos de consideraciones a tener en cuenta para la selección de técnicas de monitoreo	Implicaciones
Marisma salobre, este de Canadá	Zonación típica de marisma salobre (<i>Sporobolus alterniflorus</i> en marisma baja y <i>Sporobolus pumilus</i> en marisma alta).	Por lo general, baja diversidad de especies (beneficioso para la identificación de especies, problemático para algunos índices de vegetación y oneroso en lo que respecta al recuento de tallos).
	Condiciones invernales con temperaturas variables y capa de hielo o nieve.	Posible fallo del equipo y dificultad de acceso al lugar debido a condiciones meteorológicas.
	Marco normativo canadiense (por ejemplo, Regulaciones de Aviación Canadiense para drones, licencia científica otorgada por el Departamento de Pesca y Océanos de Canadá).	Las actividades de muestreo que requieren permisos deberán adquirirlas con antelación.
Marisma salobre, sudeste de Estados Unidos (Golfo de México)	Zonación de marisma salobre impulsada por la mezcla de agua salada y dulce (<i>Sporobolus pumilus</i> y <i>Juncus roemerianu</i>).	La diversidad de especies puede ser alta. La intrusión de agua salada derivada del cambio climático puede provocar cambios impredecibles en el ecosistema.
	Impactos derivados del transporte marítimo pesado y las actividades industriales (por ejemplo, la extracción de petróleo).	Riesgo para los equipos y el acceso, puede constituir un factor de adaptación o perturbación.
	Marco normativo de Estados Unidos (por ejemplo, normativa sobre humedales de la Agencia de Protección Ambiental).	Las actividades de muestreo que requieren permisos deberán adquirirlas con antelación.
Bosque de manglar, suroeste de México	Zonación del bosque manglar (<i>Rhizophora mangle</i> intermareal, <i>Avicennia germinan</i> en elevaciones más altas).	Las especies leñosas de mayor tamaño requieren áreas de muestreo más grandes. El acceso en aguas estancadas puede plantear dificultades.
	Clima cálido con precipitaciones adecuadas.	Restricciones de acceso por mal tiempo poco probables.
	Falta de infraestructuras y mano de obra cualificada, baja densidad de población.	El programa de monitoreo debe abordar la continuidad del programa y la disponibilidad de recursos. El uso de enfoques participativos y de pocos requerimientos tecnológicos (por ejemplo, ciencia comunitaria) puede ser de utilidad.

5 Consideraciones en torno al análisis, la disponibilidad y la difusión de datos

En un momento en el que el cambio climático afecta a todas las personas, la colaboración en la búsqueda de soluciones a tan complejo y gran problema resulta de vital importancia. Una importante forma para lograrlo es mediante el intercambio de información, y la mejor manera de garantizar que la información pueda comprenderse con precisión cuando se comparte es a través del establecimiento de un marco (una hoja de ruta con protocolos para el monitoreo de parámetros e indicadores de desempeño específicos para un proyecto concreto), el uso de protocolos de muestreo reconocidos y basados en pruebas, y la adopción de un sistema estandarizado de registro de datos y elaboración de informes en la medida de lo posible. Los informes estandarizados pueden ayudar a garantizar que los nuevos proyectos se nutran de la experiencia adquirida en proyectos anteriores (Eger *et al.*, 2022). Existe una gran variabilidad en los tipos y objetivos de los proyectos de SbN; sin embargo, si el proceso de registro y elaboración de informes se determina y estandariza desde el principio del proyecto, entonces tanto los datos como los resultados que se obtengan tendrán mayores posibilidades de ser comparables con otros proyectos, además de que se reducirán los sesgos (es decir, la presentación selectiva de resultados satisfactorios). Se recomienda que los informes de implementación de soluciones basadas en la naturaleza incluyan, como mínimo:

- Presentación del proyecto, objetivos y plazos
- Descripción de todos los sitios —de estudio y de control o referencia—, así como cualquier información histórica pertinente acerca de éstos (por ejemplo, “el sitio de control del humedal intermareal tuvo actividad agrícola hace cien años, pero había permanecido en barbecho y en desuso durante los últimos 75 años”)
- Descripción detallada de las metodologías, protocolos y análisis
- Resultados y discusión al respecto
- Conclusiones
- Metadatos: apéndice con información como datos topográficos utilizados; coordenadas geográficas; licencias, propiedad y restricciones de los datos; información adicional sobre los datos, incluidos los nombres y el formato de los archivos, e incluso detalles sobre las metodologías de medición y análisis. Esta información también puede incluirse en un archivo de texto “Léame” que acompañe a los datos (en lugar de adjuntarse al informe del proyecto). A los lectores debe dirigírseles a este archivo desde el documento escrito.

En la medida de lo posible, los informes deben incluir información relativa a los éxitos **y fracasos** de un proyecto (Dumitru *et al.*, 2021). Comunicar las fallas es importante para que otros puedan aprender de los errores del pasado y evitar el despilfarro de recursos valiosos. Lo ideal sería incluir también información sobre indicadores sociales, culturales y económicos, y no limitarse únicamente a los indicadores ecológicos o ambientales de un proyecto; ello ayudará a determinar si un proyecto es favorable para las tres dimensiones de la sustentabilidad: medio ambiente, sociedad y economía (Eger *et al.*, 2022; Dumitru *et al.*, 2021, y Halpern *et al.*, 2013).

El análisis de datos es esencial para comprender la trayectoria y el “éxito” de un proyecto. La gama de posibles análisis y opciones de manipulación de datos es amplia: desde los más básicos hasta los más sofisticados, estadísticos o cartográficos. Cierta grado de conocimiento de estadística y cartografía (nociones básicas) resulta imprescindible para comprender los resultados de los datos recogidos y poderlos comunicar. Asimismo, la representación cartográfica brinda una forma especialmente útil de comparar visualmente los cambios ecológicos, en función de las condiciones previas y posteriores a la ejecución de un proyecto de SbN. Con la popularización de los sistemas teledirigidos (drones), la cartografía aérea se ha vuelto cada vez más accesible y su utilidad en la recopilación de datos ha aumentado. La sofisticación del análisis de datos dependerá en gran medida de la experiencia y los

recursos disponibles para cada proyecto. Independientemente del grado de sofisticación de la recopilación y el análisis de datos, es importante establecer protocolos de garantía y control de la calidad e incorporarlos al plan de monitoreo desde el principio. Se recomienda utilizar, siempre que sea posible, técnicas y metodologías estandarizadas y establecidas, lo que incluye el almacenamiento de toda la información y metadatos pertinentes; la documentación de todas las formas de manipulación de datos, y la garantía de que los éstos son una representación exacta de las condiciones observadas. **La transparencia y la reproducibilidad de los resultados son aspectos fundamentales.**

