



COMISIÓN PARA
LA COOPERACIÓN
AMBIENTAL

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



**Reconversión
de infraestructura
en pie**

Conjunto de documentos de orientación:



Cobeneficios



**Monitoreo
de la eficacia**



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

Citar como:

CCA (2025), *Reconversión de infraestructura en pie - Soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, x-101 pp.

La presente publicación fue elaborada por DHI Water and Environment Inc. para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. 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 completa o parcial de este documento y en cualquier forma, sin autorización especial previa del Secretariado de la CCA, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso sea con fines educativos y no comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. 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: 978-2-89700-365-4

Available in English – ISBN: 978-2-89700-363-0

Disponible en français – ISBN: 978-2-89700-364-7

Depósito legal: *Bibliothèque et Archives nationales du Québec*, 2025

Depósito legal: Library and Archives Canada, 2025

Particularidades de la publicación

Tipo: publicación de proyecto

Fecha de publicación: mayo de 2025

Idioma original: inglés

Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:

Revisión final de las Partes: marzo de 2025

QA386

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

Montreal, Quebec, Canadá H3B 4L4

Tel.: 514.350.4300; fax: 438.701.1434

info@cec.org / www.cec.org

Índice

Sinopsis.....	iv
Resumen ejecutivo.....	iv
Prefacio.....	ix
Agradecimientos.....	x
1 Introducción	1
1.1 Objetivos y alcance	2
1.2 Valor de la reconversión.....	3
1.3 Lagunas en la información y obstáculos relativos a la reconversión	5
1.4 Lecturas complementarias	9
2 Opciones de reconversión mediante SbN.....	9
2.1 Espectro de SbN	9
2.2 Estrategias de manejo de riesgos costeros	10
2.3 Intención de reconversión	11
2.4 Descripción general de las opciones de reconversión	12
2.5 Playas y dunas	14
2.5.1 Regeneración de playas.....	15
2.5.2 Dunas de arena	19
2.6 Humedales.....	21
2.6.1 Marismas y planicies intermareales.....	22
2.6.2 Manglares.....	25
2.7 Islas.....	27
2.8 Vegetación terrestre.....	31
2.9 Elementos sumergidos.....	33
2.10 Elementos o sistemas híbridos	37
2.11 Comparación de costos de los elementos de SbN	41
Playas y dunas.....	44
Humedales.....	44
Islas	45
Vegetación terrestre	45
Elementos sumergidos.....	46
Elementos o sistemas híbridos	46
3 Delimitación del alcance de oportunidades y opciones de reconversión	47
3.1 Etapas de proyecto para la implementación de SbN	47
3.2 Identificación de oportunidades de reconversión	48
3.2.1 Paso 1.1: Crear un inventario de los activos de MRI en pie	49
3.2.2 Paso 1.2: Definir la estrategia de involucramiento.....	49
3.2.3 Paso 1.3: Evaluar las necesidades de MRI y la estrategia a seguir	50
3.2.4 Paso 1.4: Evaluar la idoneidad del sitio y los activos para adoptar SbN ..	52
3.2.5 Paso 1.5: Priorizar las oportunidades.....	53
3.3 Evaluación de opciones de reconversión.....	54
3.3.1 Paso 2.1: Identificar las opciones de MRI y los cobeneficios asociados...	55
3.3.2 Paso 2.2: Valorar los cobeneficios	56

3.3.3 Paso 2.3: Comparar opciones.....	56
4 Consideraciones administrativas para la reconversión	57
4.1 Delimitación del alcance	57
4.2 Funciones y responsabilidades	58
4.3 Comunicación e involucramiento.....	61
4.4 Financiamiento	62
4.5 Marco reglamentario	65
4.6 Elección del momento oportuno para adoptar SbN.....	67
5 Consideraciones técnicas para la reconversión	68
5.1 Consideraciones de ingeniería.....	68
5.2 Consideraciones ambientales	70
5.3 Consideraciones sociales	72
5.4 Consideraciones económicas.....	74
5.5 Consideraciones relativas al monitoreo y el manejo adaptativo.....	76
6 Incentivos para reconversión con SbN.....	79
6.1 Incentivos inherentes.....	79
6.2 Incentivos gubernamentales	79
6.2.1 Aspectos reglamentarios	80
6.2.2 Aspectos financieros.....	80
6.3 Incentivos otorgados por ONG y de base comunitaria.....	81
6.4 Incentivos del sector privado.....	82
7 Oportunidades y orientaciones futuras.....	82
8 Conclusiones	85
Bibliografía	87

Lista de gráficas

Gráfica 1. Estrategias de manejo de costas con acciones de <i>proteger y retirar</i> en todo el espectro de SbN.....	11
Gráfica 2. Resumen de los beneficios derivados del manejo de riesgos por inundación que diferentes opciones de reconversión ofrecen.....	13
Gráfica 3. Boceto conceptual de un proceso de regeneración de playa para mitigar la erosión	16
Gráfica 4. Imágenes satelitales de la playa en 2009, antes de las tareas de regeneración, y en 2020, diez años después de concluida la intervención	18
Gráfica 5. Boceto conceptual de un establecimiento dunar para aumentar la protección frente a inundaciones.....	19
Gráfica 6. Proyecto de playa y dunas concluido en South Cape May Meadows	20
Gráfica 7. Marismas restauradas en la bahía de Tillamook.....	24
Gráfica 8. Boceto conceptual de la restauración de marisma para aumentar la protección frente a inundaciones.....	25
Gráfica 9. Boceto conceptual de plantación de manglares para aumentar la protección frente a inundaciones	26
Gráfica 10. Canal artificial en el sistema de manglares restaurado	27
Gráfica 11. Boceto conceptual de una estructura de isla para aumentar la protección ante inundaciones y reducir la erosión.....	28
Gráfica 12. Sitio 1 del proyecto (cinco islas de marismas) y sitio 2 (tres islas, dos de las cuales experimentan erosión)	30
Gráfica 13. Boceto conceptual de vegetación terrestre utilizada para aumentar la protección ante inundaciones y reducir la erosión	32
Gráfica 14. Boceto conceptual de estructura de arrecife coralino para aumentar la protección contra inundaciones y reducir la erosión	33
Gráfica 15. Agrupaciones de conchas de ostras del Pacífico en la bahía de San Francisco	36
Gráfica 16. Boceto conceptual de un ejemplo de solución híbrida, con una marisma construida frente a un sistema de dique en pie.....	37
Gráfica 17. Estuario recién construido detrás del cordón litoral (verano de 2022).....	39
Gráfica 18. Fotografías de la línea costera tras la tormenta del 7 de enero de 2022, a lo largo del estuario restaurado del arroyo y a lo largo de un tramo adyacente de la costa, en el que falló el malecón.....	39
Gráfica 19. Costos relativos de las etapas de ejecución de un proyecto, para diferentes tipos de SbN.....	43
Gráfica 20. Marco para ejecutar un proyecto de SbN	48
Gráfica 21. Marco conceptual para explorar y delimitar el alcance de oportunidades y opciones de reconversión	48
Gráfica 22. Marco conceptual para identificar oportunidades de reconversión con SbN	49
Gráfica 23. La vulnerabilidad como combinación de la exposición a riesgos costeros, la capacidad de adaptación y la sensibilidad de la zona protegida.....	52
Gráfica 24. Marco conceptual para la evaluación de opciones de MRI	55
Gráfica 25. Ilustración conceptual de las condiciones prevalecientes y diseño del posible dique vivo futuro	60
Gráfica 26. Modelo conceptual de datos de monitoreo de elevación de marismas, mismos que alimentan el manejo adaptativo	77

Sinopsis

América del Norte dispone de una vasta cartera de infraestructura que contribuye al manejo de riesgos por inundación (MRI) en entornos costeros, gran parte de la cual está llegando al final de su vida útil —o ya la ha rebasado—, amén de no estar diseñada para adaptarse a los efectos del cambio climático ni haberse construido con un conocimiento exhaustivo de los impactos sociales, culturales y ambientales de mayor alcance. La reconversión de infraestructura en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza (SbN) brinda la oportunidad de mejorar el desempeño o la integridad de los sistemas de MRI, al tiempo que aporta numerosos cobeneficios de carácter social, económico y ambiental.

El presente documento tiene el propósito de fomentar la adopción de SbN en comunidades costeras de Canadá, Estados Unidos y México, para lo cual pone a disposición de personas responsables de la toma de decisiones información práctica y orientación relacionada con la reconversión de infraestructura de MRI en pie utilizando SbN. Para facilitar la consulta, se resumen y comparan los distintos tipos de SbN, aunque las variaciones en las condiciones de los tres países pueden afectar la viabilidad de la reconversión o el tipo de SbN utilizado. Asimismo, se presenta un marco para explorar, identificar y evaluar oportunidades y opciones de reconversión, y se analizan consideraciones de índole lo mismo administrativa (esto es, delimitación de alcance, funciones y responsabilidades, comunicación e involucramiento, financiamiento, marco reglamentario y elección del momento oportuno para la implementación) que técnica (es decir, aspectos ambientales, sociales, económicos y de ingeniería, así como de monitoreo y manejo adaptativo). Se describen también diversos incentivos para la implementación de proyectos de reconversión con uso de SbN y —a manera de conclusión para responsables de la toma de decisiones— se proporciona una lista de posibles oportunidades que contribuirían a subsanar las deficiencias en este campo y superar los obstáculos relacionados con la reconversión. A lo largo del documento se incluyen estudios de caso en los que se ofrece un contexto real y se destacan conceptos clave.

Resumen ejecutivo

A lo largo de las costas de Canadá, Estados Unidos y México, gran parte de las comunidades urbanas y periurbanas asentadas en estas áreas dependen de estructuras de ingeniería pesada o “grises”, como escolleras, terraplenes, espigones, malecones, diques de contención y rompeolas, para —en cierta medida— protegerse de los riesgos de inundación y erosión. Estas estructuras están expuestas a sufrir fallas repentinas —o catastróficas— y, a menudo, interrumpen los procesos dinámicos naturales, lo que conlleva consecuencias imprevistas y la degradación de los sistemas naturales, además de afectar tanto la recuperación posterior al evento como la resiliencia del propio sistema. Las medidas convencionales de protección costera grises —como los malecones y diques de contención—, por citar un ejemplo, tienen consecuencias negativas para la biodiversidad costera y favorecen la erosión de los litorales adyacentes que no están protegidos por este tipo de infraestructura. Por otro lado, para el próximo siglo, se prevén mayores riesgos de inundación y erosión en las costas como consecuencia del cambio climático y el crecimiento de la población en estas zonas. Los riesgos de inundación proyectados, aunados a los impactos no intencionados causados por la adopción de enfoques “grises”, han dado lugar a la necesidad de modernizar y reconvertir esta infraestructura para reforzar el manejo de riesgos de inundación (MRI). En vista de que gran parte de la infraestructura gris en pie para el MRI en las costas de América del Norte ha excedido o está cerca de alcanzar el final de su vida útil, existe la oportunidad de considerar la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en combinación con estas estrategias convencionales de protección costera o en sustitución de las mismas. Las SbN tienen la capacidad de adaptarse y permitir la reconversión de sistemas de MRI en pie con el

propósito de aumentar la protección, mitigar daños, prolongar la vida útil de una estructura de MRI presente y potenciar la resiliencia tanto de las estructuras mismas como de las comunidades frente a los efectos del cambio climático. La implementación de SbN para reconvertir estructuras costeras convencionales en pie conlleva múltiples beneficios, entre los que se incluyen —sin a ellos limitarse— los siguientes:

- mayor protección costera y longevidad de los beneficios del MRI;
- mejoramiento del medio ambiente y la biodiversidad;
- beneficios sociales como recreación, espacios verdes y mejoras en la salud, y
- beneficios económicos procedentes de la generación de empleos y el aumento del turismo.

Aunque las ventajas asociadas a la reconversión con SbN son numerosas, su adopción generalizada o de más amplio alcance para el MRI se enfrenta a muy diversos obstáculos, que pueden clasificarse en los siguientes grupos generales:

- **sociales y de percepción** (por ejemplo, cuando se tiene la creencia de que las SbN no ofrecen el mismo grado de protección y desempeño que los métodos estructurales grises);
- **técnicos** (como falta de orientación técnica, de profesionales con suficiente capacidad o de proyectos piloto o demostrativos en diversos entornos);
- **ambientales** (variabilidad estacional o a largo plazo de los sistemas naturales, y resiliencia a las perturbaciones, entre otros);
- **institucionales** (aspectos normativos y falta de financiamiento, por citar algunos), y
- **escasez de datos** (sobre desempeño y cobeneficios de las SbN en distintas regiones y, en particular, en comparación con los métodos convencionales grises de MRI).

Este documento ofrece orientación, datos y herramientas para ayudar a personas y entidades responsables de la toma de decisiones en lo concerniente a una implementación generalizada y de más amplio alcance de SbN mediante la reconversión de infraestructura gris en pie para el manejo de riesgos por inundación en comunidades costeras. En concreto, su objetivo es apoyar a quienes toman las decisiones en todas las etapas de un proyecto, desde la conceptualización hasta el diseño y la operación. Ahora bien, no constituye una guía con orientación técnica detallada ni tampoco ofrece una revisión exhaustiva de la cada vez más extensa bibliografía publicada en materia de SbN.

Opciones de reconversión con la integración de SbN

La reconversión implica sustituir, modificar o mejorar la infraestructura en pie con la incorporación de elementos y sistemas nuevos. Las opciones de SbN para reconvertir infraestructura destinada al manejo de riesgos por inundación abarcan un espectro que va del gris al verde. La reconversión mediante SbN debería, por lo general, llevar la infraestructura hacia el extremo verde del espectro, al incrementar su contribución a la función de los sistemas naturales o reducir los impactos negativos en éstos.

Las opciones de SbN con fines de reconversión se clasifican en las seis categorías generales siguientes:

- playas y dunas;
- humedales (marismas, planicies intermareales y manglares, entre otros);
- islas;
- vegetación costera terrestre (por ejemplo, bosques costeros y zonas boscosas);
- elementos sumergidos (arrecifes, bosques de kelp y vegetación sumergida), y
- elementos o sistemas híbridos (es decir, soluciones que combinan atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza con infraestructura gris).

Cabe destacar que, al adoptar una estrategia a escala de sistema para manejar los riesgos por inundación (tal y como se propone en este documento), la mayoría de los sistemas de MRI se

clasificarán intrínsecamente como soluciones híbridas, ya que implicarán combinaciones de estrategias que variarán en función de los diferentes tramos de la línea costera. Las soluciones híbridas pueden lograrse mediante la adopción de una amplia diversidad de estrategias, incluida la modificación de la infraestructura en pie para incorporar atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza (por ejemplo, añadiendo baldosas que mejoren el hábitat a un malecón en pie), o mediante la sustitución completa de la infraestructura en pie por soluciones híbridas nuevas.

Además de contener un análisis detallado de estas seis categorías de reconversión con SbN, en el presente documento de síntesis se describen los beneficios y cobeneficios del MRI que suelen asociarse con cada una de dichas categorías, y se proporcionan los costos relativos de éstas en las distintas etapas de su ciclo de ejecución (es decir, planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento).

Identificación, priorización y evaluación de oportunidades de reconversión

En este documento también se formula un marco sencillo de dos pasos para ayudar a las personas encargadas de la toma de decisiones a identificar, priorizar y evaluar las oportunidades de reconversión como parte de procesos más amplios (basados en sistemas) de elaboración de estrategias para el manejo de riesgos por inundación. El primer paso de este marco, la identificación, puede dividirse en cinco partes iterativas:

Paso 1: Identificar oportunidades de reconversión con SbN

- **Paso 1.1: Crear un inventario de los activos disponibles para el manejo de riesgos de inundación**

Este paso se centra en elaborar un inventario de todos los activos de protección frente a inundaciones costeras con los que cuenta un sistema determinado (por ejemplo, malecones, diques o escolleras).

- **Paso 1.2: Definir una estrategia de involucramiento**

Habrà de formularse una estrategia que propicie la participación, la cual deberá ejecutarse en todas las etapas restantes del proceso. Este paso es fundamental para determinar quiénes son las principales figuras y partes interesadas, así como las personas o entidades titulares de derechos que aportarán perspectivas sobre las necesidades, prioridades y opciones respecto a la protección de las costas.

- **Paso 1.3: Evaluar las necesidades y estrategias para el MRI**

Como parte de este paso debe evaluarse la necesidad de implementar medidas de manejo de riesgos de inundación en la línea costera y el sistema de interés. Se recomienda una evaluación de riesgos destinada a identificar y priorizar las estrategias de manejo de riesgos.

- **Paso 1.4: Evaluar la idoneidad del sitio y los activos**

Este paso implica una evaluación exhaustiva de la idoneidad de los activos y los sitios para llevar a cabo proyectos de reconversión con SbN. El objetivo es determinar la viabilidad de sustituir o modificar las estructuras en pie con soluciones basadas en la naturaleza en el lugar de interés.

- **Paso 1.5: Priorizar oportunidades**

El resultado deseado de este paso es determinar qué sitios y activos identificados en el paso 1.4 deben priorizarse para la implementación de soluciones basadas en la naturaleza.

Paso 2: Evaluar opciones de reconversión

El segundo paso del marco implica la evaluación de las opciones de reconversión, entre las que se incluyen estrategias con SbN, híbridas, convencionales y de “no hacer nada”. El marco para determinar la opción de reconversión más adecuada para un proyecto implica comparar diferentes opciones; por ejemplo, mediante un análisis basado en criterios múltiples. Esto incluye evaluar los beneficios del MRI y otros cobeneficios, junto con las necesidades y limitaciones específicas del proyecto. La evaluación de cobeneficios sigue un proceso de tres pasos, descrito brevemente en este trabajo y

detallado en el documento de orientación titulado *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe). El resultado de la segunda fase es determinar la mejor opción —siguiendo un enfoque de análisis basado en criterios múltiples— para el manejo de inundaciones costeras y maximizar los cobeneficios particulares de cada proyecto.

Consideraciones administrativas y técnicas para la reconversión

Cuando se contempla la opción de emprender proyectos de reconversión mediante soluciones basadas en la naturaleza, las personas y entidades responsables de la toma de decisiones deben prestar atención a consideraciones administrativas y técnicas muy diversas. En este documento se analizan aspectos de carácter administrativo, entre los que se incluyen delimitación del alcance; funciones y responsabilidades; comunicación e involucramiento; financiamiento; marco reglamentario, y elección del momento oportuno para la instrumentación. Las consideraciones técnicas examinadas, por su parte, se agrupan en aspectos ambientales, sociales y económicos, así como de ingeniería, de monitoreo y de manejo adaptativo.

Incentivos para la reconversión con SbN

Existen varios tipos de incentivos para reconvertir infraestructura gris utilizando SbN, en lugar de la sustitución directa (uno a uno) o de mejoras puramente estructurales. Además de los impactos positivos directos de los cobeneficios asociados, podrían surgir incentivos del gobierno, el sector privado, organizaciones no gubernamentales (ONG) y entidades comunitarias, entre los que destacan los siguientes:

- **Incentivos inherentes:** Surgen como resultado de la provisión de múltiples cobeneficios que no podrían obtenerse utilizando enfoques convencionales (infraestructura “gris”). Estos incentivos también se consiguen en función del potencial de las SbN para adaptarse a las amenazas costeras en constante cambio y la oportunidad que brindan para adoptar una estrategia de manejo adaptativo. La infraestructura en pie que requiere reparación o reemplazo también brinda la oportunidad de aprender lecciones de abordajes previos —incluidos los fallidos— y reconstruir de manera más sólida después de eventos dañinos.
- **Incentivos gubernamentales:** Por lo general, éstos incluyen incentivos financieros, reglamentarios o de políticas y programas, entre los que figuran los incentivos derivados de la adhesión de los gobiernos a acuerdos internacionales.
- **Incentivos proporcionados por ONG u organizaciones comunitarias:** Se trata de incentivos para llevar a cabo proyectos de SbN que, en numerosas ocasiones, se ofrecen mediante actividades de promoción dirigidas a aumentar la voluntad y motivación políticas. Estos incentivos incluyen asistencia técnica, apoyo financiero o la emisión de certificaciones.
- **Incentivos de organizaciones privadas:** Corresponden a aquellos que se ofrecen en forma de financiamiento y fondos para investigación a fin de contribuir a subsanar lagunas en el conocimiento.

Oportunidades y orientaciones futuras

A fin de ayudar a subsanar las lagunas en la información y superar los obstáculos detectados, en este informe se describen posibles oportunidades y orientaciones futuras que las personas responsables de la toma de decisiones podrían poner en práctica en lo concerniente a soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras. Se resumen a continuación las oportunidades principales:

- Crear fuentes de financiamiento en el ámbito regional para proyectos piloto de reconversión con soluciones basadas en la naturaleza y otros enfoques con alto grado de innovación.

- Establecer una comunidad de práctica profesional de SbN con personas con conocimientos especializados en disciplinas y regiones distintas.
- Generar fuentes de financiamiento y políticas que sustenten estrategias de manejo adaptativo.
- Implementar proyectos piloto que impliquen procesos de reconversión mediante soluciones basadas en la naturaleza, así como otros métodos de SbN novedosos, y poner los resultados a disposición de los miembros de la comunidad.
- Proporcionar iniciativas e incentivos de política para proyectos de reconversión que utilizan SbN.
- Fomentar y destacar los estudios de caso que comparen SbN con medidas estructurales de protección costera.
- Promover y resaltar los estudios de caso con resultados a largo plazo.
- Establecer redes adicionales donde alojar e intercambiar datos de monitoreo estándar necesarios para el diseño de SbN y poner estos datos a disposición del público.
- Implementar estándares y certificaciones nacionales o internacionales con fundamento empírico para el diseño de SbN, que realcen la legitimidad de estas soluciones y brinden orientación al respecto.
- Simplificar los procesos de concesión de permisos para la construcción, el monitoreo y el manejo adaptativo de las SbN.
- Apoyar y publicar investigaciones sobre procesos de reconversión con soluciones basadas en la naturaleza, así como otros métodos novedosos de SbN.
- Recopilar y presentar casos de éxito y enseñanzas extraídas de intentos fallidos de reconversión de sistemas convencionales de MRI con SbN, para que sirvan de ejemplo.

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 los tres países del subcontinente. 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 en el 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

En conjunto, 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 (*el presente documento*)
- Monitoreo de la eficacia
- Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos

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 contó con la colaboración de:

- Eleanor Simpson, científica ambiental en jefe, DHI Water and Environment Inc. (DHI)
- Jessica Wilson, gerente de proyecto e ingeniera costera, DHI
- Brianna Lunardi, científica ambiental, DHI
- Christian Appendini, asesor externo, DHI, y profesor de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
- Danker Kolijn, jefe de proyecto: Soluciones Marinas y Costeras (continente americano), DHI
- Tom Foster, vicepresidente: Soluciones Marinas y Costeras (América y el Pacífico), DHI

Agradecemos sinceramente a las personas con conocimientos especializados de DHI que en noviembre de 2022 participaron en un taller interno sobre opciones, costos, obstáculos y oportunidades de reconversión:

- Ben Tuckey, jefe de proyecto: Soluciones Marinas y Costeras (Nueva Zelanda), DHI
- Siti Maryam Yaakub, consultora ambiental principal (Singapur), DHI
- George Foulsham, director de medio ambiente marino y costero, 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

1 Introducción

Gran parte de la población de América del Norte se concentra en comunidades costeras, por lo que está sujeta a amenazas relacionadas con inundaciones en las costas (DHI, 2022a). Si bien es cierto que se dispone de una importante infraestructura para el manejo de riesgos por inundación (MRI), a efecto de reducir la exposición de las zonas costeras a dichas amenazas, se prevé que estos riesgos se intensifiquen debido al aumento de la densidad de población en áreas urbanas y a los efectos del cambio climático (Diez *et al.*, 2011; Ford *et al.*, 2018; Ghanbari *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021; OCDE, 2021). De ahí la necesidad acuciante y la oportunidad de reconvertir muchas de las infraestructuras de MRI en pie y en proceso de envejecimiento en América del Norte durante las próximas décadas, a efecto de manejar estos riesgos cada vez mayores, al tiempo que se desbloquea un conjunto de cobeneficios asociados.

La infraestructura de MRI en pie se basa en gran medida en sistemas estructurales convencionales, como diques, escolleras y malecones, todos con una larga historia de aplicación y amplia representación en la literatura científica, así como en documentos de orientación directrices y normas (por ejemplo, el manual de ingeniería costera del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos [*Coastal Engineering Manual*, USACE, 2002]). Debido a su largo historial de utilización y en virtud de las abundantes publicaciones sobre su diseño y desempeño, se suele confiar en que tales soluciones funcionarán según lo previsto. Sin embargo, estos sistemas estructurales son propensos a fallos catastróficos y a menudo su diseño cuenta con poca redundancia, lo que da lugar a inundaciones repentinas e impactos devastadores (Bridges *et al.*, 2021, p. 180). Además, en muchos casos se diseñaron sin comprender en profundidad los amplios efectos sociales, culturales y ambientales asociados, así como sus posibles cobeneficios, o bien los riesgos crecientes derivados del cambio climático.

El aumento previsto de los riesgos de inundación, el envejecimiento de la infraestructura, un mayor conocimiento de los impactos no deseados de los enfoques de MRI con estructura gris y la posibilidad de obtener cobeneficios son elementos todos que presentan una oportunidad para adoptar estrategias más integrales de MRI. Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) usan materiales y procesos naturales o que emulan la naturaleza como alternativa para el MRI, al tiempo que aportan cobeneficios sociales, ambientales y económicos. Sin embargo, en la práctica, el uso de SbN como parte de los sistemas de MRI está menos consolidado y, a veces, se ve con escepticismo (véase, por ejemplo, Anderson *et al.*, 2022, y Raška *et al.*, 2022). Si bien las directrices y normas de diseño definitivas para aplicaciones de SbN en América del Norte aún se encuentran en proceso de elaboración, en fechas recientes se han logrado avances significativos en este sentido (Bridges *et al.*, 2021; Doswald *et al.*, 2021, y Vouk *et al.*, 2021, entre otros).

A pesar de tenerse la percepción de que las SbN son más novedosas y menos conocidas que los métodos estructurales, lo cierto es que los sistemas naturales —como playas y dunas, marismas, arrecifes e islas— siempre han prestado servicios de MRI a las comunidades costeras. Existe un inmenso potencial para que este tipo de atributos naturales se adapten, imiten o se combinen con estructuras en pie a fin de reconvertir los sistemas de protección costera existentes y mitigar con mayor eficacia los desafíos asociados a las amenazas naturales, como el aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia de las tormentas, al tiempo que se obtienen importantes cobeneficios.

La reconversión de los sistemas de MRI en pie con la implementación de SbN implica sustituir, modificar o mejorar la infraestructura gris en pie —también conocida como convencional, estructural o pesada— con atributos y procesos naturales, así como otros elementos basados en la naturaleza. A lo largo del presente documento, el término *reconversión* se utilizará en el contexto de mejorar el

desempeño y diversificar los beneficios de los sistemas de protección de las costas mediante la implementación de soluciones basadas en la naturaleza.

El presente informe se propone impulsar la adopción e implementación de soluciones basadas en la naturaleza en comunidades costeras en América del Norte, 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 y orientación en torno a la reconversión de sistemas de infraestructura en pie mediante la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, al tiempo que aborda lagunas en la información y obstáculos previamente identificados. Cabe destacar que 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 (*el presente documento*)
- Monitoreo de la eficacia
- Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos

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 de riesgos por inundación (MRI) en comunidades costeras de América del Norte, DHI organizó una serie de talleres intersectoriales en la primavera de 2022 (DHI, 2022b). Los talleres consistieron en siete sesiones, con 95 participantes de Canadá, Estados Unidos y México. Dos de dichas sesiones se centraron específicamente en la reconversión de sistemas de infraestructura en pie utilizando SbN. Durante estas sesiones, las personas asistentes participaron en la generación de ideas y la identificación de lagunas en la información, obstáculos y oportunidades relacionados con la reconversión.

El presente documento aborda las lagunas en el conocimiento identificadas en la serie de talleres; sintetiza la información disponible, y proporciona orientación práctica para identificar oportunidades de reconversión utilizando soluciones basadas en la naturaleza, planificar las tareas correspondientes e implementar las soluciones convenientes para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras. Como se señaló ya, esta publicación forma parte de un exhaustivo conjunto de documentos de orientación destinados a apoyar a las personas responsables de la toma de decisiones (dirigentes indígenas, personas encargadas de la planificación del uso del suelo, representantes de gobierno y propietarias o administradoras de activos de infraestructura, entre otras) en la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza para manejo de riesgos de inundación costera en América del Norte.

En concreto, este documento pretende:

- contextualizar las diferencias existentes que pueden influir en las iniciativas de reconversión y destacar las oportunidades para su puesta en práctica en el entorno de América del Norte;
- proporcionar una hoja de ruta para demostrar la propuesta de valor de la reconversión;
- facilitar un resumen completo de las opciones disponibles para la reconversión con SbN y, cuando sea posible, ofrecer ejemplos y comparativas de costos;
- formular estrategias para que las personas responsables de la toma de decisiones identifiquen oportunidades, consideren opciones y evalúen costos de reconversión;
- resumir consideraciones administrativas de mayor relevancia para trabajos de reconversión, en las que se consideren funciones y responsabilidades, financiamiento y normativa aplicable;

- presentar un resumen detallado de las consideraciones técnicas más importantes para la reconversión;
- analizar distintos tipos de incentivos para realizar proyectos de reconversión de infraestructura utilizando SbN como alternativa junto o en combinación con técnicas grises;
- presentar estudios de caso de proyectos o procesos de reconversión con uso de SbN, y
- abordar, en la medida de lo posible, las lagunas y obstáculos detectados durante la serie de talleres intersectoriales.

El presente informe busca ofrecer orientación, datos y herramientas que faciliten a las personas responsables de la toma de decisiones la implementación a gran escala de las SbN para hacer frente a los riesgos de inundación en comunidades costeras de toda América del Norte. Lejos de tratarse de una guía técnica detallada o de una revisión exhaustiva de la cada vez más abundante bibliografía sobre SbN, este informe tiene por objeto ayudar a las personas responsables de la toma de decisiones en todas las fases del proceso de un proyecto, desde su conceptualización hasta el diseño y operación.

En el apartado 1.4 se presentan materiales de lectura y documentos fundamentales sobre reconversión por medio de la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza.

1.2 Valor de la reconversión

América del Norte cuenta con una extensa cartera de infraestructura costera para el manejo de riesgos por inundación, gran parte de la cual está llegando al final de su vida útil —o ya la ha rebasado—, amén de no estar diseñada para adaptarse a los efectos del cambio climático ni haberse construido teniendo plenamente en cuenta los impactos sociales y ambientales. Las SbN brindan una excelente oportunidad para aprender de los errores del pasado y “reconstruir mejor”¹ (Naciones Unidas, 2015). Las SbN ayudan a mejorar el desempeño o la integridad de los sistemas de MRI mediante la sustitución, reconversión o modernización de la infraestructura gris en pie, al tiempo que proporcionan numerosos cobeneficios adicionales que abordan múltiples desafíos sociales y brindan la oportunidad de restaurar hábitats degradados. Los posibles beneficios de la reconversión de infraestructura de MRI en pie utilizando SbN se detallan en el Recuadro 1.

¹ “Reconstruir mejor” es una de las cuatro prioridades de acción establecidas en el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres.

Recuadro 1. Beneficios de la reconversión de infraestructura de MRI en pie utilizando SbN

	Mejoría en el manejo de riesgos por inundación o erosión		Fomento y aplicación de nuevos conocimientos (por ejemplo, investigación y preparación de orientaciones)
	Reforzamiento o reparación de infraestructura obsoleta en pie		Mayor aceptación por parte del público
	Desempeño residual mejorado (es decir, mayor resiliencia)		Cobeneficios ambientales (restauración del hábitat, entre otros)
	Mayor adaptación al cambio climático		Cobeneficios sociales (como el acceso mejorado a espacios verdes)
	Cumplimiento de los requisitos establecidos para los proyectos (como los relativos a financiamiento)		Cobeneficios económicos (menores costos del ciclo de vida, por citar un ejemplo)
	Oportunidad para establecer colaboraciones con pueblos indígenas y comunidades		Soluciones específicas para cada lugar

El principal beneficio de la reconversión de infraestructura costera de MRI en pie utilizando SbN reside en mejorar o proveer la función de manejo de riesgos por inundación o erosión. Este objetivo puede lograrse reemplazando infraestructura gris presente, o bien reforzando o reparando estructura pesada en pie, en proceso de envejecimiento o que no esté funcionando de manera conveniente. Cuando se conciben adecuadamente y en los entornos propicios, las SbN suelen consolidarse y aumentar su eficacia con el tiempo, lo que mejora la función de manejo de riesgos de inundación o erosión a lo largo de la vida del proyecto (véase, por ejemplo, Sutton-Grier *et al.*, 2015). En última instancia, de esta manera se reduce el riesgo para las personas, bienes, medios de vida, tierras de importancia cultural o social y áreas sensibles desde el punto de vista ambiental.

Por definición, las soluciones basadas en la naturaleza son escalables, flexibles, adaptables y resilientes al cambio climático (Osborne, 2022). Gracias a su capacidad de autoadaptación, mantienen un desempeño residual —en otras palabras, son resilientes— después de una tormenta y también pueden adaptarse a un clima en constante cambio. En las circunstancias adecuadas, las SbN consiguen crecer para ir a la par del aumento del nivel del mar (Sutton-Grier *et al.*, 2015). Estas capacidades constituyen importantes ventajas de las SbN en comparación con infraestructuras grises estáticas, y brindan la oportunidad de aprender de los errores cometidos en el pasado con dichas infraestructuras, al tiempo que aumentan la resiliencia y se adopta un enfoque de manejo adaptativo.

Por si fuera poco, los cobeneficios que aportan las SbN suelen infravalorarse en comparación con los enfoques convencionales o “grises” (centrados muchas veces en la función de ingeniería y los costos de capital y mantenimiento del proyecto, además de no tener en cuenta los beneficios colaterales adicionales como un mayor acceso a zonas de alimentación, y las funciones de captación y almacenamiento de carbono). La reconversión de sistemas de infraestructura gris con SbN permite

la incorporación de cobeneficios ambientales, sociales y económicos, de gran valor para las comunidades locales, las partes interesadas en el proyecto y las personas o entidades titulares de derechos. Sobre todo, las soluciones basadas en la naturaleza pueden reducir los costos del ciclo de vida (es decir, generar un cobeneficio económico) del proyecto de MRI gracias al manejo adaptativo y la capacidad de algunas de estas SbN para mantener el ritmo del aumento del nivel del mar. En el documento complementario sobre cobeneficios se describen otros posibles cobeneficios asociados a las SbN. Los proyectos de reconversión que incorporan SbN podrían también aprovechar estos cobeneficios para obtener financiamiento y lograr una mayor aceptación pública del proyecto.

Para cumplir requisitos normativos o de financiamiento, las iniciativas de reconversión pueden llevarse a cabo como parte de un proyecto más amplio o de una estrategia de MRI mediante la creación de hábitats adicionales o la prestación de servicios sociales. En el caso de crear más hábitats, también es posible que se eviten esquemas de pagos por compensación en ocasiones asociados a la infraestructura gris.

1.3 Lagunas en la información y obstáculos relativos a la reconversión

En este apartado se ofrece un resumen de las conclusiones extraídas de la serie de talleres de la CCA sobre SbN (DHI, 2022b) en cuanto a lagunas en la información y en el conocimiento y obstáculos en relación con la reconversión de infraestructura en pie utilizando SbN. El recuadro 2 presenta un resumen de los obstáculos detectados durante la serie de talleres de la CCA.

Uno de los mayores obstáculos a la hora de ejecutar un proyecto de reconversión que utiliza soluciones basadas en la naturaleza radica en la confianza pública e institucional en las técnicas disponibles y la desconfianza en torno a las SbN. Lo anterior parece obedecer a una tendencia a confiar en el estado actual de las cosas y, por defecto, buscar mantenerlo, así como a la incertidumbre por cuanto a que los atributos naturales o las medidas basadas en la naturaleza sean capaces de proporcionar el mismo grado de protección que los enfoques grises, tema que abordan Anderson *et al.* (2022), Raška *et al.* (2022) y Cado van der Lely (2021). Asimismo, se tiende a hablar de las SbN como si todas las técnicas tuvieran los mismos costos y beneficios, lo que puede dar la falsa impresión de que, si una SbN funciona mal, todas las demás lo harán de forma similar. Comunicar los matices y los posibles beneficios de las SbN con estudios de caso y abordar cada tipo de SbN de forma independiente podría ayudar a mejorar la aceptación y la comprensión por parte del público.