En cuanto a la gestión de datos, se recomienda que los proyectos adopten el enfoque FAIR (del inglés: *findable, accessible, interoperable, and reusable*), para garantizar que los datos sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables, tal y como señalan Wilkinson *et al.* (2016). Por lo que respecta a su almacenamiento y disponibilidad, los repositorios establecidos —como *figshare* y Knowledge Network for Biocomplexity (KNB), entre otros— resultan de utilidad. La accesibilidad puede lograrse garantizando que los datos sean legibles por máquinas y estén en formatos de archivo que no requieran programas informáticos patentados para su apertura (por ejemplo, formato .csv). A fin de garantizar que los datos son reutilizables e interoperables (intercambiables con otros), éstos deberán ser plenamente comprensibles: es decir, tener descriptores completos (con inclusión de especificaciones de unidades y definiciones de abreviaturas); una organización clara (por ejemplo, si se utiliza una hoja de cálculo, todas las pestañas del libro de trabajo deben estar claramente etiquetadas y debe haber congruencia en el manejo de datos entre las distintas pestañas); un formato normalizado (sin incluir códigos de color en las propias celdas), y encabezados de columna y etiquetas de variables coherentes (incluso en el informe asociado). Asimismo, todos los datos y sus etiquetas han de presentarse en un mismo idioma e incluir metadatos detallados (por ejemplo, descripciones de los encabezados de columna, abreviaturas y unidades, así como indicación de los datos a los que corresponden las distintas figuras o análisis). Siempre deberá realizarse un control de calidad (Roche *et al.*, 2015). De acuerdo con Roche *et al.* (2015), las buenas prácticas para la gestión de datos se resumen en el siguiente listado:

- Procurar hacer público el archivo de datos.
- Velar por la visibilidad de los datos.
- Proporcionar metadatos detallados.
- Utilizar nombres de archivo descriptivos.
- Archivar datos sin procesar.
- Utilizar formatos de archivo estándar.
- Facilitar la agregación de datos.
- Realizar un control de calidad.
- Elegir una licencia de publicación.
- Determinar posibles criterios de restricción.

Una de las formas de reducir los errores y garantizar la coherencia en la evaluación entre sitios es el uso de fichas de monitoreo en campo estandarizadas, pero adaptables al proyecto concreto de SbN o a la organización a cargo del programa de monitoreo. La elaboración y uso de tales fichas también puede ser un proceso para recabar la opinión de otros especialistas en la materia y de integrantes de la comunidad. En el documento *Monitoring Habitat Restoration Projects: U.S. Fish and Wildlife Service's Pacific Region Partners for Fish and Wildlife Program and Coastal Protocol* [Monitoreo de proyectos de restauración de hábitats: protocolo del Programa de Socios para la Pesca y la Vida Silvestre y Programa Costero del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos, región del Pacífico] se encontrarán ejemplos de hojas o fichas de monitoreo (Woodward y Hollard, 2011).

En el documento de orientación *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe) se ofrece información adicional sobre análisis, disponibilidad, almacenamiento y difusión de los datos.

6 Oportunidades y orientaciones futuras

Existe un reconocimiento generalizado de que la ciencia comunitaria o participativa constituye un movimiento sumamente benéfico por el que se empodera a personas sin formación profesional para que contribuyan al monitoreo del medio ambiente. La participación de habitantes de la localidad en el monitoreo de las SbN resulta también una excelente manera de difundir los beneficios de los proyectos que involucran este tipo de soluciones y puede fomentar un sentido de pertenencia y conexión. Aunque el monitoreo de algunos de los indicadores clave enumerados en este documento resulta difícil y exige equipos o conocimientos especializados, así como la participación de profesionales, muchos indicadores entrañan técnicas sencillas de monitoreo que pueden aplicarse de forma generalizada y poco costosa con una formación mínima. Los enfoques combinados que vinculan a especialistas y miembros de la comunidad permiten fomentar el empoderamiento local y el involucramiento de las comunidades. Algunas opciones son las plataformas de código abierto para el intercambio de datos sobre historia natural y el registro cartográfico, como iNaturalist y eBird, en las que cualquiera puede participar, a la vez que facilitan la verificación de las identificaciones de especies por parte de especialistas. También se están creando redes que posibilitan un mayor acceso a tecnologías avanzadas, como los sensores de bajo costo (Mao *et al.*, 2019). Otros avances han hecho que tecnologías como los sistemas aéreos pilotados a distancia (drones) resulten menos costosas y más accesibles para miembros de la comunidad. En el caso de algunos indicadores económicos (por ejemplo, los parámetros adicionales proporcionados en el cuadro 11), su incorporación a los programas de monitoreo puede suponer un reto para la ciencia comunitaria o los proyectos dirigidos por la comunidad. Por ello es preciso investigar más a fondo de qué manera pueden las comunidades participar más en estos importantes componentes del monitoreo (véase el recuadro 4).

Conforme se acumule un mayor número de pruebas científicas que documenten cómo desarrollar e implementar con éxito las SbN, lo más probable es que el uso adecuado de estas soluciones se fomente y aumente la adopción de proyectos. En ese sentido, conviene proporcionar métodos y enfoques más integradores en equipos multidisciplinarios para abordar la amplia gama de objetivos de desempeño. También es necesario que los científicos e ingenieros que diseñan y evalúan las SbN realicen una mayor labor de divulgación con el fin de que sus conclusiones sean accesibles a un público más amplio; por ejemplo, mediante el contacto con las comunidades a través de redes sociales, la elaboración de documentos con recomendaciones en apoyo a la formulación de políticas o resúmenes de las investigaciones en un lenguaje sencillo, y la colaboración con quienes participan en iniciativas de ciencia comunitaria relacionadas con programas de monitoreo.

Los arquitectos paisajistas cuentan con un largo historial en la preparación de materiales visuales de fácil comprensión y accesibles al público, que pueden utilizarse para comunicar los beneficios y las condiciones futuras de proyectos en materia de manejo de riesgos por inundación y soluciones basadas en la naturaleza. Por ejemplo, el proyecto *Living with Water* [Vivir con el agua] reúne a un equipo multidisciplinario y diverso con el objetivo de ayudar a las comunidades asentadas en la costa sur de Columbia Británica a prepararse y adaptarse al aumento del nivel del mar y a las inundaciones, mediante estrategias que en muchos casos implican SbN. El equipo del proyecto (que incluye a integrantes de la esfera académica, profesionales, Primeras Naciones, organizaciones no gubernamentales, personal gubernamental y responsables de la toma de decisiones de varios niveles de gobierno) está desarrollando nuevas herramientas de planificación, diseño y toma de decisiones que “ponen en primer plano los valores de la comunidad, el conocimiento y las perspectivas indígenas en la planificación de respuestas de adaptación en zonas costeras”; “amplían las posibilidades de solución” mediante la

inclusión de las SbN, y “ofrecen recomendaciones para que los acuerdos de gobernanza regional orienten soluciones integradas en materia de adaptación a las inundaciones en zonas costeras”.¹

Recuadro 4. Oportunidades y orientaciones futuras en relación con las metodologías de monitoreo y los indicadores para SbN, y tipos de obstáculos que dichas oportunidades abordan