El documento titulado *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.*, 2021) presenta una descripción general completa de las opciones de SbN y consideraciones por cuanto a su diseño. Sin embargo, las personas con conocimientos especializados que participaron en el taller pusieron de manifiesto la necesidad persistente de contar con orientaciones técnicas específicas y detalladas, basadas en la investigación y que abarquen una amplia gama de SbN, tipos de proyectos (es decir, reconversión o nueva construcción) y regiones. La necesidad de orientación técnica obedece al hecho de que la comprensión de algunas SbN es aún incipiente, con proyectos de investigación y proyectos piloto en curso o pendientes. Además, se requiere personal capacitado (de múltiples y diversas disciplinas) para el diseño e implementación de SbN. Destaca la necesidad de involucrar a personas profesionales calificadas de una diversidad de disciplinas, lo que plantea dificultades logísticas y presupuestarias, sobre todo durante las primeras etapas de un proyecto (DHI, 2022a). A fin de contribuir a la adquisición de conocimientos por parte del personal, se necesitan formación adicional, documentos de orientación técnica y estudios de caso actualizados (que pongan de relieve tanto los logros como

los fracasos). Como lectura complementaria, en Vouk *et al.* (2021) se analizan muchas de estas necesidades y obstáculos en un contexto canadiense.

Las personas diseñadoras de proyectos que participaron en la serie de talleres de la CCA señalaron que las SbN a menudo funcionan mejor a mayor escala, en comparación con muchas de las soluciones convencionales grises. Las SbN son dinámicas y tienen capacidad para adaptarse a las perturbaciones y, a menudo, para autorrepararse. Sin embargo, su tamaño en relación con los procesos costeros afectará su capacidad para amortiguar los peligros (es decir, un pequeño sistema de marismas construido podría quedar completamente erosionado por una tormenta de gran magnitud, mientras que una marisma con mayor extensión podría sufrir daños localizados y ser capaz de autorrepararse) (Wilson, 2021). Esto no significa necesariamente que las SbN deban ser proyectos a gran escala y con un alto nivel de inversión de capital: se pueden aplicar enfoques por etapas para aprovechar los beneficios acumulativos de realizar múltiples intervenciones de menor envergadura. Además, la exposición de un sitio a fuertes vientos, olas, corrientes o marejadas ciclónicas puede limitar la aplicabilidad de algunas SbN. Por esta razón se requiere un marco de valoración de opciones fácil de usar para las SbN que sirva de apoyo a la toma de decisiones y permita equilibrar diferentes objetivos de diseño (Osborne, 2022) antes de comprometerse con un enfoque determinado.

Los obstáculos ambientales incluyen la variabilidad estacional y a largo plazo de los sistemas naturales, y el tiempo de demora para instaurar la estrategia de SbN, lo que puede generar incertidumbre y vacilación entre el público, las instituciones y el equipo del proyecto. A esto se suma cierta incertidumbre en torno a los impactos del cambio climático, en particular sobre el ritmo de aumento del nivel del mar en horizontes temporales más largos y los efectos en la intensidad y la frecuencia de las tormentas.

Las personas especialistas en la materia también indicaron que los obstáculos institucionales suponen un desafío importante para la reconversión de los sistemas en pie mediante la adopción de SbN. Tales obstáculos incluyen la falta de incentivos con respaldo en políticas y de obligaciones legales; la falta de voluntad política; la corrupción; las discrepancias por cuanto a requisitos de una jurisdicción a otra o entre instancias competentes; los obstáculos normativos, y el enfoque en los resultados a corto plazo. Muchas de estas barreras han dado lugar a una marcada falta de planificación estratégica y de todo el sistema, lo que se traduce en un enfoque fragmentado y reactivo de la protección contra las inundaciones. Los obstáculos institucionales se acentúan aún más por la falta de fondos disponibles para financiar proyectos de SbN, en particular durante las etapas operativas, en las que se requiere un monitoreo a largo plazo y un manejo adaptativo (DHI, 2022c). Por otro lado, en muchos casos, las personas responsables de la toma de decisiones y quienes financian los proyectos desconocen los posibles beneficios de las SbN o no valoran en su justa medida los beneficios sociales y ambientales, por lo que dudan a la hora de financiar estos proyectos (Brill *et al.*, 2021).

El presente documento pretende subsanar de manera directa varias de estas lagunas en la información y, en la medida de lo posible, superar los obstáculos (señalados en el apartado 2) o, cuando no sea posible, identificar métodos para abordarlos en futuras iniciativas (véase el apartado 7). Los obstáculos analizados en este estudio comprenden factores sociales y de percepción, técnicos e institucionales susceptibles de mitigarse —en parte— si se dispone de más datos, conocimientos u orientación, pero no se han abordado aquellos que requieren medidas adicionales por parte de quienes están en posición de tomar decisiones (como el establecimiento de fuentes de financiamiento).

Consúltense información más detallada sobre obstáculos específicos para la adopción de SbN en Vouk *et al.* (2021) y Raška *et al.* (2022). Obsérvese también que tales obstáculos, al igual que las lagunas en la información acerca de los cobeneficios derivados de dichas soluciones, se presentan en los documentos de orientación asociados al presente documento: *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* y *Monitoreo de la eficacia de*

las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras.

Recuadro 2. Obstáculos para la reconversión mediante soluciones basadas en la naturaleza

	Tipos de obstáculos	Objeto de este informe
	Sociales y de percepción • Confianza en el estado actual de las cosas o aceptación de éste por defecto • Percepción de que las SbN no proporcionan el mismo grado de protección que los enfoques convencionales • Percepción de que todas las opciones de SbN funcionan de manera similar • Desconocimiento sobre los posibles cobeneficios derivados de proyectos de reconversión	☐ ☒ ☒ ☒
	Técnicos • Falta de orientación técnica definitiva que abarque todas las posibles opciones de SbN • Necesidad de contar con la participación de especialistas en diversas disciplinas (por ejemplo, en ciencias sociales) • Falta de profesionales con la formación y cualificaciones necesarias, sobre todo en el ámbito local • Falta de formación y educación sobre el diseño y la implementación de SbN • Carencia por cuanto a estudios de caso e inventarios actualizados y utilizables (que demuestren resultados tanto exitosos como infructuosos) • Necesidad de un marco de valoración de opciones • Dificultades para llevar a cabo un manejo adaptativo a largo plazo • Restricciones de diseño debido a limitaciones de espacio o de propiedad • Limitaciones de diseño debido a procesos y riesgos en la costa	☐ ☐ ☐ ☒ ☒ ☒ ☐ ☒ ☐
	Ambientales • Variabilidad estacional y a largo plazo de los sistemas naturales • Incertidumbre respecto a los efectos del cambio climático • Retrasos para establecer sistemas naturales	☐ ☐ ☐
	Institucionales • Falta de financiamiento para proyectos y procesos de reconversión con SbN • Falta de incentivos en las políticas u obligaciones de carácter legal • Atención a horizontes a corto plazo como parte de los programas vigentes • Obstáculos normativos que imponen restricciones sobre el tipo de solución y momento de implementación • Conflicto entre requisitos jurisdiccionales o institucionales • Corrupción • Falta de voluntad política • Falta de planificación estratégica o enfoque fragmentado de la planificación • Falta de visibilidad y promoción de las SbN en la legislación y las políticas • Falta de normativa institucional e instrumentos de mercado	☐ ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ ☒ ☐ ☐ ☐

Fuente: Adaptado de los obstáculos identificados en el marco de la serie de talleres intersectoriales sobre SbN que DHI llevó a cabo por encargo de la CCA en la primavera de 2022.

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 expuestos en este documento. A continuación, se enumeran los principales materiales de referencia que podrán brindar al lector más información y orientación técnica.

- *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide* [Guía de implementación de soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia de las autopistas costeras], (US FHWA, 2019). 
- *Practical Guide to Implementing Green-Gray Infrastructure* [Guía práctica para implementar infraestructura verde-gris] (Green-Gray CP, 2020). 
- *Increasing Infrastructure Resilience with Nature-Based Solutions (NBS): A 12-Step Technical Guidance Document for Project Developers* [Mejorando la resiliencia de la infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN): guía técnica de doce pasos para desarrolladores de proyectos] (BID, 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.*, 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] (Vouk *et al.*, 2021) 

2 Opciones de reconversión mediante SbN

Este apartado describe la intención de realizar una reconversión y caracteriza brevemente la amplia diversidad de opciones de soluciones basadas en la naturaleza que pueden adoptarse para satisfacer las necesidades y limitaciones específicas de cada proyecto de reconversión. Además, se ofrece una comparación de costos detallada para cada categoría general de SbN, así como estudios de caso que aportan ejemplos reales de proyectos que aplican estas soluciones.

2.1 Espectro de SbN

Al hablar de reconversión, siempre conviene tener en cuenta que todo tipo de infraestructuras de protección costera, al igual que los proyectos de reconversión, forman parte de un espectro, al que se denomina “del gris al verde” (véase la gráfica 1). Las opciones de MRI costeras “grises” van desde diques o malecones hasta compuertas de marea y rompeolas de hormigón, por mencionar algunos ejemplos. Las SbN (incluida la reconversión de infraestructura en pie) pueden ubicarse en todo el espectro, desde “gris” hasta “verde”. Las soluciones más naturales —es decir, verdes— no dependen de elementos grises, suelen ser dinámicas y proporcionan numerosos cobeneficios, e incluyen SbN como playas, humedales y arrecifes de ostras. Las SbN pueden introducir elementos grises para ayudar a mitigar diversas limitaciones del proyecto o del sitio, o un proyecto de reconversión puede conservar algunos de los elementos grises en pie. Estas soluciones híbridas (por ejemplo, sistemas de playas y promontorios, o marismas con escolleras) se encuentran en algún punto entre los dos extremos del espectro “del gris al verde”.

Los proyectos de reconversión de SbN se enmarcarán, por lo tanto, en las tres estrategias siguientes:

1. **Retorno absoluto a procesos naturales:** se desmantela la infraestructura gris en pie y se sustituye por una SbN (sin incluir soluciones híbridas).
2. **Retorno parcial a procesos naturales con la incorporación de elementos híbridos nuevos:** la infraestructura en pie se retira o moderniza y se incorporan SbN tanto nuevas como híbridas.
3. **Retorno parcial a los procesos naturales que da por resultado sistemas híbridos:** una SbN se aplica, se implementa frente a, o se construye en combinación con, infraestructura gris en pie (que permanece en su lugar) y crea un elemento híbrido.

En los apartados siguientes se ofrecen detalles sobre las diferentes opciones de SbN para proyectos de reconversión, que pueden adoptarse en el marco de cualquiera de las tres estrategias de reconversión señaladas. Las soluciones híbridas parten de los conocimientos y la información expuestos en los apartados relativos a otras opciones de SbN y se tratan en un apartado específico.

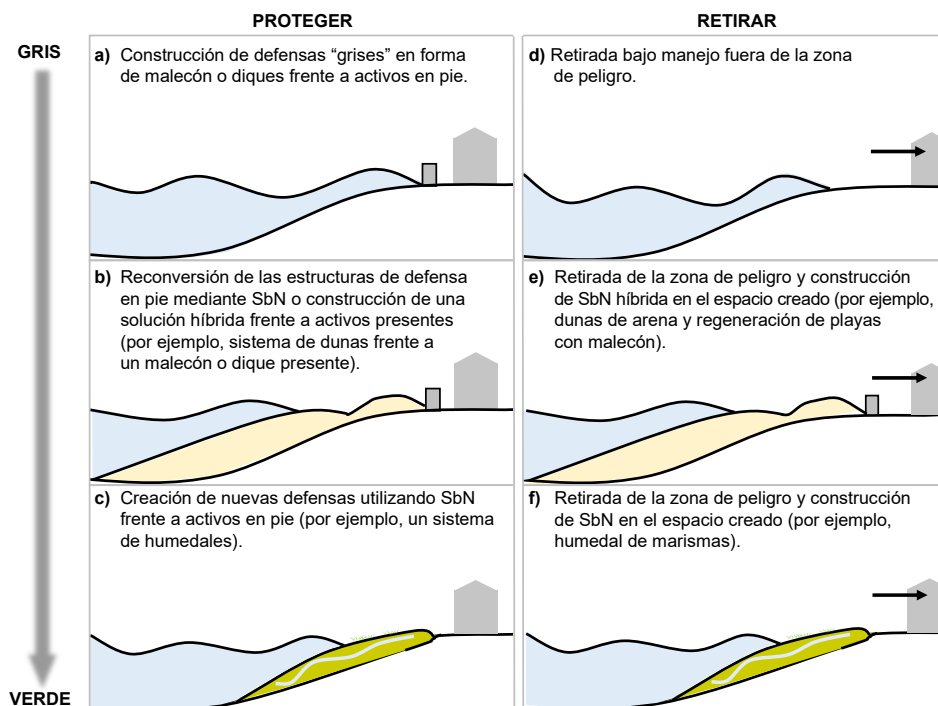
2.2 Estrategias de manejo de riesgos costeros

El marco “Proteger, adaptar, retirar o evitar (PARE)” se utiliza con frecuencia para caracterizar el manejo y la adaptación ante amenazas costeras (por ejemplo, Doberstein *et al.*, 2019). Las estrategias convencionales y las que integran SbN se ajustan a las estrategias de “proteger” y “retirar”, ya sea como opciones híbridas o bien independientes, ejemplos de las cuales se proporcionan en la gráfica 1. Las estrategias de “evitar” buscan impedir la urbanización en zonas peligrosas, mientras que las de “adaptar” ajustan el uso del suelo y las edificaciones presentes para mitigar los efectos de los peligros. Aunque estas dos estrategias son opciones valiosas para el manejo de riesgos, no tienen cabida en el contexto de reconversión de infraestructura de MRI en pie utilizando soluciones basadas en la naturaleza.

Para considerarlas eficaces, las SbN deben identificarse, crearse e implementarse como parte de una estrategia amplia de MRI, siguiendo principios basados en sistemas (De Viers *et al.*, 2021), que acepten el hecho de que algunas inundaciones son inevitables, especialmente en un futuro incierto, y cuyo objetivo sea manejar los riesgos (Sayers *et al.*, 2013). En ese sentido, habrán de estudiarse diferentes enfoques a escala sistémica e instrumentarse de forma conjunta distintas estrategias, acordes con las condiciones específicas del lugar.

Las estrategias destinadas a “proteger” implican la adopción de medidas para preservar el uso del suelo vigente y las propiedades o infraestructura en pie frente a inundaciones y erosión. Las estrategias de “protección” se aplican a menudo para defender tierras o infraestructura con un valor económico o cultural significativo o de gran importancia, cuya reubicación fuera de la zona de riesgo de inundación resultaría inviable. Entre las estrategias específicas orientadas a “proteger” se incluyen métodos consistentes en “extender la línea” y “mantener la línea” (véase, por ejemplo, Simm, 2021). La estrategia de “extender la línea” mantiene los activos construidos existentes en el mismo lugar y se construyen nuevos elementos de defensa, o se mejoran los que ya están en pie, hacia el mar frente a los activos amenazados (gráfica 1, a-c). Existe la posibilidad de incorporar proyectos de reconversión que utilizan SbN a la estrategia de “extender la línea”, mediante el establecimiento de sistemas naturales como marismas o playas frente a la infraestructura gris actual. Las limitaciones en cuanto a espacio y propiedad suelen restringir la viabilidad de las opciones de SbN para “extender la línea”. Por otro lado, “mantener la línea” también puede integrarse en las estrategias de “protección”, consistentes en mejorar el MRI en curso sin alterar la línea costera, lo que podría implicar, por ejemplo, elevar la altura de las estructuras o restaurar el hábitat ya degradado.

Gráfica 1. Estrategias de manejo de costas con acciones de *proteger* y *retirar* en todo el espectro de SbN



Las opciones que implican “retirar” (gráfica 1, d-f) —también denominadas *de retroceso* o *relineamiento controlado*— consisten en abandonar los activos construidos en pie —incluida la infraestructura de MRI— y el uso del suelo en zonas peligrosas, reubicar los activos fuera de ellas y alejar aún más de la costa la infraestructura de defensa. La retirada puede aplicarse cuando no existen medios para mantener otras estrategias, o cuando la infraestructura puede reubicarse (es decir, se dispone de espacio suficiente para hacerlo y esta tarea resulta viable en términos económicos, o cuando el uso del suelo carece de valor económico o cultural significativo). La reubicación de la infraestructura gris en pie también resulta útil para reducir la incidencia de la compresión del litoral y la consiguiente pérdida de hábitats intermareales frente a las defensas marítimas por efecto de la erosión. En muchos casos, basta la retirada por sí sola (sin intervenciones adicionales) para mitigar los riesgos costeros; esta estrategia puede considerarse una SbN, ya que permite la recuperación del hábitat de la planicie aluvial, y ha de considerarse en forma proactiva (Saunders-Hastings *et al.*, 2020) (gráfica 1, d). Las estrategias de retirada facilitan la implementación de procesos de reconversión que utilizan SbN, pues crean espacio adicional en dirección hacia el mar para su implementación, más allá de los activos construidos. El espacio disponible adecuado para reubicar la infraestructura en pie lejos de la zona de peligro costero suele ser limitado y costoso; sin embargo, ello puede compensarse con el costo de capital equivalente de la infraestructura de defensa costera que se habría generado con otras estrategias.

2.3 Intención de reconversión

La reconversión implica sustituir, modificar o mejorar la infraestructura en pie con elementos y sistemas nuevos. Las personas responsables de la toma de decisiones pueden optar por reconvertir con SbN los sistemas de infraestructura gris en pie, obsoletos o de bajo rendimiento —o sus componentes— en lugar de seguir creando infraestructura gris de protección. La reconversión con

SbN, por lo tanto, ofrece una excelente oportunidad para mejorar el desempeño o la integridad de los sistemas de MRI, al tiempo que proporciona numerosos beneficios adicionales. Los cobeneficios ambientales, sociales y económicos que brindan las SbN constituyen en sí importantes incentivos para la reconversión de infraestructura de MRI en pie mediante SbN. Los beneficios adicionales se analizan en detalle en el apartado 1.2.

Las oportunidades para reconvertir infraestructura gris de MRI en pie utilizando SbN están presentes a lo largo del ciclo de vida de los activos de defensa costera, incluso cuando se consideran opciones de construcción nueva, o bien de reparación, modificación y reemplazo de elementos grises presentes. La reconversión con SbN cobra especial relevancia cuando el sistema en pie está llegando al final de su vida útil o ya no ofrece la mitigación adecuada de los riesgos a los que se enfrenta, o bien como medida preventiva ante el aumento de amenazas futuras. En el apartado 4.6 se ofrece un análisis más detallado sobre el momento oportuno para llevar a cabo un proyecto de reconversión.

En los siguientes apartados se describen posibles opciones de SbN para la reconversión de sistemas de MRI en pie. Debe tenerse en cuenta que tales procesos de reconversión pueden requerir una combinación de elementos tanto grises como blandos (conocidos también con el nombre de *híbridos*, apartado 2.10), por lo que se sitúan en el espectro gris-verde (véase, por ejemplo, la gráfica 1). Los arrecifes de coral artificiales, a modo de ejemplo, pueden construirse sobre cimientos de hormigón, y en un sistema de playas pueden incorporarse espigones o barreras de arena. Cada proyecto requerirá una solución única, que se situará en una parte diferente del espectro gris-verde y dentro del paradigma de “proteger, adaptar, retirar y evitar”. Con todo, **la intención de llevar a cabo una reconversión debe orientarse a que los sistemas de MRI se acerquen al extremo verde del espectro de SbN, mediante mejoras progresivas del sistema en su conjunto, aplicando una estrategia lo más natural posible, siempre que sea razonable y técnicamente viable, y al mismo tiempo maximizando los cobeneficios.**

2.4 Descripción general de las opciones de reconversión

Se dispone de una serie de opciones de SbN que pueden utilizarse para reconvertir infraestructura de MRI en pie y mitigar los riesgos en las costas. En este apartado se ofrece una visión general de los diferentes tipos de SbN disponibles para la reconversión de infraestructura presente. Teniendo en cuenta la gran variedad de opciones de reconversión (en función de la ubicación, el contexto costero y los atributos del hábitat y elementos grises presentes), este apartado ofrece una visión general de las posibles opciones que pueden adaptarse para satisfacer las necesidades de cada proyecto. Para obtener orientación detallada sobre aspectos de diseño y más estudios de caso, consúltese Suedel *et al.* (2021).

A fin de satisfacer con mayor efectividad las necesidades de un proyecto, es posible combinar e implementar varias SbN en forma conjunta. Por ejemplo, incluir componentes “grises” (como espigones o escolleras) o construirse como parte de sistemas de MRI en pie que incluyan estrategias convencionales de ingeniería costera cercanas (como malecones y diques), con lo que se crean sistemas híbridos (apartado 2.10). Además, las opciones de SbN pueden aplicarse junto con diversas estrategias de manejo de riesgos, como la de “retirar” (véase el apartado 2.2). Los proyectos pueden variar en escala, desde pequeños desarrollos privados hasta grandes obras a escala vecinal, local o incluso regional. La selección de las opciones adecuadas de reconversión con SBN debe tener en cuenta las necesidades propias de cada proyecto, entre las que se incluyen consideraciones administrativas (por ejemplo, restricciones financieras) y técnicas (procesos costeros, entre otras), temas abordados con más detalle en los apartados 4 y 5, respectivamente.

Las opciones de SbN utilizables para reconversión pueden dividirse en las seis categorías generales siguientes:

- playas y dunas;
- humedales (incluidos marismas, planicies intermareales y manglares);
- islas;
- vegetación costera terrestre;
- elementos sumergidos (incluidos arrecifes, bosques de kelp y vegetación sumergida), y
- elementos o sistemas híbridos.

Los beneficios de MRI que cada una de las seis opciones generales de SbN proporciona se resumen de forma breve en la gráfica 2. Cada proyecto de SbN será diferente, y los beneficios que la solución proporciona serán específicos de cada lugar. Por lo tanto, la gráfica 2 pretende mostrar —a grandes rasgos— los beneficios asociados a cada tipo de reconversión con soluciones basadas en la naturaleza. También existe la posibilidad de implementar en paralelo diferentes tipos de SbN —por ejemplo, islas con marismas (Gailani *et al.*, 2021)—, lo que maximizará los beneficios de los diversos tipos de estas soluciones.

Gráfica 2. Resumen de los beneficios derivados del manejo de riesgos por inundación que diferentes opciones de reconversión ofrecen

						
Playas y dunas	Humedales y planicies intermareales	Islas	Vegetación terrestre	Elementos sumergidos	Elementos híbridos	
Reducción de los niveles máximos de aguas estancadas producto de las crecidas						
Reducción de los efectos provocados por el oleaje (por ejemplo, el desbordamiento)						
Disminución de la velocidad o desviación de las crecidas						
Inundaciones de menor duración						
Mejoría en desempeño residual tras eventos de inundación						
Resiliencia o medidas de contingencia ante fallo de medidas de defensa de MRI						
Protección frente a la erosión						
Aumento del aporte o la retención de sedimentos						

LEYENDA



Beneficio no proporcionado



Beneficio a veces proporcionado, dependiendo de las especificaciones del diseño



Beneficio proporcionado

La mayoría de las posibles opciones de SbN contribuyen a mitigar los impactos que entraña el propio MRI al atenuar o transformar las olas, las inundaciones, las corrientes y las marejadas ciclónicas. La atenuación del oleaje consiste en reducir la altura y la energía de las olas; este fenómeno tiene lugar como resultado de la fricción generada cuando éstas pasan por encima del fondo marino y entre la

vegetación. Al reducirse la altura y la energía del oleaje, disminuye la posibilidad de erosión y de inundaciones provocadas por las olas (es decir, desbordamientos). Las SbN atenúan la crecida de las aguas al facilitar el almacenamiento y mejorar el drenaje, reduciendo la altura y la duración de las inundaciones. La atenuación de las marejadas ciclónicas consiste en reducir su magnitud mediante la disipación de energía a grandes distancias. Dada la variedad de sistemas híbridos dentro del espectro gris-verde, muchos de los beneficios señalados en la gráfica 2 se han indicado como posibles, pero no seguros. Las soluciones con elementos o sistemas híbridos que se encuentran en el extremo verde del espectro ofrecen tantos beneficios como una auténtica solución basada en la naturaleza.

Las seis opciones de SbN para proyectos de reconversión se describen en los apartados 2.4 a 2.10 (con un análisis de los posibles cobeneficios). En el apartado 2.11 se ofrece una comparación cualitativa de los costos de diseño, construcción y mantenimiento de cada opción.

2.5 Playas y dunas

Los proyectos de reconversión con uso de SbN que entrañan playas y dunas de arena se centran en preservar y mejorar estos paisajes en pie —o en crear sistemas nuevos—, ya sea introduciendo sedimentos artificialmente, estimulando procesos de deposición natural o combinando ambas estrategias. Las playas y dunas disipan la energía de las olas, por lo que protegen frente a las inundaciones y la erosión que el oleaje provoca (Lodder *et al.*, 2021). Además de los beneficios directos de mitigar los riesgos costeros, también aportan una serie de cobeneficios ambientales, sociales y económicos. Si bien los cobeneficios que generan los proyectos de SbN relacionados con playas o dunas serán específicos de cada proyecto, en el recuadro 3 se describen aquellos normalmente asociados a este tipo de intervención. El documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* contiene una lista más completa de los posibles cobeneficios asociados con las SbN, y en el documento *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos* se ofrecen más detalles sobre métodos de monitoreo y parámetros de desempeño para soluciones en playas y sistemas de dunas.

Recuadro 3. Ejemplos de cobeneficios típicos aportados por SbN que entrañan playas y dunas

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad de hábitats terrestres y acuáticos ✓ Áreas de refugio y alimentación ✓ Recirculación del agua 	✓ Espacios más amplios para esparcimiento y reunión ✓ Estética mejorada 	✓ Mayor turismo ✓ Menores costos de infraestructura adyacente (pérdidas por inundaciones) ✓ Oportunidades de ecoturismo 

La regeneración de playas y los sistemas de dunas de arena se abordan en detalle en los apartados 2.5.1 y 2.5.2, respectivamente, y en el recuadro 4 se resumen los aspectos más destacados al respecto.

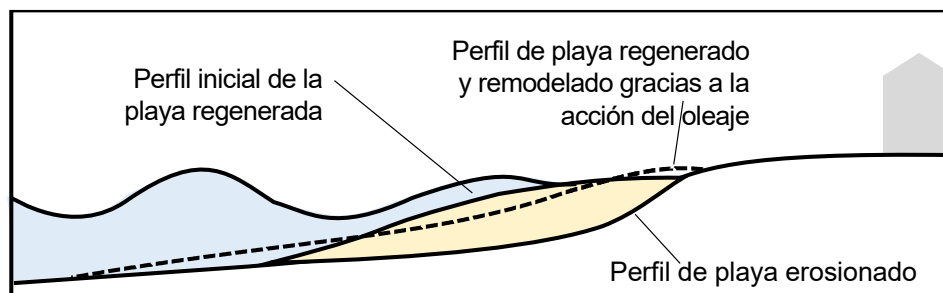
Recuadro 4. Aspectos destacados de la regeneración de playas y de los sistemas de dunas de arena

	Las dunas de arena y la regeneración de playas son sistemas dinámicos y en constante cambio que proporcionan protección frente a la erosión y las inundaciones, además de dar lugar a nuevos hábitats y ofrecer mayores beneficios recreativos y turísticos.
	Las SbN que comprenden dunas de arena y regeneración de playas se logran mediante la deposición de sedimentos, la plantación de vegetación nativa y la eliminación de especies invasoras.
	Es importante seleccionar adecuadamente las especies vegetales para sembrar en las dunas de arena y evitar causar un impacto negativo en los hábitats en pie con medidas de regeneración.
	Se requiere una playa lo suficientemente ancha para el transporte de sedimentos y un espacio de expansión que permita el crecimiento de las dunas. Ya se dispone de importantes orientaciones técnicas de diseño al respecto.
	Es importante entender la dinámica costera local. Cabe esperar un manejo adaptativo.
	Se requerirán estrictos controles para el acceso público, a fin de evitar daños a la vegetación y estructura de las dunas por pisoteo, y así mantener el hábitat y los sistemas de dunas.

2.5.1 Regeneración de playas

La regeneración de playas consiste en añadir sedimentos —que pueden incluir arena, grava, guijarros o cantos rodados— a las propias playas, zonas de anteplaya, márgenes de esteros o deltas exteriores (véase la gráfica 3), medida que se ha convertido en una de las preferidas para mitigar los riesgos costeros en América del Norte. La regeneración de playas se ha aplicado en varias ocasiones, siendo uno de los ejemplos más notorios el de Miami, Estados Unidos, donde el proyecto de control de la erosión de las playas del condado de Miami-Dade está en marcha desde 1975 (Condado de Miami-Dade, 2010). En Dean (2002) y Dean y Dalrymple (2010) se pueden encontrar orientaciones detalladas sobre los métodos y técnicas de regeneración de playas, cuyo objetivo es reequilibrar el balance de sedimentos, favoreciendo la acumulación por encima de la erosión —a menudo en un intento por compensar la afectación provocada por actividades cercanas que ya antes han limitado el suministro de sedimentos— y aumentando la estabilidad del sistema (Lodder *et al.*, 2021). Los sedimentos se aplican de forma directa al sistema de playas o dunas de arena —en una sola intención o mediante un proceso por etapas— o se adopta una estrategia de “motor de arena”, en la que los sedimentos depositados se colocan de manera que vayan transportándose a lo largo de la playa por el efecto de la deriva litoral (por ejemplo, de Schipper *et al.*, 2016). Aunque la erosión puede seguir produciéndose —sobre todo en zonas con déficit de sedimentos—, la playa suele ensancharse y elevarse, lo que la amortigua y la protege de las fuerzas erosivas. Independientemente de la variedad de sustratos —arena, rocas o cantos rodados— la regeneración resulta benéfica para todo tipo de playas (Lodder *et al.*, 2021).

Gráfica 3. Boceto conceptual de un proceso de regeneración de playa para mitigar la erosión



El destino de los sedimentos depositados dependerá en gran medida del lugar y, para estimar los balances de arena y poder predecir el comportamiento de un proyecto a largo plazo, es necesario comprender la hidrodinámica y el régimen de transporte de sedimentos de la zona (Wilmink *et al.*, 2017). El tipo, el tamaño y la distribución del material sedimentario utilizado en trabajos de regeneración revisten fundamental importancia también y variarán de un proyecto a otro. Cuando se emplean materiales de dimensiones inadecuadas, la erosión se incrementa, afecta de forma negativa los valores ecológicos del lugar y repercute en el uso público. Por ejemplo, los trabajos de regeneración de playa en la península de Hel, en Polonia, resultaron infructuosos pues el material de grano fino dragado de una bahía cercana y depositado en la playa acabó por erosionarse (Hanley *et al.*, 2014). En este caso, un material más apropiado habría sido arena gruesa proveniente de mar abierto, similar a las arenas nativas de la playa (Hanley *et al.*, 2014). No obstante, aun cuando se utilice material de tamaño adecuado, debe preverse la reposición de los sedimentos colocados (de Schipper *et al.*, 2016) y tenerse en cuenta en la planificación (para garantizar la disponibilidad de recursos suficientes, entre otros aspectos) y el manejo adaptativo del proyecto. El estudio de caso 1 ofrece un ejemplo de un proyecto exitoso de regeneración de playas en Cancún, México, en el que se siguió un enfoque de manejo adaptativo después de la construcción. En el apartado 5.5 encontrará más información sobre el manejo adaptativo.

La acreción o acumulación de sedimentos o un mayor tiempo de residencia pueden favorecerse mediante la aplicación de enfoques híbridos, utilizando elementos construidos como espigones, promontorios sumergidos o que emergen y barreras de arena, con miras a incrementar la acumulación de sedimentos mediante modificaciones de la hidrodinámica cercana a la costa y, por ende, de los patrones de transporte de sedimentos. Las estrategias blandas para la deposición y acumulación de sedimentos, como la plantación de vegetación y el mejoramiento de los lechos o praderas de pasto marino, también ayudan a reducir la erosión y favorecen la acreción, y los proyectos de regeneración de playas que las incorporan han demostrado ser más duraderos y exitosos por cuanto a acumular arena y reducir su erosión (Chen *et al.*, 2022).

Asimismo, es fundamental tener en cuenta el impacto ambiental a la hora de planificar proyectos de regeneración de playas. La extracción de sedimentos de relleno en el lugar de préstamo supone una perturbación para la fauna y los hábitats de la zona, de la misma manera que los hábitats y la flora y fauna presentes en la playa objeto de regeneración se ven afectados (Peterson y Bishop, 2005). Por ejemplo, la regeneración de playas en zonas de anidación de tortugas afecta el éxito de la anidación misma y la cría, un hecho que guarda relación con cambios en el tamaño de grano y el color de los sedimentos (Brock *et al.*, 2009). Los denominados “megaproyectos de regeneración” suelen estar motivados por elementos de concesión o compromiso por cuanto a posibles consecuencias entre el tiempo de recuperación del sistema tras una sola intervención de gran envergadura en comparación con varias intervenciones frecuentes (Lodder *et al.*, 2021).

Teniendo en cuenta la popularidad mundial de la regeneración de playas como método de protección de las costas, se dispone de importantes directrices de diseño técnico, entre las que destacan los documentos *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.*, 2021) o *Coastal Engineering Manual* [Manual de ingeniería costera] (USACE, 2002). Asimismo, a fin de garantizar el éxito de un proyecto de regeneración de playas, deben tenerse en cuenta las limitaciones técnicas propias de cada lugar, entre las que se incluyen las siguientes (Lodder *et al.*, 2021):

- disponibilidad de sedimentos;
- tamaño y gradación de los sedimentos;
- pendiente de la playa;
- altura del perfil;
- volumen de sedimentos;
- anchura de la playa;
- estructuras de control (como espigones);
- tipos de hábitat, y
- régimen del oleaje.

Como se describe en el apartado 5.1, algunos sistemas quedarán fuera de las directrices técnicas estándar y los límites de las ecuaciones empíricas, por lo que será necesario recurrir a modelos numéricos o físicos, o a proyectos piloto para orientar, perfeccionar o probar el diseño (Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2016). En el caso de los proyectos de regeneración de playas, se suelen utilizar modelos numéricos de geomorfología como LITPACK, GenCADE, XBeach, XBeach-G, MIKE 21/3 ST/SM (transporte de sedimentos y morfología de la línea costera, por sus siglas en inglés) y Delft3D para determinar la estabilidad de los rellenos de playas durante eventos de tormentas puntuales y, a largo plazo, evaluar el impacto de las actividades humanas (como el dragado) y dar fundamento a la posible necesidad de futuras obras de mantenimiento. Consúltase el apartado 5 para obtener más información sobre consideraciones de diseño.

Estudio de caso 1. Regeneración de playa en Cancún

Regeneración de playa en Cancún:

Exitosa estabilización de playa tras erosión

Cancún, Quintana Roo,
México

Las playas de Cancún son propensas a la erosión por la acción de las olas, un fenómeno que se ha agravado en las últimas décadas como consecuencia de una serie de huracanes y tormentas. A principios de la década de 2000, la erosión se vio exacerbada por la intensa construcción de hoteles y la consiguiente eliminación de elementos naturales, como manglares y dunas a lo largo de la costa, lo que agravó aún más la pérdida de sedimentos. En vista de la importancia económica del turismo en la zona, se han realizado esfuerzos por restablecer las playas y protegerlas de la erosión.

La regeneración de playas de Cancún se llevó a cabo por primera vez en 2006, lo que implicó la colocación de 2.7 millones de m³ de arena procedente de dos bancos de arena cercanos, con un costo de 19 millones de dólares estadounidenses [\$EU] (Martell *et al.*, 2020). Este primer intento estuvo seguido poco después por el huracán *Dean* en 2007, que dañó y erosionó de manera drástica la playa, lo que dio como resultado la eliminación de gran parte de la arena depositada el año anterior y la creación de escarpes de playa muy pronunciados.

Entre 2006 y 2009 se llevaron a cabo tareas de monitoreo encaminadas a comprender las dinámicas de las corrientes, el transporte y la acumulación a lo largo de la costa. Al término de dichos estudios, en 2010 se completó una segunda operación de reposición de arena teniendo en cuenta estos conocimientos. La segunda intervención consistió en colocar 5.2 millones de m³ de sedimentos más compatibles en la playa e instalar un espigón y un rompeolas para evitar el transporte de arena hacia el mar (Martell *et al.*, 2020).

Después del segundo intento de regeneración en 2010, el proyecto pareció no tener éxito al producirse una erosión significativa, que redujo el ancho de la playa y de nuevo formó escarpes muy pronunciados. Sin embargo, para 2013, estos escarpes se modificaron de forma natural, en respuesta al oleaje y las mareas, y formaron una suave pendiente con un ancho de playa estable de 30 metros. Si bien es cierto que el sistema de la playa se ha mantenido estable y, desde 2020, no ha sido necesario realizar más trabajos de relleno, la zona sigue siendo vulnerable a los huracanes, y es de esperar que, en un futuro, sea necesario continuar con tareas de regeneración si se producen tormentas de gran intensidad (Martell *et al.*, 2020).