Oportunidades y orientaciones futuras	Tipo de obstáculo abordado			
	Social	Técnico	Ambiental	Institucional
1. Organizar o financiar sesiones, talleres, jornadas de capacitación y seminarios sobre metodologías de monitoreo de SbN.	✓	✓	○	✓
2. Fomentar la participación de diversas partes interesadas (responsables de la formulación de políticas, comunidades indígenas, grupos sociales, etc.) durante todo el ciclo de vida del proyecto.	✓	✓	○	✓
3. Combinar enfoques que vinculen a especialistas y los miembros de la comunidad a fin de estimular mayores empoderamiento local y compromiso en las comunidades.	✓	✓	○	✓
4. Promover el intercambio de datos y la cartografía de código abierto.	○	✓	○	✓
5. Ampliar la investigación en torno a la participación que las comunidades podrían tener en los proyectos de monitoreo.	✓	○	○	✓
6. Incrementar la divulgación por parte quienes desde la ciencia y la ingeniería diseñan y evalúan las SbN (por ejemplo, mayor uso de las redes sociales).	✓	○	○	○
7. Fomentar y destacar estudios de caso que presenten resultados a largo plazo.	○	✓	✓	✓
8. Poner a disposición del público datos de monitoreo actuales e históricos.	✓	✓	○	✓
9. Establecer o identificar directrices técnicas normalizadas con las cuales orientar la metodología de monitoreo (para uso de los profesionales).	○	✓	○	○
10. Exigir a los equipos de proyecto un compromiso con la distribución y disponibilidad de datos (incluidos los relativos a posibles fallos).	○	✓	○	○
11. Distribuir las guías existentes sobre metodología de monitoreo del desempeño de SbN entre entidades gubernamentales y otras organizaciones pertinentes.	○	○	○	✓
12. Conseguir que los recursos financieros destinados al monitoreo de SbN sean proporcionales al financiamiento de capital para los proyectos.	○	○	○	✓
13. Continuar las iniciativas en curso orientadas a determinar el valor de los activos de capital natural que proporcionan las SbN, así como el valor del monitoreo a largo plazo para este tipo de soluciones.	✓	○	○	✓

¹ Consúltense la página web del proyecto en: <www.livingwithwater.ca/>.

7 Conclusiones

El monitoreo es un componente crucial de cualquier proyecto de manejo de riesgos por inundación, incluidos aquellos que utilizan SbN. La formulación de un programa de monitoreo debe llevarse a cabo durante la fase de delimitación del alcance del proyecto, de modo que pueda evaluarse la viabilidad general, el diseño pueda basarse en los resultados del monitoreo inicial y se puedan establecer las condiciones de referencia para futuras comparaciones. Los programas de monitoreo deben incluir indicadores del desempeño del proyecto y su éxito, que permitan un manejo adaptativo tras la implementación. Asimismo, lo recomendable es incluir uno o varios sitios de referencia representativos de las condiciones objetivo, de manera que resulte posible realizar comparaciones periódicas de las condiciones del sitio del proyecto con respecto de las condiciones de referencia, a fin de evaluar el desempeño de la(s) SbN en cuestión. Dos metodologías recomendadas para esta evaluación son las denominadas (por sus siglas en inglés): BACI (enfoque “antes-después, control-impacto”) y RCA (enfoque de condición de referencia). Conviene tener presente que dichas condiciones de referencia pueden cambiar con el tiempo por efecto del cambio climático, por lo que se aconseja su monitoreo continuo, junto con el del sitio del proyecto. Más aún, se recomienda realizar labores de monitoreo posteriores a todo evento de tormenta con el objetivo de examinar la resiliencia del proyecto de SbN a los efectos de las perturbaciones ambientales.

Los indicadores de desempeño para monitorear y evaluar el éxito de los proyectos SbN pueden agruparse en cuatro categorías, en función de los beneficios y cobeneficios aportados:

- Los indicadores de **manejo de riesgos por inundación** corresponden por lo general a los objetivos principales de las SbN costeras: reducción de la probabilidad de inundación y mejora del manejo de los sedimentos. Estos indicadores también están relacionados con el cumplimiento de criterios estructurales o de otro tipo para los elementos o atributos de las SbN. Se identificaron once indicadores de desempeño básicos y ocho indicadores adicionales por cuanto a MRI, mismos que pueden consultarse en el apartado 3.2.
- Los **indicadores ambientales** incluyen la biodiversidad y otras consideraciones en torno a la calidad de los hábitats creados o restaurados, así como parámetros de medición en relación con la captación y almacenamiento de carbono y la mitigación del cambio climático. Para esta categoría se identificaron trece indicadores de desempeño básicos y veintidós adicionales, mismos que se describen en el apartado 3.3.
- Los **indicadores sociales** contemplan los efectos que la interacción con las SbN produce en las personas, y pueden incluir la estimación de cambios de comportamiento y las percepciones respecto a las SbN o las zonas circundantes, o bien cualidades menos tangibles como la sensación de pertenencia al lugar. Se identificaron trece indicadores de resultados básicos y siete indicadores adicionales, cuya descripción figura en el apartado 3.4.
- Los **indicadores económicos** procuran evaluar los cambios que se producen en las economías locales en relación con la implementación de las SbN, incluidos cambios en las actividades recreativas o de subsistencia y en las reclamaciones o solicitudes de indemnización a los seguros, así como impactos económicos más amplios. Se identificaron cuatro indicadores de desempeño básicos y nueve indicadores adicionales, que pueden consultarse en el apartado 3.5.

Cabe señalar que si bien los indicadores ambientales, sociales y económicos suelen corresponder a beneficios colaterales asociados, lo cierto es que a menudo constituyen en sí mismos criterios primarios de éxito, dependiendo de cada proyecto.

Los contextos ecosistémicos para la implementación de soluciones basadas en la naturaleza presentan grandes variaciones en función de los objetivos y enfoque del proyecto: si se centra en humedales;

si es submareal (por ejemplo, creación de arrecifes de ostras); si tiene lugar en islas o cerca de ellas, o si se trata de un enfoque híbrido que incluye estructuras de ingeniería gris o una combinación de ecosistemas. Las condiciones climáticas regionales —por ejemplo, la presencia de una cubierta de hielo— también pueden requerir la incorporación de indicadores adicionales en los programas de monitoreo. El presente documento ofrece una visión general de los distintos tipos de ecosistema y de los criterios especiales que pueden orientar los programas de monitoreo.

Habida cuenta de que el monitoreo de SbN proporciona datos de utilidad, no sólo para el proyecto en cuestión, sino también para otros grupos interesados en la implementación de este tipo de soluciones en su región, la gestión de los datos debe llevarse a cabo de forma que los conjuntos de datos sean fácilmente accesibles y puedan ser utilizados y reproducidos por otros grupos, entidades o comunidades. Afortunadamente, se dispone de protocolos establecidos para archivar y compartir datos que pueden ser adoptados por quienes proponen e impulsan soluciones basadas en la naturaleza. Por último, aunque existen numerosos protocolos de monitoreo apropiados para la amplia gama de situaciones relacionadas con las SbN, ciertamente el costo puede ser un factor limitante, en particular para los grupos comunitarios. Por este motivo resulta necesario llevar a cabo más investigaciones que permitan desarrollar opciones de monitoreo económicas y accesibles para muchos indicadores cuya evaluación requiere, a la fecha, conocimientos técnicos y recursos económicos considerables.