Gráfica 4. Imágenes satelitales de la playa en 2009, antes de las tareas de regeneración (izquierda), y en 2020, diez años después de concluida la intervención (derecha)



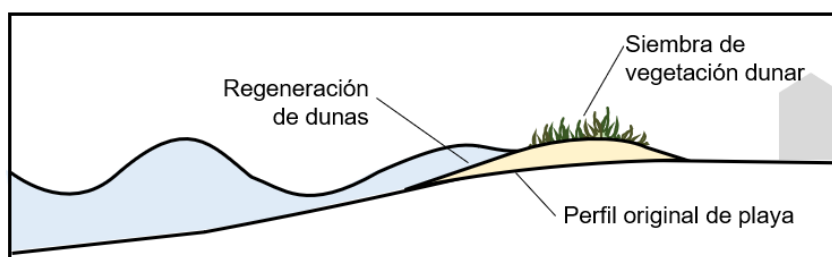
Fuente: Google Earth, 2022.

2.5.2 Dunas de arena

Las dunas de arena son sistemas dinámicos que subsisten por encima de los límites de la acción regular de las olas. Las dunas pueden aumentar o disminuir de tamaño, cambiar de forma, experimentar transformaciones estacionales, regenerarse de forma natural o artificial y adaptarse al cambio climático. Estos paisajes, además, proporcionan una barrera física ante las inundaciones y disipan la energía de las olas, al tiempo que contribuyen a reducir la erosión. Las dunas se forman por sedimentos impulsados por el viento y las olas, que a menudo quedan atrapados por la vegetación u otros elementos rugosos presentes en ellas. Las dunas de arena requieren un suministro adecuado de sedimentos y una velocidad suficiente del viento o de las olas para impulsarlos y transportarlos hasta la cresta (Lodder *et al.*, 2021).

Por lo general, las dunas se restauran o se crean mediante una combinación de aporte de sedimentos, plantación de vegetación nativa y eliminación de especies invasoras para aumentar su estabilidad y favorecer la acumulación de sedimentos (véase la gráfica 5). Restringir el acceso peatonal es otra medida que puede ayudar a prevenir el aplanamiento y la pérdida de la estructura y la vegetación de las dunas (véase, por ejemplo, Šile *et al.*, 2017).

Gráfica 5. Boceto conceptual de un establecimiento dunar para aumentar la protección frente a inundaciones



La creación y restauración de dunas requerirá diferentes enfoques técnicos en función de las necesidades específicas de cada lugar. Si se diseñan con el debido cuidado, con el tiempo las dunas podrán acumularse de forma natural, y proporcionar una defensa costera duradera y adaptable a las condiciones naturales que requiera poco mantenimiento adicional (véase, por ejemplo, Maun y Fahselt, 2009). Es importante consultar a un equipo multidisciplinario de personas con conocimientos especializados y familiarizadas con el entorno local (véanse los apartados 4 y 5), y aplicar un enfoque de manejo adaptativo (véase el apartado 5.5). En el estudio de caso 2 se ejemplifica un proyecto de restauración de dunas con el que se consiguió reducir los impactos relacionados con las tormentas. Los sistemas de dunas híbridos son también una opción; por ejemplo, se puede establecer un sistema de dunas sobre un malecón o dique en pie, que queda enterrado bajo el nuevo sistema de dunas (véase, por ejemplo, Van Loon-Steensma *et al.*, 2014). En el apartado 2.10 se examinan más a fondo los elementos o sistemas híbridos.

Las directrices internacionales del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ofrecen consideraciones técnicas detalladas sobre el diseño de dunas de arena (Lodder *et al.*, 2021). A continuación se recoge un resumen de los factores generales a tener en cuenta en el diseño de sistemas de dunas de arena (Lodder *et al.*, 2021), a saber:

- tipo de vegetación, eliminación de especies no nativas, sucesión y necesidades relacionadas con la siembra de vegetación, riego, fertilización y pulverización salina adecuada;
- playa de arena con suficiente amplitud para el transporte eólico de sedimentos (por encima de los 100 m del nivel medio del mar al pie de la duna);
- espacio de expansión para permitir el crecimiento y la evolución de las dunas, y

- efectos de la energía de las olas y el viento en el transporte, la deposición y la erosión de los sedimentos.

Estudio de caso 2. Restauración de dunas de arena en Nueva Jersey

Restauración de dunas de arena en South Cape May

Cape May, Nueva Jersey,
Estados Unidos

Meadows:

Por una mayor resiliencia ante las tormentas mediante la restauración de dunas de arena

Cape May es una pequeña comunidad de Nueva Jersey, Estados Unidos, propensa a sufrir daños por inundaciones y erosión costera provocados por tormentas y huracanes. A raíz de haber sufrido una serie de tormentas a finales de la década de 1990, los gobiernos locales mantuvieron conversaciones para encontrar posibles soluciones que redujeran el riesgo de inundaciones y los daños asociados.

En 2007 se puso en marcha una combinación de estrategias de SbN en la reserva de South Cape May Meadows, que incluía la restauración de dunas de arena y la regeneración de playas para proteger la ciudad y mejorar el hábitat costero. El proyecto requirió 1.4 millones de m³ de arena para restaurar un sistema de dunas de arena de 1.6 km de largo y 5 m de alto, con un costo total de \$EU15 millones (Naturally Resilient Communities, 2022a).

El proyecto fue un éxito, ya que sirvió de protección ante el huracán *Sandy* en 2012, durante el cual el sistema restaurado de dunas y playas evitó de forma eficaz la inundación de la comunidad. El valor promedio de los reclamos por daños de inundación en Cape May tras las tormentas ascendió a cerca de \$EU144,000 antes de completarse el proyecto de SbN (Naturally Resilient Communities, 2022a). Una vez concluido el sistema de dunas y playas y tras el huracán *Sandy*, las reclamaciones por daños causados por inundaciones se redujeron a casi \$EU4,000. Se estima que, en los próximos 50 años, el proyecto de SbN permitirá ahorrar \$EU9.6 millones, gracias a la reducción de las reclamaciones por daños causados por inundaciones (Naturally Resilient Communities, 2022a).

Además de los beneficios que el proyecto ha aportado al MRI, también se han observado cobeneficios adicionales en un aumento en el número de aves migratorias que utilizan la zona para alimentarse y descansar (The Nature Conservancy, 2022). Consúltase información detallada en Naturally Resilient Communities (2022a), en: nrcsolutions.org/south-cape-may-meadows-cape-may-point-new-jersey/.

Gráfica 6. Proyecto de playa y dunas concluido en South Cape May Meadows



Fuente: The Nature Conservancy, 2022.

Estas consideraciones de diseño son importantes para el éxito de un proyecto, ya que algunos proyectos de creación de dunas han sufrido retiradas y erosión. En un estudio de varios proyectos de construcción de dunas, Morris *et al.* (2018) descubrieron que las dunas erigidas cerca del mar —siguiendo una estrategia de “proteger”, por ejemplo— con frecuencia se erosionaban, mientras que las situadas más hacia tierra adentro —como parte de una estrategia de “retirar”, por ejemplo— crecían, incluso durante las tormentas. Las dunas pueden recuperarse y crecer de forma natural (véase, por citar un ejemplo, Maun y Fahselt, 2009), y aunque algunos proyectos del estudio se erosionaron al principio, otros se recuperaron y crecieron después de la erosión inicial (Morris *et al.*, 2018).

2.6 Humedales

Los humedales costeros comprenden marismas salobres, de agua dulce y salitres; planicies intermareales fangosas y arenosas, y manglares. Estos ecosistemas de humedales costeros proporcionan una gran cantidad de servicios ambientales y contribuyen a mitigar las amenazas costeras, como marejadas ciclónicas, rebase o desbordamiento del oleaje, inundaciones y erosión. Los humedales atenúan las inundaciones mediante el almacenamiento y drenaje de agua de las crecidas, al ofrecer una zona de inundación. De la misma manera, al atenuar las olas, la vegetación semisumergida de los humedales —como los manglares— cumple una función crucial en la reducción de la erosión y las inundaciones. La vegetación de los humedales mitiga aún más la erosión al estabilizar la línea costera y, a la vez, favorecer la acumulación de sedimentos (Piercy *et al.*, 2021). Además de los beneficios por cuanto a MRI, los humedales proporcionan numerosos cobeneficios, de los cuales se enumeran varios en el Recuadro 5. Sin embargo, los cobeneficios deben evaluarse en función de las particularidades de cada proyecto. Véanse los documentos de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, para conocer otros posibles cobeneficios, y *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos*, si se desea consultar propuestas metodológicas de monitoreo y parámetros de desempeño para SbN en humedales.

Recuadro 5. Ejemplos de cobeneficios típicos proporcionados por SbN que entrañan humedales

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad del hábitat acuático ✓ Abundancia y diversidad de especies nativas de flora y fauna ✓ Almacenamiento y calidad del agua ✓ Captación y almacenamiento de carbono 	✓ Espacios más amplios para actividades recreativas y de reunión ✓ Estética mejorada 	✓ Aumento del turismo ✓ Reducción de los costos de obras de infraestructura adyacentes (pérdidas por inundaciones) ✓ Oportunidades de ecoturismo 

Las estrategias para implementar SbN con humedales pueden ir desde la conservación de los sistemas en pie hasta la restauración de los sistemas degradados y la creación de nuevos entornos. A menudo se adoptan sistemas híbridos en los que se crean o restauran humedales frente a una solución gris en pie, como un dique o malecón (véase el apartado 2.10).

Al igual que con otros tipos de SbN, es necesario evaluar las consideraciones propias del lugar en el diseño y la selección de una solución adecuada para humedales. Téngase en cuenta la disponibilidad de importantes directrices de diseño para humedales, sobre todo en climas templados. Las Directrices internacionales del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ofrecen una visión general exhaustiva en cuanto a consideraciones técnicas de diseño (Piercy *et al.*, 2021). Entre los factores generales a tener en cuenta se incluyen los siguientes:

- elección de una ubicación adecuada según el problema de que se trate (por ejemplo, humedal tierra adentro sin marea frente a un humedal intermareal [costero]);

- geomorfología específica del lugar: elevación, forma y orden de los arroyos mareales, por ejemplo (véase Odell *et al.*, 2008);
- características de la línea costera y las tormentas;
- factores y procesos ambientales como hidrología, mareas, olas, transporte de sedimentos y tipo de suelo, y
- cobertura y tipo de vegetación, y necesidad de eliminar especies invasoras.

En el apartado 2.6.1 se abordan —brevemente y por separado— las marismas y las planicies intermareales y en el apartado 2.6.2 se tratan los manglares. Los aspectos más destacados en relación con estos sistemas de humedales como SbN se resumen en el Recuadro 6.

Recuadro 6. Aspectos destacados sobre SbN que entrañan humedales

	Los humedales costeros incluyen marismas salobres, de agua dulce y salitrales; planicies intermareales arenosas y fangosas, y manglares. Ofrecen protección contra la erosión y las inundaciones, y proporcionan nuevos hábitats y mejores beneficios recreativos y turísticos, aunque la escala es importante para reducir los riesgos de inundación y garantizar un funcionamiento adecuado del sistema.
	La restauración de humedales se logra propiciando la inundación natural de la tierra (muchas veces mediante la ruptura de diques, escolleras y terraplenes) o elevando las tierras bajas en pie a alturas adecuadas, depositando sedimentos, plantando vegetación nativa y eliminando especies invasoras.
	La salinidad, la hidrología (por ejemplo, el drenaje), el transporte de sedimentos y el tipo de suelo serán factores clave a tener en cuenta para el establecimiento exitoso de la vegetación.
	Por lo general, las marismas salobres se forman en zonas intermareales templadas poco profundas, que tienen poca energía, están protegidas de las olas y cuentan con un suministro continuo de sedimentos. Los manglares habitan en aguas salinas y salobres de las regiones tropicales y subtropicales.
	Es importante comprender la dinámica costera local como factor que permite la acumulación de sedimentos y el crecimiento de la vegetación. Debe preverse un manejo adaptativo.

2.6.1 Marismas y planicies intermareales

Las marismas abundan en las regiones templadas, lo mismo en las costas que en el interior, y pueden ser salobres, de agua dulce o salitrales. Presentes principalmente en la zona intermareal con vegetación, las marismas se componen principalmente de pastos y juncos, y los tipos de vegetación dependen del clima, la salinidad y el drenaje, entre otros factores. Las planicies intermareales, carentes de vegetación, forman parte de estos sistemas adyacentes a las marismas (Piercy *et al.*, 2021). Las marismas salobres contribuyen a atenuar de manera considerable la intensidad de las olas y a estabilizar la línea costera (Shepard *et al.*, 2011; Van Loon-Steensma, 2015). La vegetación semisumergida o totalmente sumergida en las marismas ayuda a atrapar los sedimentos y reducir la energía de las olas, acción que permite estabilizar la orilla (de la costa) y reducir la magnitud y la energía de las olas y, al mismo tiempo, mitigar la erosión y las inundaciones que éstas provocan (véanse, por ejemplo, Barbier *et al.*, 2011, y Duarte *et al.*, 2013).

Las planicies intermareales favorecen la disipación de la energía de las olas y el transporte de sedimentos al reducir la velocidad del agua y promover la deposición de sedimentos (Piercy *et al.*, 2021). Investigaciones recientes sugieren que los sedimentos pueden acumularse en las planicies intermareales a través de procesos biogénicos (Readshaw y Williams, 2022). Los humedales también tienen el potencial de ser autosuficientes y aumentar de elevación a medida que el nivel del mar sube como resultado de la acumulación continua de sedimentos naturales (véase, por ejemplo, Kirwan y Megonigal, 2013).

Las marismas, además, contribuyen a atenuar las inundaciones gracias a su capacidad para almacenar agua y facilitar el drenaje de las crecidas, lo que reduce los tiempos de recuperación tras una inundación o marejada (Piercy *et al.*, 2021). A este respecto, en Estados Unidos se ha observado que las pérdidas económicas relacionadas con las inundaciones provocadas por huracanes de gran intensidad se han reducido en gran medida en las zonas con humedales (Costanza *et al.*, 2008). El estudio de caso 3 ofrece un ejemplo de un proyecto de restauración de marismas concebido para mitigar las inundaciones repetitivas en una región de Oregón.

Estudio de caso 3. Restauración de humedales en Oregón

Proyecto *Southern Flow Corridor* [Corredor de flujo sur] para mitigar los riesgos de inundación y restaurar hábitats:

Bahía de Tillamook,
Oregón, Estados Unidos

Reducir los daños causados por las inundaciones mediante la restauración de humedales

El condado de Tillamook, al oeste de Portland, Oregón, ha sufrido repetidas inundaciones estacionales que dañaron propiedades, tierras de cultivo, autopistas y vías férreas (FEMA, 2021). Se estima que, entre 1996 y 2000, las pérdidas relacionadas con las inundaciones en Tillamook ascendieron a más de \$EU60 millones (FEMA, 2021). Las marejadas ciclónicas invernales, las fuertes lluvias (NOAA, 2021), los incendios y la deforestación agravaron las inundaciones, ya que la descarga fluvial y el contenido de sedimentos de los ríos fueron más altos de lo normal (FEMA, 2021).

Tras repetidas inundaciones estacionales y una tormenta importante en 2006 (que causó inundaciones, erosión y deslaves), en 2007 se emprendió una iniciativa de colaboración entre 24 organismos comunitarios, locales, estatales y federales para restaurar el humedal de marisma y mitigar los efectos de las inundaciones en Tillamook (Shaw y Dundas, 2021).

La construcción comenzó en 2016, después de que se completaran los acuerdos tanto de compra de terrenos y como de servidumbres para adquirir las tierras de cultivo circundantes destinadas a inundación. Esto implicó la eliminación de 8 km de diques y 15 compuertas de marea, las cuales se reemplazaron por otras nuevas situadas más alejadas del mar (Shaw y Dundas, 2021). Esta medida permitió que la zona quedara expuesta a las inundaciones y a las fuerzas de las mareas, favoreciendo el restablecimiento de 180 hectáreas de humedales. Para mejorar aún más el hábitat de los humedales, se reconectaron 18 canales de marea con el río.

Gráfica 7. Marismas restauradas en la bahía de Tillamook



Fuente: Tillamook Estuaries Partnership, 2021

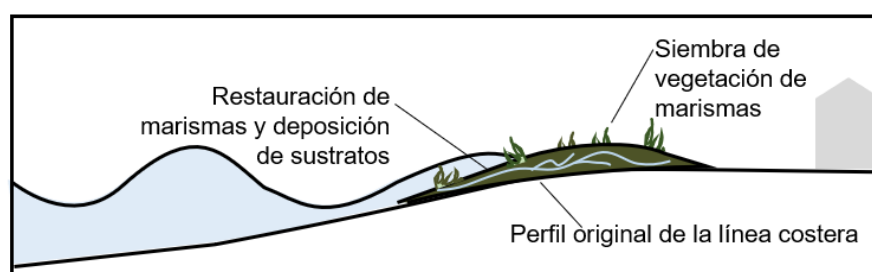
La modelización ha proyectado una reducción significativa de los daños por inundaciones resultante de la restauración de las marismas (Shaw y Dundas, 2021), lo que se traduce en un ahorro estimado de \$EU9.2 millones por daños por inundaciones en los próximos 50 años (NOAA, 2021). Otros cobeneficios del proyecto fueron la creación de 108 puestos de trabajo, la reducción de la necesidad de dragado, el aumento de la calidad del agua y el almacenamiento de 25,000 toneladas de carbono azul (Shaw y Dundas, 2021).

Es posible implementar SbN de marismas y planicies intermareales preservando aquellas que están en pie, restaurando las degradadas o creando nuevas, lo que hace que esta solución sea muy compatible con las actividades de reconversión. Existen muy diversos enfoques para la restauración y creación de humedales, que serán específicos para cada proyecto en particular. Las marismas salobres suelen formarse en zonas intermareales poco profundas, con poca energía, protegidas de las olas y con un

suministro continuo de sedimentos (Jordan y Fröhle, 2022). La restauración y la creación de marismas se consigue normalmente mediante una combinación de las siguientes acciones:

- replantación de vegetación nativa y eliminación de especies invasoras;
- deposición de sedimentos;
- ruptura de diques, escolleras y terraplenes para permitir la inundación de tierras previamente protegidas;
- medidas para reducir la acción de las olas, y
- fomento de la acreción o acumulación de sedimentos (véase, por ejemplo, Van Loon-Steensma y Vellinga, 2013).