Bibliografía

- Babcock, M. y V. Booth (2020), *Tern Conservation Best Practice: Habitat Creation and Restoration* [Prácticas recomendadas para la conservación del charrán: creación y restauración de hábitats], en: <http://roseatetern.org/uploads/3/5/8/0/35804201/babcock_and_booth_2020_habitat_creation_and_restoration_tern_conservation_best_practice.pdf>.
- Banco Mundial (2017), *Implementing Nature-based Flood Protection: Principles and Implementation Guidance* [Implementación de medidas basadas en la naturaleza para la protección contra las inundaciones: principios y orientación para la aplicación], Banco Mundial, Washington, D.C., en: <<http://hdl.handle.net/10986/28837>>.
- Bartolucci, N. N., T. R. Anderson y K. A. Ballantine (2021), “Restoration of retired agricultural land to wetland mitigates greenhouse gas emissions” [La restauración de tierras agrícolas retiradas para su conversión en humedales mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero], *Restoration Ecology*, marzo de 2021, núm. 29, vol. 3, p. e13314, en: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.13314>>.
- Bird, E. C. F. y M. L. Schwartz (1985), *The World's Coastline* [La línea costera del mundo], Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York.
- Bowman, M. F. y K. M. Somers (2005), “Considerations when using the reference condition approach for bioassessment of freshwater ecosystems” [Consideraciones al utilizar el enfoque de condición de referencia para la bioevaluación de ecosistemas de agua dulce], *Water Quality Research Journal*, núm. 40, vol. 3, pp. 347-360.
- Bowron, T. M., J. Graham, J., K. Ellis, C. McFadden, E. Poirier y D. van Proosdij (2019), *Managed Realignment and Restoration of the Converse Salt Marsh (NS044)* [Reposicionamiento controlado de diques y restauración de la marisma salina de Converse], informe resumido correspondiente a 2018-2019, Department of Fisheries and Oceans y Nova Scotia Department of Agriculture, publicación núm. 14, Halifax, Nueva Escocia.
- Bowron, T. M. et al. (2022), *Post-restoration monitoring (year 3) of the Converse Salt Marsh Restoration (NS044)* [Monitoreo posterior a la restauración (año 3) de la restauración de la marisma salobre de Converse], informe resumido correspondiente a 2021-2022, Department of Fisheries and Oceans y Nova Scotia Department of Agriculture, Halifax, Nueva Escocia.
- Bracey, A., S. Kolbe, S. Nelson, F. Strand y A. R. Grinde (2022), *Interstate island habitat restoration: phase III – Long-term monitoring and maintenance plan common tern monitoring & Migratory Shorebird Assessment* [Restauración de hábitats en islas interestatales – Fase III: plan de monitoreo y mantenimiento a largo plazo para charranes comunes y evaluación de aves playeras migratorias], informe final, Universidad de Minnesota en Duluth, en: <<https://hdl.handle.net/11299/241490>>.
- Braun, D. C., K. E. Smokorowski, M. J. Bradford y L. Glover (2019), *A review of functional monitoring methods to assess mitigation, restoration, and offsetting activities in Canada* [Revisión de los métodos de monitoreo funcional para evaluar las actividades de mitigación, restauración y compensación en Canadá], informe de investigación 2019/057, Department of Fisheries and Oceans, Canadian Science Advisory Secretariat, en: <https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/mpo-dfo/fs70-5/Fs70-5-2019-057-eng.pdf>.
- Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder y R. K. Mohan (2021b), *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management* [Directrices internacionales sobre atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza]

para el manejo de riesgos por inundación], informe especial, US Army Engineer Research Development Center (ERDC), Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en:
<<https://hdl.handle.net/11681/41946>>.

- Brooks, S. S., M. A. Palmer, B. J. Cardinale, C. M. Swan y S. Ribblett (2002), “Assessing stream ecosystem rehabilitation: limitations of community structure data” [Evaluación de la rehabilitación de los ecosistemas fluviales: limitaciones de los datos sobre la estructura de las comunidades], *Restoration Ecology*, vol. 1, núm. 10, pp. 156-168.
- Bush, E. y D. Lemmen (2019), *Canada’s Changing Climate Report*, Gobierno de Canadá, Ottawa, Ontario, en:
<https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/2/2020/06/CCCR_FULLREPORT-EN-FINAL.pdf>.
- Cahoon, D. R. *et al.* (2006), “Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls” [Vulnerabilidad de los humedales costeros a la subida relativa del nivel del mar: tendencias de elevación de los humedales y controles del proceso], cap. 12, en: *Wetlands and Natural Resource Management*, J. T. A. Verhoeven *et al.* (comps.), Heidelberg: Springer-Verlag, Berlín, pp. 271-292.
- CCA (2025a), *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.
- CCA (2025b), *Cobeneficios - Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.
- CBC (2022), Body of missing woman found as southwestern Nfld. grapples with Fiona aftermath [Hallan cadáver de mujer desaparecida mientras la costa suroeste de Terranova se enfrenta a las secuelas del huracán *Fiona*], noticias en línea, Canadian Broadcasting Company, 25 de septiembre de 2022, 5:52 h (tiempo del Atlántico).
- Ciarletta, D. J., J. L. Miselis, J. Shawler y C. Hein (2021), Quantifying thresholds of barrier geomorphic change in a cross-shore sediment-partitioning model [Cuantificación de los umbrales de cambio geomórfico de las barreras en un modelo de reparto de sedimentos a través de la costa], *Earth Surface Dynamics*, núm. 92, vol. 2, pp. 183-203.
- Cohen-Shacham, E., G. Walters, C. Janzen y S. Maginnis (2016), *Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges* [Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los retos sociales globales], Gland, Suiza, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), xii + 97 pp.
- Conner, M. M., W. C. Saunders, N. Bouwes y C. Jordan (2016), Evaluating impacts using a BACI design, ratios, and a Bayesian approach with a focus on restoration [Evaluación de impactos mediante un diseño BACI, ratios y un enfoque bayesiano centrado en la restauración], *Environmental Monitoring and Assessment*, núm. 188, vol. 10, pp. 1-14.
- Davidson Arnott D., B. Bauer y C. Houser (2019), *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* [Introducción a los procesos costeros y a la geomorfología], segunda edición, Cambridge Press.
- De Looft, H., T. Welp, N. Snider y R. Wilmink (2021), “Adaptive management” [Manejo adaptativo], capítulo 7, en: *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management* [Directrices internacionales sobre atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza para el manejo de riesgos por inundación], T. S. Bridges,