Gráfica 8. Boceto conceptual de la restauración de marisma para aumentar la protección frente a inundaciones

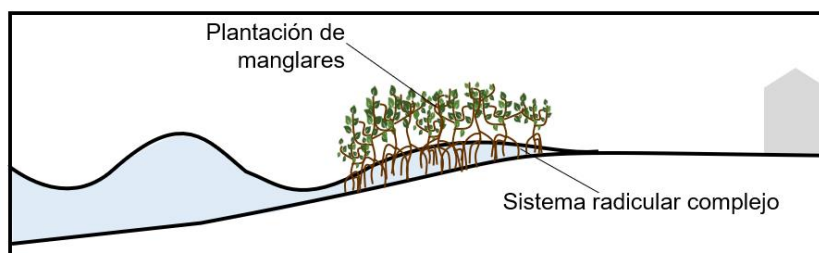


Aunque los sistemas de marismas se utilizan con frecuencia como parte de proyectos de SbN y de restauración en general, los diseños variarán en función del lugar. De ahí que el diseño muchas veces se base en el uso de marismas “análogas”, con características físicas similares a las del lugar de estudio, para orientar el tamaño y la longitud de los canales y las elevaciones y pendientes de la superficie de la marisma. El equipo del proyecto suele construir canales preliminares en la marisma para encauzar los flujos mareales y estimular la evolución natural de los canales (en lugar de intentar predecir la forma y el carácter finales de los canales de la marisma), proceso descrito en detalle por Odell *et al.* (2008). Los proyectos de marismas también tienden a depender en gran medida del manejo adaptativo para hacer frente a las incertidumbres que surgen después de la construcción. A veces se utilizan modelos numéricos para confirmar la hidrodinámica y el transporte de sedimentos, pero rara vez se emplean modelos físicos. Consulte el apartado 5 para obtener más información sobre consideraciones de diseño.

2.6.2 Manglares

Los manglares son arbustos o árboles que habitan en aguas salinas y salobres a lo largo de las costas y estuarios en los trópicos y subtrópicos (véase la gráfica 9), lo que limita su uso en América del Norte a México y el sur de Estados Unidos. En las condiciones adecuadas, se espera que los manglares se recuperen y se adapten al cambio climático (Gedan *et al.*, 2011), lo que los convierte en una opción de defensa costera resiliente, naturalmente persistente y adaptable que crecerá y mantendrá su funcionalidad a lo largo del tiempo con un riesgo en aumento. El sistema de raíces aéreas de los manglares atenúa la energía de las olas y atrapa y estabiliza los sedimentos, lo que reduce la erosión (véase, por ejemplo, Gijsman *et al.*, 2021). También se ha demostrado que la capacidad de los manglares para disipar la energía de las olas y almacenar agua es eficaz, ya que reduce las inundaciones provocadas por las marejadas ciclónicas (Montgomery *et al.*, 2019). En el Estudio de caso 4 se presenta un ejemplo de proyecto de reconversión utilizando manglares como solución basada en la naturaleza.

Gráfica 9. Boceto conceptual de plantación de manglares para aumentar la protección frente a inundaciones



El éxito de la creación o restauración de manglares requiere lo siguiente (Balke *et al.*, 2011):

- Tiempo suficiente sin inundaciones para que las plantas se fijen al suelo y las semillas germinen.
- Crecimiento de las raíces a una profundidad determinada que permita que la vegetación permanezca en su lugar bajo el estrés de las olas y las corrientes y la pérdida de sedimentos.
- Salinidad, hidrología, mareas, entornos de olas de baja energía, transporte de sedimentos y tipo de suelo adecuados.

Al igual que las marismas, los sistemas de manglares se crean —con frecuencia— a partir de sistemas “análogos” establecidos con características físicas similares a las del lugar de estudio. Es de vital importancia proporcionar al suelo los nutrientes adecuados y crear canales de marea (para favorecer el movimiento e intercambio de agua y la descarga). Una consideración clave para la restauración de los manglares es la protección de las plántulas ante la erosión, la exposición a las olas, las corrientes y la depredación durante su establecimiento. Los proyectos de manglares también tienden a depender en gran medida del manejo adaptativo para abordar las incertidumbres que surgen después de la construcción. El apartado 5 describe otras consideraciones generales de diseño para SbN. En Balke *et al.* (2011) y Teutli Hernández *et al.* (2020) se pueden encontrar orientaciones de diseño más específicas para manglares.

Estudio de caso 4. Expansión de los manglares de Mayakoba

Expansión de los manglares de Mayakoba: Integración de manglares en la zona urbana

Playa del Carmen, Quintana Roo,
México

Las costas mexicanas en el golfo de México, el Caribe y el océano Pacífico albergan casi un millón de hectáreas de manglares. La mayoría de estos ecosistemas se encuentran en la costa del golfo, en la península de Yucatán, donde la actividad turística ocupa también un lugar preponderante. En las últimas décadas, la zona costera de Quintana Roo, en el Caribe mexicano, ha experimentado un crecimiento acelerado debido al desarrollo turístico. Como resultado de la expansión urbana y el desarrollo de la infraestructura turística, se han perdido grandes extensiones de manglares en el Caribe mexicano (Chávez *et al.*, 2021).

En respuesta al modelo de desarrollo turístico de alta densidad prevaleciente en la zona, el concepto del hotel y campo de golf Mayakoba surgió como una propuesta de infraestructura respetuosa del medio ambiente, destinada a preservar la biodiversidad (Mayakoba, 2020). El desarrollo de Mayakoba se encuentra en un sistema de manglares degradado que ya fue restaurado y sirve como SbN para hacer frente a las inundaciones costeras en la zona.

La restauración de las 60 hectáreas de manglares entrañó la construcción de canales y alcantarillas para mejorar la hidrología y reducir la salinidad, lo que favorece el restablecimiento natural de los manglares. Además, se ha completado la reforestación de la vegetación de manglares, para lo cual se plantaron 15,000 propágulos de mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Se llevan a cabo un monitoreo y un mantenimiento continuos de los manglares restaurados, con actividades como la vigilancia de la calidad del agua, la eliminación de objetos que impiden el flujo del agua, el control de la vegetación acuática y la remoción de sedimentos (Mayakoba, 2020).

Gráfica 10. Canal artificial en el sistema de manglares restaurado



Fuente: Mayakoba, 2020.

Además de la mayor protección costera que los manglares restaurados han proporcionado al desarrollo turístico, los cobeneficios del proyecto incluyen una mejor calidad del agua y mayor biodiversidad, en particular de aves, peces y anfibios, que ha pasado de 35 a 200 especies en la zona (Mayakoba, 2020).

2.7 Islas

La formación de islas entraña la creación de terrenos nuevos separados de la línea costera en pie, lo que supone costos muy elevados, al implicar el suministro de un volumen considerable de materiales de relleno y, a menudo, requerir la protección de porciones de los bordes de la isla con materiales grises. Al actuar principalmente disipando la energía de las olas y reduciendo la erosión y la severidad de las marejadas ciclónicas, las islas son una alternativa conveniente en lugares donde hay poco espacio disponible para aplicar otras soluciones intermareales o terrestres, toda vez que funcionan como líneas de defensa adicionales frente a la costa. Las islas suelen presentar una combinación de los demás tipos de SbN, como sistemas de playas y dunas o marismas salobres (véase el Estudio de

caso 5 como ejemplo de un proyecto de creación de islas de marisma salobre). Por ello, las islas tienen el potencial de generar una gran diversidad de beneficios de MRI y cobeneficios.

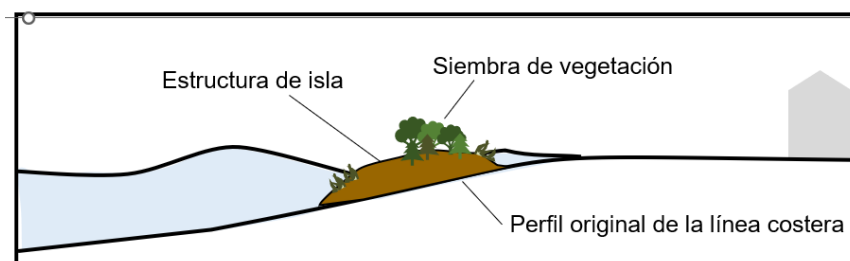
En el Recuadro 7 se presentan los cobeneficios normalmente asociados con las islas, aunque los proyectos podrían aportar numerosos beneficios adicionales, más aún si se combinan las islas con otras estrategias de SbN, como los humedales. Por lo tanto, los cobeneficios deben identificarse y evaluarse en función de cada proyecto. El documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* ofrece una descripción detallada sobre posibles beneficios colaterales derivados de la adopción de SbN, mientras que el documento *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos* propone métodos de monitoreo y parámetros de desempeño para soluciones basadas en la naturaleza que entrañan islas.

Recuadro 7. Ejemplos de cobeneficios típicos proporcionados por la implementación de SbN relativas a islas

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad del hábitat acuático ✓ Abundancia y diversidad de especies nativas de flora y fauna 	✓ Estética mejorada 	✓ Aumento del turismo ✓ Reducción de los costos de infraestructura adyacente (perdida por inundaciones) 

Existen tres tipos de islas que se pueden crear o restaurar: de barrera, deltaicas y en bahía o en lago (Gailani *et al.*, 2021). Las islas barrera, largas y estrechas, están situadas en paralelo a la costa; suelen tener menos de 20 km de longitud y protegen contra las marejadas ciclónicas, la erosión y el desbordamiento de las olas. Las islas en bahía o en lago son similares a las de tipo barrera, pero se encuentran alojadas en el interior de una laguna o bahía. Las islas deltaicas se forman en las desembocaduras de los ríos debido a la deposición de sedimentos que forman islotes en una red de canales.

Gráfica 11. Boceto conceptual de una estructura de isla para aumentar la protección ante inundaciones y reducir la erosión



A fin de que las islas se formen de manera natural y sigan siendo un elemento característico de la costa, se requiere suficiente energía de las olas y suministro de sedimentos, así como una zona intramareal de pendiente suave (Gailani *et al.*, 2021). Además, las islas normalmente sólo son viables donde la amplitud de las mareas es de baja a moderada (véase, por ejemplo, Souris, PEI), lo que podría limitar su aplicabilidad en zonas donde dicha amplitud es excepcionalmente grande, como en

zonas de la costa este de Canadá. Las islas son sistemas dinámicos y, sin intervenciones para protegerlas, cabe esperar que los procesos costeros las remodelen y erosionen de forma continua, por lo que necesitan ser diseñadas debidamente teniendo en cuenta la dinámica costera local. En el Estudio de caso 5, por ejemplo, el diseño de las tres islas creadas en la segunda etapa del proyecto fue menos exitoso, ya que dos de éstas sufrieron erosión y la atenuación de las olas no se logró en grado suficiente como sí ocurrió con las islas de la primera etapa. Debido a su posición más alejada de la costa y su naturaleza dinámica, las islas a veces requieren un mayor grado de diseño y manejo adaptativo que otras opciones de SbN. También se debe considerar con todo cuidado su ubicación, para no afectar los hábitats submareales en pie, así como tener en cuenta la posibilidad de tener que recurrir a arrendamientos de la zona intramareal (u obtener permisos especiales) para la construcción.

Gailani *et al.* (2021) ofrecen orientación sobre el diseño de islas. Se pueden utilizar modelos numéricos o físicos, o proyectos piloto para orientar, perfeccionar o probar el diseño (Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2016). Las herramientas de modelización numérica hidrodinámica, de olas y geomorfológica suelen utilizarse para precisar la disposición, pendientes, elevaciones y dimensiones de los materiales en una etapa posterior del proceso de diseño (Vouk *et al.*, 2021). En el apartado 5 pueden consultarse consideraciones técnicas adicionales relacionadas con el diseño de SbN en general.

Los aspectos más destacados en relación con las islas como SbN se resumen en el Recuadro 8.

Recuadro 8. Aspectos destacados sobre SbN que entrañan islas



Las islas ofrecen protección ante la erosión y las marejadas ciclónicas, además de facilitar nuevos hábitats y posibles oportunidades de recreación.



En los casos con poco espacio disponible para implementar soluciones terrestres, las islas representan la mejor opción. Se debe prestar especial atención a su ubicación, para evitar un impacto negativo en los hábitats submareales del entorno.



Con frecuencia, las islas se utilizan en combinación con otras SbN (islas de marismas salobres, por citar un ejemplo).



Para que las islas se formen y se mantengan como elemento de la línea costera, se requiere un suministro adecuado de sedimentos, una pendiente baja y suficiente energía del oleaje para dar forma a los sedimentos o, en su defecto, la implementación de medidas de protección contra la erosión (Gailani *et al.*, 2021).



Dados los procesos costeros a los que estos sistemas están expuestos, probablemente se requieran mantenimiento, monitoreo y manejo adaptativo. Es importante comprender la dinámica costera local y planificar teniéndola en cuenta para minimizar la erosión.

Estudio de caso 5. Creación de islas en Florida

Proyecto *Greenshores*:

Reducción de los impactos de las marejadas ciclónicas y las inundaciones con la creación de islas

Pensacola, Florida,
Estados Unidos

Pensacola se encuentra en el noroeste de Florida, en la costa del golfo de México, con una marcada propensión a oleajes intensos y erosión costera, así como a marejadas ciclónicas provocadas por huracanes y tormentas tropicales. Pensacola ha sufrido daños en sus propiedades e infraestructura pública y ocupa el octavo lugar en la lista de los peores lugares afectados por huracanes en Estados Unidos (Naturally Resilient Communities, 2022b).

Frente a esta situación, en 2003 se puso en marcha el proyecto *Greenshores*, un programa de restauración del hábitat costero, estructurado en dos etapas. La primera etapa consistió en la creación de cinco islas en la bahía de Pensacola utilizando arena dragada y un rompeolas artificial, en las que se sembró vegetación nativa para crear hábitat de marismas (Naturally Resilient Communities, 2022b). Esta etapa concluyó con éxito, ya que las islas han reducido las inundaciones y la erosión en Pensacola gracias a la atenuación de las olas, hecho que se hizo especialmente evidente en 2004, cuando el huracán *Iván* azotó la zona. El huracán causó graves daños por inundaciones y cortes de carreteras en Pensacola, excepto en la zona situada detrás del proyecto *Greenshores*, donde los daños fueron menores (Naturally Resilient Communities, 2022b).

Una vez completada con éxito la primera etapa del proyecto, en 2007 comenzó la segunda, que consistió en la construcción de tres islas de marismas intermareales al oeste del sitio original, utilizando material extraído habitualmente del cercano río Escambia (Departamento de Protección Ambiental de Florida, 2021). Las islas creadas en la segunda etapa acabaron sumergidas por completo, tras las peticiones de la consulta pública de preservar la estética de la bahía en pie, por lo que esta parte del proyecto no tuvo tanto éxito como la primera. Dos de las islas sufrieron erosión y la atenuación de las olas con las islas no se logró al mismo grado que el registrado en la primera fase (NRC, 2022b), muy probablemente como resultado del diseño totalmente sumergido.

Gráfica 12. Sitio 1 del proyecto (cinco islas de marismas) y sitio 2 (tres islas, dos de las cuales experimentan erosión)



Fuente: Google Earth, 2022, Lat 30.41, Long -87.19

2.8 Vegetación terrestre

Los procesos de reconversión con SbN que entrañan vegetación terrestre incluyen la plantación de árboles, pastos o arbustos nativos por encima de la marca típica de la pleamar, en la zona riparia. La colocación de vegetación terrestre en el cordón litoral (a lo largo de la orilla tierra adentro) permite atenuar el oleaje y el viento durante eventos de tormentas extremas, reducir el impacto del hielo y estabilizar los sedimentos de los flujos terrestres (Scheres y Schuttrumpf, 2019). Los sistemas radiculares de la vegetación terrestre contribuyen a retener los sedimentos y a aumentar la estabilidad de la línea costera o la ribera (Gray, 1995), y dicha estabilidad se ve favorecida por un mayor peso de la vegetación, aunado a más sedimentos y mayor humedad del suelo. La vegetación terrestre puede plantarse en zonas actualmente expuestas a inundaciones o erosión provocadas por las olas durante condiciones de tormenta extrema, o como medio de adaptación al aumento del nivel del mar.

Además de los beneficios por cuanto a MRI, la vegetación terrestre aporta múltiples cobeneficios (véase el Recuadro 9), incluido el servir de hábitat para insectos y aves. Para conocer más detalles sobre dichos posibles cobeneficios, consúltase el documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe). Asimismo, el ya mencionado documento *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos* detalla posibles métodos de monitoreo y parámetros de desempeño propuestos para SbN relacionadas con vegetación terrestre.

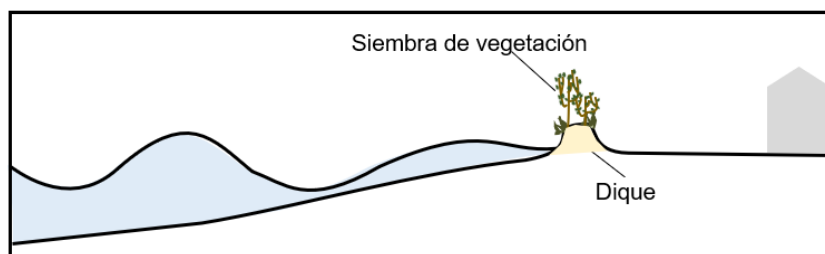
Recuadro 9. Ejemplos de cobeneficios típicos obtenidos mediante la aplicación de SbN que entrañan vegetación terrestre

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad del hábitat terrestre ✓ Abundancia y diversidad de especies nativas de flora y fauna ✓ Salud del suelo ✓ Captación y almacenamiento de carbono 	✓ Estética mejorada ✓ Alimentación, recolección y aprovechamiento de recursos naturales, y usos tradicionales 	✓ Reducción de los costos de infraestructura adyacente (pérdida por inundaciones) 

Existe la posibilidad de reconvertir o construir diques marinos híbridos con vegetación terrestre (véase la gráfica 13); sin embargo, la eficacia y seguridad de esta estrategia es objeto de debate (Scheres y Schüttrumpf, 2019). Surgen preocupaciones en torno a los posibles daños inducidos por la vegetación —en especial, las plantas leñosas— en la estructura de diques, al aumento del riesgo de erosión y a las fuerzas adicionales del viento. También preocupa que la vegetación terrestre complique la capacidad de mantener y vigilar la integridad de los diques. En consecuencia, las políticas locales podrían impedir la aplicación de vegetación terrestre en los diques. Por ejemplo, en Columbia Británica, Canadá, la vegetación de los diques se limita a hierba que puede segarse para facilitar la vigilancia de la integridad de la estructura (Columbia Británica, 2022). Las directrices del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para el manejo de diques y otras estructuras

de protección contra inundaciones en Estados Unidos (USACE, 2019a) recomiendan no utilizar vegetación terrestre en los diques (aunque se pueden obtener variaciones), y establecen la posibilidad de “desbrozarla periódicamente” para mantener su funcionalidad y accesibilidad con fines de mantenimiento. Además, la muerte estacional de la vegetación —sobre todo en climas fríos— influye en la variabilidad del desempeño del MRI, factor a tener en cuenta en el diseño. En cualquier caso, es posible colaborar con las autoridades responsables de los diques u otras personas encargadas de la toma de decisiones para determinar un plan de inspección y mantenimiento adecuado que facilite el uso de la vegetación terrestre.

Gráfica 13. Boceto conceptual de vegetación terrestre utilizada para aumentar la protección ante inundaciones y reducir la erosión



Se entiende que este tipo de solución es rentable y compatible con muchos usos de suelo vigentes. Sin embargo, utilizar la vegetación terrestre como protección contra inundaciones es una práctica aún incipiente y las directrices de diseño son limitadas. En la actualidad se llevan a cabo investigaciones para comprender mejor su eficacia (véanse, por ejemplo, Kalloe, 2019; Kalloe *et al.*, 2022). Por esta razón, aunque la modelización numérica es una herramienta útil, también se deben considerar la modelización física o los proyectos piloto para orientar, perfeccionar o probar cualquier reconversión que utilice una SbN de vegetación terrestre como protección frente a inundaciones. En el apartado 5 se ofrecen consideraciones técnicas adicionales relacionadas con el diseño de SbN en general.

En el Recuadro 10 se resumen los aspectos más destacados sobre vegetación terrestre como SbN.

Recuadro 10. Aspectos destacados sobre SbN que entrañan vegetación terrestre



La vegetación terrestre brinda protección contra el viento y la erosión, así como contra las olas durante los eventos de marea alta. El desempeño puede variar dependiendo de los ciclos estacionales de muerte y crecimiento.



La orientación técnica del diseño en cuanto a la vegetación terrestre como SbN para manejo de riesgos por inundación aún es incipiente (véanse, por ejemplo, Kalloe, 2019, y Kalloe *et al.*, 2022), por lo que este enfoque debe utilizarse con cautela. Se recomienda recurrir a modelos físicos o proyectos piloto para comprender mejor los beneficios del MRI.



Cabe la posibilidad de reconvertir o construir diques marinos híbridos con vegetación terrestre. Sin embargo, para facilitar su inspección, es posible que las autoridades responsables de los diques no permitan esta solución.



La vegetación terrestre es compatible con numerosas formas de uso del suelo en vigor y podría utilizarse en combinación con otras SbN (por ejemplo, marismas salobres).

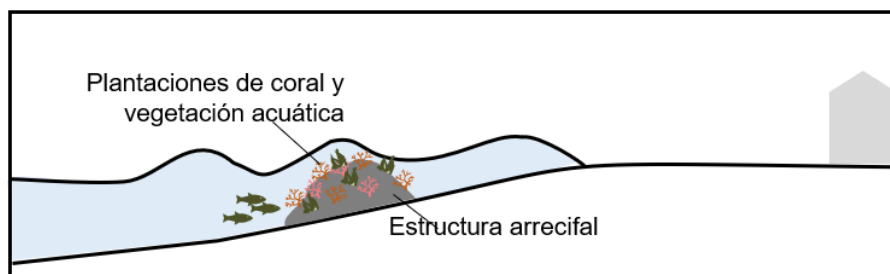


La vegetación terrestre ya es una parte importante de numerosos ecosistemas, lo que sugiere que la vegetación presente puede proporcionar beneficios secundarios de MRI.

2.9 Elementos sumergidos

Los elementos sumergidos, como los arrecifes de coral o de ostras, o los bosques de pasto marino (*Zostera marina*) y kelp, contribuyen a disipar la energía de las olas, lo que reduce la erosión y el impacto de las marejadas ciclónicas (véase, por ejemplo, Lowe *et al.*, 2021, e *infra* la gráfica 14). La vegetación acuática sumergida y los arrecifes creados o restaurados se han utilizado ampliamente en proyectos de restauración y protección costeras en América del Norte. Estos elementos tienen el potencial de aportar importantes cobeneficios, al tiempo que protegen la costa de la erosión y las inundaciones provocadas por las olas (en el Estudio de caso 6 puede consultarse un ejemplo de proyecto de arrecife de ostras con pasto marino, que redujo la erosión al tiempo que mejoró la biodiversidad.). Los arrecifes son una opción más viable y efectiva en regiones con pequeñas amplitudes de marea (Lowe *et al.*, 2021).

Gráfica 14. Boceto conceptual de estructura de arrecife coralino para aumentar la protección contra inundaciones y reducir la erosión



Con propiedades similares a las de la flora que emerge de forma parcial —descrita en el apartado 2.6 (“Humedales”)—, la vegetación acuática sumergida sirve para atenuar la energía de las olas, lo que

ayuda a prevenir las inundaciones y la erosión en la línea costera, y estabilizar los sedimentos del lecho marino. Por otro lado, los arrecifes son estructuras rígidas sumergidas, con propiedades similares a las de algunas soluciones grises convencionales, como los rompeolas artificiales, que proporcionan beneficios de MRI muy parecidos a los de los arrecifes, pero menos cobeneficios que un arrecife natural. Las características híbridas de los arrecifes se encontrarán en el espectro entre estos dos tipos de estructura. El diseño de arrecifes como SbN se beneficia tanto de los conocimientos disponibles y de la eficacia demostrada de las estructuras grises para reducir la erosión y la energía de las olas en la costa, como de la comprensión existente de los efectos de los sistemas de arrecifes naturales en los procesos costeros. Por ejemplo, se calcula que el Sistema Arrecifal Mesoamericano (en Quintana Roo, México) redujo en 43 por ciento los daños causados por el huracán *Dean* en 2007 (Reguero *et al.*, 2019). Al igual que muchas otras opciones de SbN, los arrecifes son autosustentables, crecen con el tiempo y mantienen su estructura si se diseñan de forma adecuada (Brathwaite *et al.*, 2022). Por ello, los arrecifes constituyen un enfoque de adaptación adecuado al aumento del nivel del mar en algunas zonas si son capaces de crecer a un ritmo acorde con dicha subida.

Además de los beneficios en términos de MRI, los elementos sumergidos aportan numerosos cobeneficios. Los cobeneficios típicamente asociados con elementos sumergidos se presentan en el recuadro 11. Para conocer una lista de los posibles cobeneficios adicionales asociados con SbN, así como métodos y parámetros de desempeño propuestos para monitorear la eficacia de soluciones que entrañan elementos sumergidos, consúltense los documentos de orientación (asociados al presente informe) *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* y *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos*.

Recuadro 11. Ejemplos de cobeneficios típicos aportados por SbN que entrañan elementos sumergidos

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad del hábitat acuático ✓ Abundancia y diversidad de especies nativas de flora y fauna 	✓ Mayores oportunidades de esparcimiento ✓ Alimentación, recolección y aprovechamiento de recursos naturales, y usos tradicionales 	✓ Aumento del turismo ✓ Reducción de los costos de infraestructura adyacente (pérdidas por inundaciones) ✓ Oportunidades de ecoturismo 

Los arrecifes de coral y de ostras implican la construcción de una estructura arrecifal subyacente —en muchos casos artificial—, en combinación con materiales naturales como conchas de ostra para favorecer el reclutamiento natural de las ostras, aunque también pueden plantarse de forma activa con corales. Recrear el entorno adecuado para que los componentes vivos prosperen y crezcan conlleva un gran desafío. Los arrecifes de coral, en particular, son muy sensibles a su entorno y viven en un rango de condiciones relativamente pequeño: necesitan, ante todo, buena calidad del agua (que suele ser un problema cerca de los estuarios y en las zonas urbanas costeras), una adecuada profundidad de agua y ciertas condiciones hidrodinámicas. Por ello, el diseño suele basarse en arrecifes “análogos” establecidos, que existen en las cercanías y tienen condiciones de sitios similares. Los materiales deben asemejarse a los que se encuentran en el entorno local para favorecer el reclutamiento y el crecimiento (Lowe *et al.*, 2021). Aun así, en muchos casos, quienes se dedican profesionalmente a esta labor han tenido éxito con el uso de materiales artificiales, como los arrecifes de hormigón impresos en 3D (véase, por ejemplo, Levy *et al.*, 2022).

Los arrecifes experimentan una gran cantidad de presiones cada vez mayores (Bryant *et al.*, 1998). Se prevé que la acidificación y el calentamiento de los océanos (Spalding y Brown, 2015, entre otras fuentes) añadirán estrés a los arrecifes de coral, en particular. Además, el aumento de la urbanización costera ha contribuido —y probablemente lo siga haciendo— a incrementar la escorrentía en los entornos costeros y estuarinos (véase, por ejemplo, Rabalais *et al.*, 2009), con la consiguiente introducción de contaminantes y alteración de los niveles de nutrientes necesarios para la salud de los sistemas coralinos, al tiempo que favorece la proliferación de algas nocivas y la eutrofización. Por otro lado, la pesca de herbívoros que controlan las poblaciones de algas también añade estrés a los corales (Bryant *et al.*, 1998). Teniendo en cuenta todas estas presiones, que amenazan la funcionalidad de dichos sistemas y ponen de manifiesto la importancia de crear hábitats adicionales, lo más probable es que el monitoreo y el manejo adaptativo constituyan medidas esenciales para la SbN que conlleve elementos sumergidos. Por lo general, el mantenimiento de elementos sumergidos precisa de un equipo de especialistas en biología submarina, requerimiento que, dependiendo de las condiciones y los peligros específicos del lugar, puede resultar más costoso que otras opciones.

Los modelos numéricos se utilizan para comprender mejor los beneficios que aportan los elementos sumergidos al MRI y, con frecuencia, permiten entender los impactos secundarios, como los cambios en las corrientes y las vías de transporte de sedimentos. La geometría y la ubicación de los elementos sumergidos —principalmente los arrecifes— con respecto a la dinámica y los procesos costeros locales, las olas, las corrientes y la calidad del agua revisten fundamental importancia para diseñar un proyecto exitoso. En Beheshti y Ward (2021) y Eger *et al.* (2022) se puede encontrar orientación adicional sobre la restauración de bosques de pastos marinos (*Zostera marina*) y kelp; por cuanto a arrecifes sumergidos, consúltense Baine (2001) y Lowe *et al.* (2021). Véase el apartado 5 para ampliar la información sobre las consideraciones generales de diseño de SbN.

El Recuadro 12 recoge los aspectos más destacados respecto de los elementos sumergidos como SbN.

Recuadro 12. Aspectos destacados sobre SbN que entrañan elementos sumergidos



Los elementos sumergidos permiten disipar la energía de las olas, al tiempo que reducen la erosión y el impacto de las marejadas ciclónicas. También sirven de hábitat y ofrecen beneficios recreativos y turísticos.



Los arrecifes de coral y de ostras implican la construcción de una estructura arrecifal subyacente —muchas veces artificial—, en combinación con materiales naturales como conchas de ostra para fomentar el reclutamiento natural de ostras, o se plantan activamente con corales.



El diseño debe basarse en arrecifes y lechos de pasto marino (*Zostera marina*) o de kelp locales en pie, utilizando materiales similares a los que se encuentran en el entorno local, a fin de fomentar el reclutamiento y crecimiento ecológicos (Bridges *et al.*, 2021).



El mantenimiento de los elementos sumergidos requerirá un equipo de especialistas en biología submarina, con un costo probablemente superior al de otras opciones.

Estudio de caso 6. Proyecto de arrecifes de ostras en la bahía de San Francisco

Proyecto Arrecifes de ostras de costas vivas de la bahía de San Francisco (San Francisco Bay Living Shorelines Oyster Reef): Proyecto piloto de arrecifes de ostras para mitigar la erosión costera

Condado de Marín,
California,
Estados Unidos

Costas vivas de la bahía de San Francisco (San Francisco Bay Living Shorelines) es un proyecto piloto de restauración de arrecifes de ostras puesto en marcha para orientar el diseño de posibles iniciativas futuras a mayor escala en la zona. Iniciado en 2012, el proyecto tiene como objetivo reducir la erosión y mantener los procesos costeros, al tiempo que mejora el hábitat.

Se construyeron cuatro parcelas de 320 m² a lo largo de la línea costera de San Rafael, a 200 m de la orilla, para evaluar la eficacia de diferentes tipos de tratamientos costeros en la consecución de dos objetivos: reducir la erosión y mejorar el hábitat. Estas parcelas incluían una dedicada a ostras del Pacífico, una a pasto marino (*Zostera marina*), otra a una combinación de ostras y pasto marino y una más de control (Judge *et al.*, 2017).

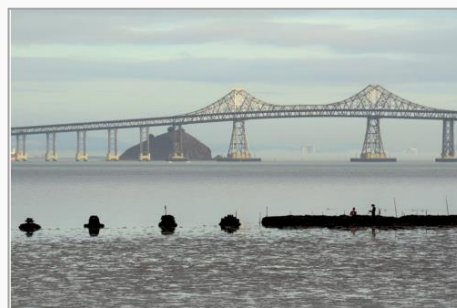
La parcela de ostras combinó estructuras de hormigón con costales de conchas de ostras del Pacífico limpias para fomentar el reclutamiento de la ostra nativa *Olympia*, así como otros sustratos como “esferas para arrecife” (*reef balls*) y mezcla de concreto especiales para entornos marinos (*baycrete*), a fin de evaluar qué tipos de sustratos tuvieron más éxito. Las otras dos parcelas experimentales incluyeron plantaciones de pasto marino (*Zostera marina*) y una combinación de plantaciones de pasto marino y arrecifes de ostras. El proyecto, que incluyó los cuatro tratamientos de las parcelas y el monitoreo posterior, supuso un costo de \$EU2.5 millones (Judge *et al.*, 2017) y contó con la participación de entidades socias de los ámbitos de los gobiernos federal y estatal, académico y privado.

Una vez construido, entre 2012 y 2017 se llevó a cabo un monitoreo de alta frecuencia que, a partir de 2017, continuaría con una frecuencia menor durante un periodo de cinco años, con la ambición de mantenerlo a largo plazo. El programa de monitoreo midió los siguientes aspectos: atenuación de las olas; supervivencia y densidad del pasto marino; reclutamiento, supervivencia y densidad de la ostra *Olympia*; uso de invertebrados, peces y aves; energía de las olas, y calidad del agua (Judge *et al.*, 2017).

El trabajo de monitoreo reveló un reclutamiento exitoso y rápido (en un plazo de cinco meses) de ostras en las parcelas de arrecifes de ostras, con especial incidencia en las agrupaciones de conchas. Se descubrió que la parcela combinada de pasto marino y arrecife de ostras logró los objetivos de atenuación de las olas y mejora del hábitat con mayor eficacia que los demás tratamientos. En esta parcela se produjo un mayor aumento de la biodiversidad (incluidos peces, invertebrados y aves) y una reducción de 30 por ciento de la energía de las olas (Judge *et al.*, 2017). El proyecto también generó mayor conciencia, apoyo e interés por proyectos de SbN en el área de la bahía de San Francisco.

Una de las principales lecciones de este proyecto radicó en que la superficie más adecuada para el reclutamiento de ostras fue la de conchas de ostras del Pacífico limpias. Los montones de conchas quedaron enterrados en el sedimento, por lo que se recomendó utilizar una base de hormigón para sostener las valiosas piezas por encima de la zona de sedimentación. Ante la dificultad por conseguir conchas de ostra, se sugirió entablar una colaboración entre restaurantes y criadores de moluscos y crustáceos para aumentar el suministro (Judge *et al.*, 2017).

Gráfica 15. Agrupaciones de conchas de ostras del Pacífico en la bahía de San Francisco

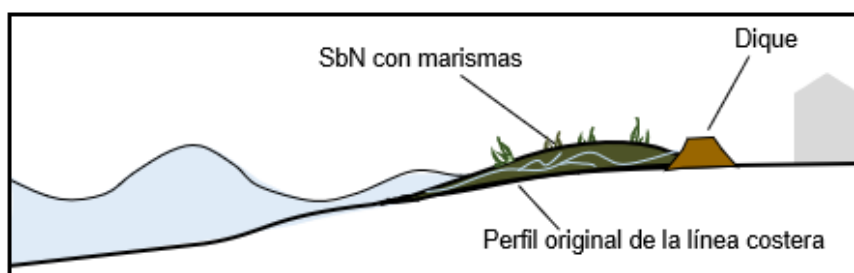


Fuente: Judge *et al.*, 2017.

2.10 Elementos o sistemas híbridos

Todas las opciones de SbN antes descritas pueden utilizarse —por lo general— junto con opciones convencionales de ingeniería gris. Estas combinaciones de atributos naturales y elementos grises se denominan *elementos o sistemas híbridos* (véase la gráfica 16). Se puede implementar una combinación de elementos naturales y grises para reemplazar una infraestructura antigua o cuando no hay defensas costeras en funcionamiento (por ejemplo, Van Loon-Steensma *et al.*, 2014). Es posible implementar elementos o sistemas híbridos donde ya existe infraestructura gris, lo que permite una transición entre elementos grises y verdes. También pueden aplicarse SbN con elementos grises en pie, lo que da lugar a un elemento híbrido nuevo. **Numerosos proyectos de reconversión —o incluso la mayoría— no necesariamente recurrirán sólo a SbN (lo que implica volver a procesos totalmente naturales) y, por lo tanto, se clasificarán como elementos o sistemas híbridos.**

Gráfica 16. Boceto conceptual de un ejemplo de solución híbrida, con una marisma construida frente a un sistema de dique en pie



Las opciones híbridas pueden implementarse en cualquier etapa del ciclo de vida de la alternativa de defensa costera (es decir, construcción nueva, mantenimiento, rediseño o desmantelamiento). Los enfoques híbridos que se emplean a menudo para MRI incluyen los siguientes:

- marismas con protección perimetral (por ejemplo, con conchas de ostras o rocas);
- sistema de marismas y diques;
- sistema de regeneración de playas y promontorios o rompeolas independientes;
- espigones de roca y regeneración de playas;
- regeneración de playas y restos de madera grandes anclados;
- restauraciones de dunas con vallas de madera;
- revestimientos con bancos intermareales;
- malecones con baldosas que mejoran el hábitat;
- diques con vegetación leñosa;
- islas con protección perimetral (por ejemplo, con rocas o tablestacas), y
- plantación de manglares con sistema de promontorios o rompeolas.