- J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder y R. K. Mohan (comps.), informe especial, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <<https://hdl.handle.net/11681/41946>>.
- De Schipper, M. A., B. C. Ludka, B. Raubenheimer, A. P. Luijendijk y T. A. Schlacher (2021), Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores [La regeneración de playas tiene implicaciones complejas para el futuro de la costa arenosa], *Nature Reviews Earth and Environment*, núm. 2, pp.70-83, en: <<https://doi.org/10.1038/s43017-020-00109-9>>.
- Denny, M. (2021), Wave-Energy Dissipation: Seaweeds and Marine Plants Are Ecosystem Engineers [Disipación de la energía de las olas: Las algas y las plantas marinas actúan como ingenieras del ecosistema], *Fluids*, núm. 6, vol. 4, p. 151.
- Derrick, P., J. McKee, S. Johnson y M. Mendelsohn (2007), Poplar Island environmental restoration project: Project successes, lessons learned, and future plans [Proyecto de restauración ambiental de Poplar Island: Éxitos del proyecto, lecciones aprendidas y planes a futuro], *Proceedings of the World Dredging Congress*, núm. 1, pp. 487-500.
- DHI (2022), *Nature-based solutions to address flooding in coastal cities: summary workshop* [Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en ciudades costeras: taller de síntesis], DHI Water and Environment Inc., por encargo de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), Montreal, Canadá.
- Dumitru, A. y L. Wendling (eds.) (2021), *Evaluating the impact of nature-based solutions: A handbook for practitioners* [Evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza: manual para profesionales], Comisión Europea, Dirección General de Investigación e Innovación, Bruselas, Bélgica, en: <<https://doi.org/10.2777/244577>>.
- Dumitru, S., I. Garcia, S. Zorita y D. Tome-Lourido (2021), Approaches to monitoring and evaluation strategy development [Enfoques para el desarrollo de estrategias de monitoreo y evaluación], capítulo 2, en: A. Dumitru y L. Wendling (eds.), *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, Bruselas, Bélgica, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, en: <<https://doi.org/10.2777/244577>>.
- Eger, A. et al. (2022), The need, opportunities, and challenges for creating a standardized framework for marine restoration monitoring and reporting [Necesidad, oportunidades y dificultades de crear un marco normalizado de monitoreo y notificación de las iniciativas de restauración marina], *Biological Conservation*, núm. 266, 109429.
- Elias, E., A. J. F. van der Spek, Z. B. Wang y J. de Ronde (2012), Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century [Evolución morfodinámica y balance sedimentario del mar de Wadden neerlandés en el último siglo], *Netherlands Journal of Geosciences*, núm. 91, vol. 3, pp. 293-310, en: <<https://doi.org/10.1017/S0016774600000457>>.
- Ellis, K., R. Lohnes y J. Lundholm (2022), Eco-engineering techniques reduce soil loss from steep slopes in Nova Scotia, Canada [Las técnicas de ecoingeniería reducen la pérdida de suelo en las laderas empinadas de Nueva Escocia, Canadá], *Ecological Engineering*, núm. 174, 106464.
- EPA (2017), *Multi-model framework for quantitative sectoral impacts analysis* [Marco multimodelo para el análisis cuantitativo de los impactos sectoriales], informe técnico para la cuarta Evaluación Nacional sobre Cambio Climático], 430-R-17-001, Environmental Protection Agency, Washington, en: <www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/ciraii_technicalreportforanca4_final_with_updates_11062018.pdf>.
- Erwin, M. R., J. Miller y J. G. Reese (2007), Poplar Island Environmental Restoration Project: Challenges in Waterbird Restoration on an Island in Chesapeake Bay [Proyecto de restauración

- ambiental de Poplar Island: Retos de la restauración de aves acuáticas en una isla de la bahía de Chesapeake], *Ecological Restoration*, núm. 25, pp. 256-262.
- Fabian, R., M. Beck y D. Potts (2013), Reef Restoration for Coastal Defense: A Review [Restauración de arrecifes para la defensa costera: Revisión], Santa Cruz, Universidad de California, en: <http://car-spaw-rac.org/IMG/pdf/Reef_restoration_Coastal_Defense_report_Final-2.pdf>.
- Feller, I. C., E. M. Dangremond, D. J. Devlin, C. E. Lovelock, E. Proffitt y W. Rodriguez (2015), Nutrient enrichment intensifies hurricane impact in scrub mangrove ecosystems in the Indian River Lagoon, Florida, US [El enriquecimiento de nutrientes intensifica el impacto de los huracanes en los ecosistemas de manglares de matorral de la laguna Indian River, Florida, Estados Unidos], *Ecology*, núm. 96, pp. 2960-2972, en: <<https://doi.org/10.1890/14-1853.1>>.
- Gijsman, R., E. M. Horstman, D. van der Wal, D. A. Friess, A. Swales y K. M. Wijnberg (2021), Nature-based engineering: A review on reducing coastal flood risk with mangroves [Ingeniería basada en la naturaleza: estudio sobre la reducción de los riesgos de inundación costera por medio de los manglares], *Frontiers Marine Science*, vol. 8, en: <<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702412>>.
- Graham, J. *et al.* (2021), Post-Restoration Monitoring (Year 3) of the Belcher St. Tidal Wetland Restoration Project (NS091) [Monitoreo posterior a la restauración (año 3) del proyecto de restauración de humedales mareales de Belcher St. (NS091)], Informe resumido 2020-2021, preparado para el Department of Fisheries and Oceans y el Nova Scotia Department of Agriculture, publicación núm. 66, Halifax, Nueva Escocia.
- Green, R. H. (1979), *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists* [Diseño de muestreos y métodos estadísticos para biólogos ambientales], John Wiley & Sons.
- Halpern, B. S. *et al.* (2013), Achieving the triple bottom line in the face of inherent trade-offs among social equity, economic return, and conservation [Lograr la triple rentabilidad —equidad social, rentabilidad económica y conservación— frente a los elementos de concesión o compromiso inherentes], *Biological Sciences*, núm. 110, vol. 25, pp. 6229-6234, en: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1217689110>>.
- Harley, M. y J. van Minnen (2009), Development of Adaptation Indicators [Formulación de indicadores de adaptación], Documento técnico ETC/ACC, *European Topic Centre on Air and Climate Change*.
- Hebert, C. E. *et al.* (2014), Nesting cormorants and temporal changes in island habitat [Cormoranes nidificantes y cambios temporales en el hábitat insular], *The Journal of Wildlife Management*, núm. 78, vol. 2, pp. 307-313.
- Herlihy, A. T., M. E. Kentula, T. K. Magee, G. A. Lomnický, A. M. Nahlik y G. Serenbetz (2019), Striving for consistency in the National Wetland Condition Assessment: developing a reference condition approach for assessing wetlands at a continental scale [En busca de la coherencia en la Evaluación Nacional del Estado de los Humedales: desarrollo de un enfoque de condiciones de referencia para evaluar los humedales a escala continental], *Environmental Monitoring and Assessment*, núm. 191, vol. 1, pp. 1-20.
- Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, M. Telszewski y E. Pidgeon (2014), Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses [Carbono azul costero: métodos para evaluar las reservas de carbono y los factores de emisión en manglares, marismas intermareales y lechos de pastos marinos], Conservation International,

- Intergovernmental Oceanographic Commission of Unesco, International Union for Conservation of Nature, Arlington, Virginia, Estados Unidos, en: <<http://thebluecarboninitiative.org/manual/>>.
- Hurlbert, S. H. (1984), Pseudoreplication and the design of ecological field experiments [Pseudorreplicación y diseño de experimentos ecológicos de campo], *Ecological Monographs*, núm. 54, vol. 2, pp. 187-211.
- Hylkema, A., Q. C. A. Hakkaart, C. B. Reid, R. Osinga, A. J. Murk y A. O. Debrot (2021), Artificial reefs in the Caribbean: A need for comprehensive monitoring and integration into marine management plans [Arrecifes artificiales en el Caribe: necesidad de un monitoreo exhaustivo y de su integración en los planes de manejo marino], *Ocean & Coastal Management*, núm. 209, en: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105672>>.
- IBC (2023), Insured Damages from Hurricane Fiona Now Over \$800 Million [Los daños asegurados por el huracán *Fiona* superan ya los 800 millones de dólares], Insurance Bureau of Canada, en: <<http://www.ibc.ca/ns/resources/media-centre/media-releases/insured-damages-from-hurricane-fiona-now-over-800-million>>.
- ICLEI (2022), *Introducing Indicators A First Look at Using indicators to Measure Adaptation Progress* [Introducción a los indicadores: primera aproximación al uso de indicadores para medir los avances de la adaptación], ICLEI Local Governments for Sustainability Canada, en: <https://icleicanada.org/wp-content/uploads/2022/06/Introducing-Indicators_FINAL.pdf>.
- INECC (2019) Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México, México, en: <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf>.
- IPCC (2022), Climate change, 2022: impacts, adaptation, and vulnerability. contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Cambio climático, 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático], Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, en: <www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf>.
- UICN (2020), Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NBS [Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza. Un marco sencillo para la verificación, diseño y ampliación del uso de las SbN, primera edición, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Gland, Suiza.
- Knowledge Network for Biocomplexity (KNB) (2022), Knowledge Network for Biocomplexity [Red de conocimientos sobre biocomplejidad], en: <<https://knb.ecoinformatics.org/>>.
- Kroeger, T. (2012), Dollars and Sense: Economic Benefits and Impacts from two Oyster Reef Restoration Projects in the Northern Gulf of Mexico [Dólares y sentido: beneficios e impactos económicos de dos proyectos de restauración de arrecifes de ostras en el norte del Golfo de México], The Nature Conservancy, en: <<http://www.oyster-restoration.org/wp-content/uploads/2013/02/oyster-restoration-study-kroeger.pdf>>.
- Kumar, P., S. E. Debele, J. Sahani, N. Rawat, B. Martí Cardona, S. M. Alfieri, B. Basu [...] y Thomas Zieher (2021), “An overview of monitoring methods for assessing the performance of nature-based solutions against natural hazards”, [Visión general de los métodos de monitoreo para evaluar el desempeño de las soluciones basadas en la naturaleza frente a los riesgos naturales], *Earth-Science Reviews*, vol. 217, 103603, en: <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103603>>.
- Earth-science Reviews*, núm. 217, en: <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103603>>.

- Leija, M. G. y S. F. Lomas (2018), Assessment of nature-based structure to manage coastal dune erosion in Yucatan, Mexico [Evaluación de la estructura basada en la naturaleza para el manejo de la erosión de las dunas costeras en Yucatán, México], *Coastal Engineering Proceedings*, núm. 1, vol. 36, en: <<https://doi.org/10.9753/icce.v36.structures.57>>.
- Livingston, I. (2022), “What made Hurricane Ian so intense: By the numbers” [La intensidad del huracán Ian: en cifras], *The Washington Post*, en: <www.washingtonpost.com/climate-environment/2022/10/04/hurricane-ian-statistics-deathswinds-surge/>.
- Lodder, Q. et al. (2021), Chapter 9: Beaches and Dunes. In Natural and Nature-Based Features Guidelines [Capítulo 9: Playas y dunas, en: Directrices sobre elementos naturales y basados en la naturaleza], T. S. Bridges et al. (eds.), Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, Army Engineer Research and Development Center.
- Lovelock, C. E., V. Bennion, A. Grinham y D. R. Cahoon. (2011), The role of surface and subsurface processes in keeping pace with sea-level rise in intertidal wetlands of Moreton Bay [El papel de los procesos superficiales y subsuperficiales en la adaptación al aumento del nivel del mar en los humedales intermareales de la bahía de Moreton], Queensland, Australia, *Ecosystems*, núm. 14, pp. 745-757, en: <<https://doi.org/10.1007/s10021-011-9443-9>>.
- Luijendijk, A. et al. (2018), The State of the World’s Beaches [El estado de las playas del mundo], *Scientific Reports*, núm. 8:6641, en: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>>.
- Lynch, J. C., P. Hensel y D. R. Cahoon (2015), *The surface elevation table and marker horizon technique: A protocol for monitoring wetland elevation dynamics* [Tabla de elevación de la superficie y técnica de horizonte de referencia: Protocolo de monitoreo de la dinámica de elevación en humedales], (No. NPS/NCBN/NRR—2015/1078), National Park Service.
- Mao, F., K. Khamis, S. Krause, J. Clark y D. M. Hannah (2019), Low-cost environmental sensor networks: recent advances and future directions [Redes de sensores ambientales de bajo costo: avances recientes y orientaciones futuras], *Frontiers in Earth Science*, núm. 7, p. 221.
- MARCO (2017), Working Towards a Robust Monitoring Framework for Natural and Nature-Based Features in the Mid-Atlantic Using Citizen Science [Hacia un marco sólido de monitoreo de los elementos naturales y basados en la naturaleza en el Atlántico medio con el uso de ciencia ciudadana], Mid-Atlantic Regional Council on the Ocean, en: <<http://midatlanticocean.org/wp-content/uploads/2017/07/Working-Towards-a-Robust-Monitoring-Framework-for-Natural-and-Nature-Based-Features-in-the-Mid-Atlantic-Using-Citizen-Science.pdf>>.
- McDonald, T., G. Gann, J. Jonson y K. Dixon (2016), International standards for the practice of ecological restoration-including principles and key concepts [Normas internacionales para la práctica de la restauración ecológica, incluidos principios y conceptos clave], Society for Ecological Restoration, Washington, DC, Estados Unidos.
- McKee, K. L. (2011), Biophysical controls on accretion and elevation change in Caribbean mangrove ecosystems [Controles biofísicos sobre la acreción y el cambio de elevación en los ecosistemas de manglares del Caribe], *Estuarine Coastal Shelf Science*, núm. 91, pp. 475-483, en: <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.05.001>>.
- McLean, M., E. F. Roseman, J. J. Pritt, G. Kennedy y B. A. Manny (2015), Artificial reefs and reef restoration in the Laurentian Great Lakes [Arrecifes artificiales y restauración de arrecifes en los Grandes Lagos Laurentinos], *Journal of Great Lakes Research*, núm. 41, vol. 1, pp. 1-8.
- Menéndez, P., I. J. Losada, S. Torres Ortega, S. Narayan y M. W. Beck (2020), The global flood protection benefits of mangroves [Beneficios de los manglares en la protección mundial contra

- inundaciones], *Scientific Reports*, núm. 10, pp. 1-11, en: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>>.
- Mora Soto, A. *et al.* (2021), One of the least disturbed marine coastal ecosystems on Earth: Spatial and temporal persistence of Darwin's sub-Antarctic giant kelp forests [Uno de los ecosistemas costeros marinos menos perturbados de la Tierra: Persistencia espacial y temporal de los bosques subantárticos de algas gigantes de Darwin], *Journal of Biogeography*, núm. 48, pp. 2562-2577, en: <<https://doi.org/10.1111/jbi.14221>>.
- Moudrak, N., B. Feltmate, H. Venema y H. Osman (2018), Combating Canada's Rising Flood Costs: Natural infrastructure is an underutilized option [Combate al aumento de los costos de las inundaciones en Canadá: La infraestructura natural es una alternativa infrautilizada], preparado para el Insurance Bureau of Canada, Intact Centre on Climate Adaptation, University of Waterloo.
- Naciones Unidas (2021), *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica: "Contabilidad de los Ecosistemas"*, versión con cubiertas blancas (texto sin revisión editorial), en: <https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/documents/EA/seea_ea_spanish_unofficial_translation_may_2023.pdf>.
- NB DELG (2018), Manual for Wetland Ecosystem Services Protocol for Atlantic Canada (WESP-AC): Tidal Wetlands [Manual del protocolo de servicios de los ecosistemas de humedal para la región del Atlántico de Canadá (WESP-AC): Humedales intermareales], New Brunswick Department of Environment and Local Government, Fredericton, Nuevo Brunswick, en: <www.researchgate.net/publication/323993053_Manual_for_Wetland_Ecosystem_Services_Protocol_for_Atlantic_Canada_WESP-AC_Non-tidal_Wetlands>.
- Neckles, H. A. y M. Dionne (2000), Regional standards to identify and evaluate tidal wetland restoration in the Gulf of Maine [Normas regionales para identificar y evaluar la restauración de humedales intermareales en el golfo de Maine], *Wells National Estuarine Research Reserve Technical Report*, Wells, ME, 21.
- Neckles, H. A., M. Dionne, D. M. Burdick, C. T. Roman, R. Buchsbaum y E. Hutchins (2002), A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales [Protocolo de monitoreo para evaluar la restauración mareal de marismas a escalas local y regional], *Restoration Ecology*, núm. 10, vol. 3, pp. 556-563.
- Neckles, H. A., J. E. Lyons, G. R. Guntenspergen, W. G. Shriver y S. C. Adamowicz (2015), Use of structured decision making to identify monitoring variables and management priorities for salt marsh ecosystems [Uso de la toma de decisiones estructurada para identificar las variables de monitoreo y las prioridades por cuanto a manejo de los ecosistemas de marismas salobres], *Estuaries and Coasts*, núm. 38, vol. 4, pp. 1215-1232.
- Nesshöver, C. (2017), The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective [Ciencia, política y práctica de las soluciones basadas en la naturaleza: Una perspectiva interdisciplinaria], *Science of The Total Environment Volume*, núm. 579, pp. 1215-1227, en: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>>.
- NOAA (2020), Hurricane Delta (AL262020) [Huracán Delta (AL262020)], National Hurricane Center Tropical Cyclone Report, en: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL262020_Delta.pdf>
- Nolte, S. *et al.* (2013), Measuring sedimentation in tidal marshes: a review on methods and their applicability in biogeomorphological studies [Medición de la sedimentación en marismas intermareales: revisión de métodos y su aplicabilidad en estudios biogeomorfológicos], *Journal of Coastal Conservation*, núm. 17, vol. 3, pp. 301-325.

- Nova Scotia: Off the Beaten Path (2019), Cheverie Camera Obscura [Cámara Oscura de Cheverie], en: <<https://discoversns.ca/2019/09/13/cheverie-camera-obscura/>>.
- Oreska, M. P., K. J. McGlathery, P. L. Wiberg, R. J. Orth y D. J. Wilcox (2021), Defining the *Zostera marina* (Eelgrass) Niche from Long-Term Success of Restored and Naturally Colonized Meadows: Implications for Seagrass Restoration [Definición del nicho de *Zostera marina* (pastos marinos de la especie) a partir del éxito a largo plazo de praderas restauradas y colonizadas de forma natural: Implicaciones para la restauración de praderas marinas], *Estuaries and Coasts*, núm. 44, vol. 4, pp. 396-411, en: <<https://doi.org/10.1002/aqc.2573>>.
- Orth R. J. (2020), Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services [La restauración del hábitat de las praderas marinas conduce a una rápida recuperación de los servicios de los ecosistemas costeros], *Science Advances*, núm. 6, vol. 41, en: <<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6434>>.
- Pearce-Higgins, J. W. (2022), A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment [Marco de indicadores de adaptación al cambio climático en el medio natural], *Ecological Indicators*, núm. 136: 108690, en: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>>.
- Philip Williams & Associates Ltd. (PWA) y P. M. Faber (2004), Design Guidelines for Tidal Wetland Restoration in San Francisco Bay [Directrices de diseño para la restauración de humedales intermareales en la bahía de San Francisco], The Bay Institute and California State Coastal Conservancy, Oakland, California, Estados Unidos, 83 pp., en: <https://scc.ca.gov/webmaster/ftp/pdf/pub/tidal_wet_guidelines_report.pdf>.
- Pratte, I., R. A. Ronconi, S. R. Craik y J. McKnight (2021), Spatial ecology of endangered roseate terns and foraging habitat suitability around a colony in the western North Atlantic [Ecología espacial de charranes rosados en peligro de extinción y adecuación del hábitat de búsqueda de alimento en el entorno de una colonia en la región occidental del Atlántico Norte], *Endangered Species Research*, núm. 44, pp. 339-350.
- Prosser, D. J. (2022), Poplar Island: Understanding the development of a beneficial use restoration site [Poplar Island: desarrollo de un sitio de restauración ambiental de uso beneficioso], *Ecological Restoration*, núm. 40, vol. 1, pp. 17-24.
- Raymond, C. M. (2017), An impact evaluation framework to support planning and evaluation of nature-based solutions projects [Marco de evaluación de impacto para apoyar la planificación y evaluación de proyectos de soluciones basadas en la naturaleza], Informe del Grupo de Trabajo de Expertos EKLIPSE, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Reino Unido.
- Rizvi, A. R., K. van Riel y E. Zakowski (2014), Ecosystem Based Adaptation Monitoring and Evaluation – Indicators: A Compilation and Review of Literature [Monitoreo y evaluación de la adaptación basada en ecosistemas: Indicadores: Complejidad y revisión de la literatura], UICN EbA Knowledge Series – Working Paper, 16, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), en: <https://www.iucn.org/sites/default/files/2023-06/eba-me-indicators_0.pdf>.
- Roche D. G., L. E. B. Kruuk, R. Lanfear y S. A. Binning (2015), “Public Data Archiving in Ecology and Evolution: How Well Are We Doing?” [Archivo público de datos sobre ecología y evolución: ¿Qué tan bien lo estamos haciendo?], *PLoS Biol*, núm. 13, vol. 11, e1002295, en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002295>>.
- Rock, J., M. Leonard y A. Boyne (2007), Foraging habitat and chick diets of roseate tern, *Sterna dougallii*, breeding on Country Island, Nova Scotia [Hábitat de búsqueda de alimento y dieta de

- los polluelos de charrán rosado, *Sterna dougallii*, que se reproducen en Country Island, Nueva Escocia], *Avian Conservation Ecology*, núm. 2, vol. 4, en: <www.ace-eco.org/vol2/iss1/art4/>.
- Science + Resilience Institute (2020), *Measuring Success Monitoring Natural and Nature-Based Shoreline Features in New York State* [Medición de la eficacia del monitoreo de los atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza del litoral en el estado de Nueva York], informe final preparado por Science + Resilience Institute Jamaica Bay, NYC para New York Department of State, NOAA y New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), Nueva York, en: <https://dos.ny.gov/system/files/documents/2021/06/measuringsuccess_finalreport_minusappendices_050721.pdf>.
- Sherman, D. J. (2021), North America, Coastal Geomorphology [América del Norte: geomorfología costera], Finkl, C. W. y C., Makowski (eds.), *Encyclopedia of Coastal Science*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer, Cham, Suiza, en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_230>.
- Shiao T. (2020), Business case for nature-based solutions: landscape assessment [Estudio económico de las soluciones basadas en la naturaleza: evaluación del paisaje], iniciativa CEO Water Mandate [Mandato del Agua, del Pacto Mundial de las Naciones Unidas] y Pacific Institute, Oakland, California, en: <<https://ceowatermandate.org/NBS/wp-content/uploads/sites/41/2020/08/landscape.pdf>>.
- Silva Zúñiga, M. C., G. Watson, G. G. Watkins, A. Rycerz y J. Firth (2020), *Mejorando la resiliencia de la infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN): guía técnica de 12 pasos para desarrolladores de proyectos*, Banco Interamericano de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, en: <<http://dx.doi.org/10.18235/0002325>>.
- Skodra, J., S. Connop, J-M. Tacnet y N. van Cauwenbergh (2021), Principles guiding NBS performance and impact evaluation [Principios que rigen la evaluación del desempeño y el impacto de las SbN], cap. 2, A. Dumitri L. (ed.), en: Wendling *Evaluating the Impacts of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, Comisión Europea, Bruselas.
- Smokorowski, K. E. y R. G. Randall (2017), Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs [Precauciones sobre el uso del diseño BACI (antes-después, control-impacto) en los programas de monitoreo de efectos ambientales], *Facets*, núm. 2, vol. 1, pp. 212-232.
- Sowińska-Świerkosz, B. y J. García (2021), A new evaluation framework for nature-based solutions (NBS) projects based on the application of performance questions and indicators approach [Nuevo marco de evaluación de proyectos de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) fundamentado en la aplicación del enfoque de preguntas e indicadores de desempeño], *Science of The Total Environment*, núm. 787: 147615.
- Steinke, T. D. y Ward, C. J (1989), Some effects of the cyclones Domoina and Imboa on mangrove communities in the St Lucia Estuary [Algunos efectos de los ciclones *Domoina* e *Imboa* en las comunidades de manglares del estuario de Santa Lucía], *South African Journal of Botany*, núm. 55, pp. 340-348, en: <[https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(16\)31186-3](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(16)31186-3)>.
- Stewart-Oaten, A., W. W. Murdoch y K. R. Parker (1986), Environmental impact assessment: “Pseudoreplication” in time? [Evaluación del impacto ambiental: ¿“Pseudorreplicación” en el tiempo?], *Ecology*, núm. 67, vol. 4, pp. 929-940.
- Sutton-Grier, A. E., K. Wowk y H. Bamford (2015), Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and

- ecosystems [El futuro de nuestras costas: el potencial de las infraestructuras naturales e híbridas para aumentar la resiliencia de nuestras comunidades, economías y ecosistemas costeros], *Environmental Science Policy*, núm. 51, pp. 137-148, en: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>.
- Thom, R. M. (1997), System-development matrix for adaptive management of coastal ecosystem restoration projects [Matriz de desarrollo de sistemas para el manejo adaptativo de proyectos de restauración de ecosistemas costeros], *Ecological Engineering*, núm. 8, vol. 3, pp. 219-232.
- Thom, R. M. (2000), Adaptive management of coastal ecosystem restoration projects [Manejo adaptativo de proyectos de restauración de ecosistemas costeros], *Ecological Engineering*, núm. 15(3-4), pp. 365-372.
- Thoman, R. (2022), Why Typhoon Merbok was so Powerful when It Hit Alaska [Por qué el tifón Merbok golpeó Alaska con tanta fuerza], *The Conversation*, en: <https://www.scientificamerican.com/article/why-typhoon-merbok-was-so-powerful-when-it-hit-alaska/>.
- Underwood, A. J. (1991), Beyond BACI: experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations [Más allá del enfoque BACI: diseños experimentales para detectar el impacto ambiental humano en las variaciones temporales de las poblaciones naturales], *Marine and Freshwater Research*, núm. 42, vol. 5, pp. 569-587.
- Van Proosdij, D. et al. (2021), Making room for movement: A framework for implementing nature-based coastal adaptation strategies in Nova Scotia [Abriendo paso a la iniciativa: Un marco para la implementación de estrategias de adaptación costera basadas en la naturaleza en Nueva Escocia], TransCoastal Adaptations Centre for Nature-based Solutions, Saint Mary's University, preparado para: Natural Resources Canada, 77 pp.
- Virginia Department of Environmental Quality (2022), Restoring Eelgrass Habitat on the Seaside of Virginia's Eastern Shore [Restauración del hábitat de los pastos marinos en la costa este de Virginia], en: <https://www.deq.virginia.gov/coasts/habitat-restoration/eelgrass-and-scallops>.
- Vouk, I., B. Pilechi, M. Provan y E. Murphy (2021), *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management* [Soluciones basadas en la naturaleza para el manejo de riesgos asociados a las inundaciones y la erosión costeras y fluviales], Canadian Standards Association (CSA), en: www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Nature-Based-Solutions-for-Coastal-and-Riverine-Flood-and-Erosion-Risk-Management.pdf.
- Walters, L. J. et al. (2022), The Use of Non-Plastic Materials for Oyster Reef and Shoreline Restoration: Understanding What Is Needed and Where the Field Is Headed [Uso de materiales no plásticos para la restauración de arrecifes de ostras y costas: Comprensión de las necesidades y el rumbo del sector], *Sustainability*, núm. 14, vol. 13, en: <https://doi.org/10.3390/su14138055>.
- Webb, E. L., D. A. Friess, K. W. Krauss, D. R. Cahoon, G. R. Guntenspergen y J. Phelps (2013), A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise [Norma mundial para el monitoreo de la vulnerabilidad de los humedales costeros al aumento acelerado del nivel del mar], *Nature Climate Change*, núm. 3, vol. 5, pp. 458-465.
- Wilkinson, M. et al. (2016), The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship [Principios rectores FAIR para la gestión y administración de datos científicos], *Scientific Data*, núm. 3: 160018, en: <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.
- Williams, M. (2023), Hurricane Otis hits Mexico and continues with category 5 intensity [El huracán Otis golpea México y se mantiene con intensidad de categoría 5], *The Guardian*, en:

<<https://www.theguardian.com/environment/2023/oct/27/hurricane-otis-the-eastern-pacifics-first-inland-category-5-storm>>.

Wijsman, K., N. Auyeung, P. Brashear, B. F. Branco, K. Graziano, P. M. Groffman, H. Cheng y D. Corbett (2021), “Operationalizing resilience: co-creating a framework to monitor hard, natural, and nature-based shoreline features in New York State” [Operacionalización de la resiliencia: creación conjunta de un marco para supervisar infraestructura dura o gris, así como atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza, en el litoral del estado de Nueva York], *Ecology and Society*, vol. 26, núm. 3, en: <<https://doi.org/10.5751/ES-12182-260310>>.

Woodward, A. y K. Hollar (2011), *Monitoring Habitat Restoration Projects: U.S. Fish and Wildlife Service's Pacific Region Partners for Fish and Wildlife Program and Coastal Protocol* [Monitoreo de proyectos de restauración de hábitats: protocolo del Programa de Socios para la Pesca y la Vida Silvestre y Programa Costero del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos, región del Pacífico], U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, en: <<https://pubs.usgs.gov/tm/tm2a11/pdf/tm2a11.pdf>>.