Las soluciones híbridas se suelen considerar cuando quienes administran los activos intentan potenciar los cobeneficios (por ejemplo, condiciones del hábitat adecuadas) asociados a infraestructura “dura” en pie, o cuando reina una incertidumbre considerable en torno al desempeño de las SbN, ya que éstas suponen un compromiso entre las soluciones estáticas “probadas” y las SbN dinámicas. La construcción de un arrecife submareal mar adentro frente a un malecón en pie, por ejemplo, puede mejorar el desempeño y la longevidad dicha estructura, al tiempo que proporciona un hábitat para especies en riesgo de extinción. Del mismo modo, la incorporación de promontorios o espigones en la regeneración de una playa ayuda a estabilizar los sedimentos y brinda mayor seguridad de que la regeneración de la playa permanecerá en su lugar a largo plazo. También se

pueden introducir elementos grises como “respaldo” en caso de que se rebasen los criterios de diseño para la estabilidad dinámica de los componentes no estructurales de la SbN. Por citar otro ejemplo, se puede enterrar un revestimiento bajo un sistema de dunas para evitar un fallo catastrófico en caso de una tormenta extrema. De esta manera, las soluciones híbridas aportan muchos de los cobeneficios asociados con SbN, al tiempo que brindan un mayor nivel de confianza en cuanto al desempeño y la longevidad del proyecto para las partes interesadas y el equipo del proyecto. Los elementos o sistemas híbridos tienen el beneficio potencial de ocupar menos espacio, lo que permite su utilización en áreas donde el espacio es demasiado limitado para SbN o está restringido por cuestiones normativas (Sutton-Grier *et al.*, 2015). El estudio de caso 7 ofrece un ejemplo de proyecto híbrido de regeneración de playas en Columbia Británica, Canadá.

Habida cuenta de los numerosos beneficios que pueden aportar las soluciones híbridas, se tiende a introducir elementos grises en sistemas que, de otro modo, serían naturales, incluso cuando no es del todo necesario. Esta práctica limita los posibles cobeneficios del proyecto y no aprovecha el aprendizaje y la investigación en torno al uso de las SbN. Por otro lado, contribuye a que persistan los impactos no deseados de los elementos grises, como el aumento de la erosión en otras partes del sistema, la inhibición del drenaje o la acumulación de restos flotantes. Elementos de ecoingeniería (por ejemplo, opciones grises de MRI diseñadas para mantener o mejorar la función de los ecosistemas, pozas intermareales de hormigón y el aumento de la rugosidad de diques o malecones) se sitúan en el extremo gris del espectro de SbN (véanse, por ejemplo, Suedel *et al.*, 2021; O'Shaughnessy *et al.*, 2019, y Strain *et al.*, 2018). Estas opciones suponen una mejora con respecto a la infraestructura convencional y ofrecen numerosas ventajas, pero cuando existe la oportunidad de llevar un proyecto aún más lejos hacia el extremo verde del espectro, se recomienda con ahínco su adopción. La intención de la reconversión (como se indica en el apartado 2.3) debe ser llevar los sistemas de MRI hacia el extremo verde del espectro de SbN aplicando un enfoque tan natural como sea razonable y técnicamente factible, al tiempo que se maximizan los cobeneficios. Las opciones híbridas que se implementan con una comprensión global del sistema, y que maximizan los beneficios de las SbN en combinación con elementos grises, donde la incertidumbre, el riesgo, el espacio u otros factores restringen el uso de SbN totalmente verdes, encuadran con esta intención.

Los enfoques híbridos tienen el potencial de aprovechar muchas de las ventajas percibidas de los elementos grises, entre las que figuran las siguientes:

- se ha demostrado su capacidad para prestar servicios de MRI;
- su diseño suele ser relativamente sencillo en comparación con las SbN;
- se implementan con relativa rapidez;
- son eficaces en cuanto se construyen;
- incorporan infraestructura en pie o en proceso de envejecimiento, de modo que no es necesario retirarla (por ejemplo, un sistema de dunas establecido sobre un malecón construido con anterioridad);
- pueden contar ya con el apoyo de la sociedad, y
- se asegura su financiamiento con mayor facilidad.

Estudio de caso 7. Mejoramiento del estuario de Beach Creek

Mejoramiento del estuario de Beach Creek: Intervención híbrida que ofrece múltiples beneficios

Qualicum Beach,
Columbia Británica, Canadá

El sector costero de Qualicum Beach es un elemento central del pueblo que proporciona importantes beneficios sociales y económicos gracias al turismo y a las actividades recreativas. Dicho sector costero se caracteriza por tener una extensa playa de arena en la zona intermareal inferior y otra compuesta de grava gruesa y cantos rodados en la zona intermareal superior, normalmente flanqueado por un malecón de hormigón. La zona intramareal también forma parte de la importante zona de manejo de vida silvestre de Parksville-Qualicum.

En 2021, la localidad mejoró un tramo de su sector costero modernizando parte del malecón y revitalizando una desembocadura con presencia de salmones mediante la creación de un estuario artificial (ACEC-BC, 2021; Qualicum Beach, 2022) (véase la gráfica 17). Las obras incluyeron la regeneración de la playa, la creación de un meandro en el cauce del arroyo y la construcción de un cordón litoral reforzado para proteger el estuario recién construido de las grandes olas incidentes. Estas medidas proporcionaron además protección a la zona de tierras altas frente a las inundaciones provocadas por las olas incidentes que rompen más lejos de la costa (ACEC-BC, 2021; PQB News, 2022). Es importante destacar que se introdujeron elementos rígidos y “duros” (una restinga de roca redondeada, entre otros) para que funcionaran de forma simbiótica con elementos “blandos” más dinámicos, a fin de aumentar la longevidad y la resiliencia del proyecto y maximizar los beneficios ambientales y sociales.

Gráfica 17. Estuario recién construido detrás del cordón litoral (verano de 2022)



Fuente: imagen proporcionada por J. Wilson

En enero de 2022, una fuerte tormenta (acompañada de mareas altas de invierno) azotó gran parte de la región. El cordón litoral y el estuario recién construidos resistieron bien la tormenta, con sólo un pequeño desprendimiento de rocas (PQB News, 2022) (véase la gráfica 18, izquierda). Aproximadamente a 100-200 m de distancia, dos secciones adyacentes de malecón de hormigón se derrumbaron durante la tormenta (véase la gráfica 18, derecha). El proyecto fue galardonado con el Premio al Mérito de la Asociación de Empresas de Consultoría en Ingeniería de Columbia Británica (*British Columbia Association of Consulting Engineering Companies*, ACEC-BC) (ACEC-BC, 2021).

Gráfica 18. Fotografías de la línea costera tras la tormenta del 7 de enero de 2022, (izquierda) a lo largo del estuario restaurado del arroyo, y (derecha) a lo largo de un tramo adyacente de la costa, en el que falló el malecón



Fuente: imágenes proporcionadas por J. Wilson

Debido a la amplia diversidad de opciones híbridas y el espectro tan variado de tipos de proyectos —desde verdes hasta grises—, los cobeneficios de las alternativas híbridas serán en gran medida específicos para cada proyecto. En el recuadro 13 se enumeran algunos de los cobeneficios que pueden esperarse de la implementación de soluciones híbridas.

Recuadro 13. Cobeneficios que podrían materializarse con la adopción de sistemas híbridos

Ambientales	Sociales	Económicos
✓ Disponibilidad y calidad del hábitat acuático ✓ Abundancia y diversidad de especies nativas de flora y fauna ✓ Mejoramiento de la salud del suelo ✓ Captación y almacenamiento de carbono	✓ Mayores oportunidades de recreación ✓ Mejoramiento de la salud pública	✓ Aumento del turismo ✓ Menores costos asociados a infraestructura adyacente (pérdidas por inundaciones) ✓ Oportunidades de ecoturismo
		

Aunque hay pruebas de la eficacia de numerosos sistemas híbridos para mitigar los riesgos costeros (por ejemplo, los datos de percepción remota de Bangladesh mostraron que un sistema híbrido de diques y manglares restaurados redujo en forma significativa los daños por inundaciones causadas por ciclones; Morris *et al.*, 2018), existen pocas investigaciones sobre el desempeño de las soluciones híbridas en comparación con los proyectos que entrañan sólo infraestructura gris o SbN. Más aún, la orientación disponible en torno al diseño y la selección de elementos o sistemas híbridos es limitada (Sutton-Grier *et al.*, 2015), por lo que existen grandes oportunidades para elaborar directrices y orientación técnica adicionales en materia de soluciones híbridas (véase el apartado 7). El apartado 5 proporciona información adicional sobre consideraciones técnicas de diseño para reconversión con SbN en general.

Los aspectos más destacados en relación con los elementos o sistemas híbridos como SbN se resumen en el recuadro 14.

Recuadro 14. Aspectos destacados en relación con SbN que entrañan elementos o sistemas híbridos



Las soluciones híbridas combinan atributos de SbN con elementos estructurales grises.



Las opciones híbridas pueden implementarse cuando la infraestructura gris en pie requiere mantenimiento o mejoras, durante la sustitución o el rediseño de la infraestructura gris en pie, o en la etapa de desmantelamiento de los elementos de defensa costera existentes.



Los beneficios por cuanto a MRI y cobeneficios que aportan las soluciones híbridas dependerán en gran medida de cada proyecto.



Las opciones híbridas deben diseñarse con la intención de mover los sistemas de MRI hacia el extremo “verde” del espectro de SbN, aplicando un enfoque tan natural como sea posible y, al mismo tiempo, maximizando los cobeneficios.

2.11 Comparación de costos de los elementos de SbN

Los costos totales de planificación, diseño, construcción y manejo de un proyecto de reconversión con SbN dependerán del proyecto en cuestión y de las características del lugar, y variarán en gran medida en función del alcance de la intervención, el tipo y el estado de la infraestructura en pie, la opción de SbN a implementar, las condiciones ambientales, el marco normativo y la aceptación por parte de la población. Asimismo, cabe esperar variaciones en los costos de un país a otro de América del Norte, dada la gran disparidad en los costos de mano de obra y la disponibilidad de materiales y equipo, entre otras variables. A esto se suma —en los últimos años— la gran imprevisibilidad de los costos asociados a todas las etapas del ciclo de vida de los proyectos, como consecuencia de las crisis financieras mundiales, la pandemia por Covid-19, los desastres naturales, el cambio climático, la disponibilidad de recursos y los cambios geopolíticos, entre otros factores. Teniendo en cuenta la gran variabilidad de los costos de los proyectos entre países e incluso entre zonas de un mismo país, las fluctuaciones que se producen a lo largo del tiempo y la limitada disponibilidad de datos de costos en muchas regiones, el presente apartado se centra en los costos relativos de implementación de SbN en las distintas etapas de un proyecto, como la planificación y el diseño, la construcción, su operación y mantenimiento, con el objetivo de facilitar una comprensión detallada de los costos. De hecho, los costos de reconversión dependerán de cada proyecto, por lo que se recomienda realizar un análisis de costos adicional en cada caso.

A continuación se resumen brevemente algunos de los costos típicos en los que se puede incurrir en cada etapa de un proyecto (adaptado de Bridges *et al.*, 2021, p. 470):

Planificación y diseño

- Gestión del proyecto
- Participación de las partes interesadas
- Actividades de delimitación del alcance y planificación (incluido el análisis de opciones)
- Actividades de monitoreo temprano
- Estudios previos al diseño (incluidas las evaluaciones de riesgos)
- Diseño multidisciplinario (incluidas las revisiones de diseño)
- Estimaciones de costos

- Solicitudes de financiamiento
- Licencias, autorizaciones y permisos
- Adquisición de terrenos

Construcción

- Gestión del proyecto
- Participación de las partes interesadas
- Servicios de licitación
- Preparación del sitio
- Construcción (materiales y colocación)
- Disposición (eliminación) de materiales
- Pagos de compensación por afectación de hábitats
- Supervisión del cumplimiento
- Elaboración y registro de planos e informes

Operación y mantenimiento

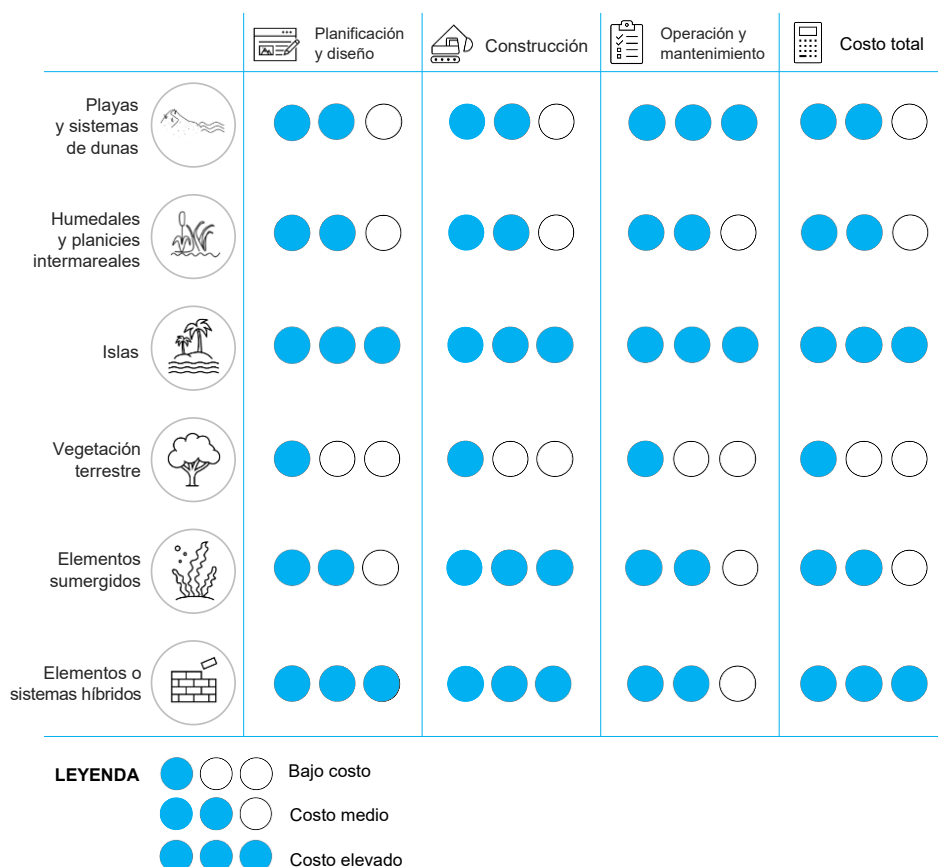
- Gestión del proyecto
- Participación de las partes interesadas
- Monitoreo
- Análisis de los datos de monitoreo y actualizaciones al plan de manejo adaptativo
- Manejo adaptativo (reparaciones)
- Contribuciones a la investigación y el desarrollo
- Desmantelamiento

La gráfica 19 resume los costos totales relativos a la implementación de varios tipos de SbN, así como los costos incurridos en distintas etapas del ciclo de ejecución de un proyecto —para cada una de estas SbN—, a saber: planificación y diseño, construcción, y operación y mantenimiento. Las estimaciones de costos relativos presentadas en la gráfica 19 se basan en la literatura en la materia y en conocimientos especializados en el tipo de SbN en cuestión. El proceso de reconversión conllevará otros gastos, como la reparación o el desmantelamiento y la eliminación de elementos en pie, no contemplados en las estimaciones de costos relativos presentadas en este documento. Por ejemplo, la eliminación de un malecón y la instalación (creación) de un arrecife serán significativamente más costosas que la ruptura (controlada) de un dique y la restauración natural de una marisma. **Siempre se recomienda realizar un análisis de costos específico para cada proyecto, basado en los mercados locales, la normativa aplicable y las consideraciones propias del lugar.**

Las valoraciones de costos relativos mostradas en la gráfica 19 se determinaron en colaboración con un panel de especialistas de DHI participantes en un taller interno en noviembre de 2022 sobre opciones, costos, obstáculos y oportunidades de reconversión, quienes señalaron que los costos deberían variar significativamente en función de los requisitos particulares de cada proyecto, los detalles de diseño y la complejidad de la construcción. Por ejemplo, la construcción de una isla costará mucho más en aguas profundas que someras, incluso si los demás factores no varían. La construcción de un sistema de dunas de playa de varios metros de altura requerirá más relleno de playa y será más costosa de construir que la regeneración de una pequeña duna. Para todos los tipos de SbN resultará más económico conservar o restaurar un sistema en pie que crear uno nuevo. Por lo general, en términos de relación costo-beneficio, será más rentable y conveniente construir proyectos en tierra que mar adentro o bajo el agua. También cabe esperar que los proyectos complejos con muchos elementos interconectados impliquen un mayor costo durante todas las etapas del proyecto.

Los proyectos que se benefician de las lecciones obtenidas de proyectos similares previos y están diseñados correctamente (teniendo en cuenta los riesgos costeros) podrían requerir mantenimiento y reparaciones mínimos; por el contrario, cuando están mal diseñados o son novedosos (ya sea por utilizar una técnica innovadora o por aplicar en un entorno nuevo una técnica establecida) los proyectos podrían requerir mayor mantenimiento durante la etapa operativa. Por lo tanto, quienes son responsables de la toma de decisiones deben asegurarse de disponer del presupuesto necesario para —a largo plazo— llevar a cabo un manejo adaptativo, realizar el mantenimiento correspondiente y monitorear la SbN, y también de que el presupuesto sea acorde con la complejidad, incertidumbre, riesgo y valor generados por el proyecto en cuestión.

Gráfica 19. Costos relativos de las etapas de ejecución de un proyecto, para diferentes tipos de SbN



Asimismo, cabe esperar que los costos varíen entre los distintos países de América del Norte, sobre todo en las etapas de construcción y manejo adaptativo, en razón de las significativas diferencias en los costos de mano de obra y su disponibilidad en Canadá, Estados Unidos y México. En especial, en Canadá y Estados Unidos, la etapa de planificación y diseño suele ser menos costosa que la de construcción (los honorarios de planificación y diseño oscilan entre 10 y 20 por ciento del costo de construcción); en México, todos los costos —planificación, diseño y también construcción— pueden ser menores, al ser más bajo el costo de la mano de obra. En cuanto a costos de operación y mantenimiento asociados a las SbN, prevalece una gran incertidumbre.

Al considerar las opciones de SbN, los costos previstos deben sopesarse y compararse con los beneficios principales y secundarios proporcionados a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto (por ejemplo, la reducción de daños causados por las amenazas costeras, y los cobeneficios sociales, ambientales y económicos), así como con los posibles ahorros. Por ejemplo, el costo inicial de un sistema de SbN puede suponer una reducción de los costos de mantenimiento o mejoramiento de elementos de MRI en otros lugares, en particular para arrecifes e islas, lo que a su vez puede conllevar una menor necesidad de protección de la línea costera. En el apartado 5.4 se abordan las consideraciones económicas relacionadas con proyectos de reconversión con SbN, incluida la importancia de evaluar este tipo de soluciones a lo largo del ciclo de vida. Las estrategias para evaluar las opciones de SbN se exponen en el apartado 3 y se tratan con más detalle en el documento de orientación sobre cobeneficios ya citado con anterioridad.

A continuación se analizan de forma concisa algunas consideraciones de costos particulares de los seis tipos de soluciones basadas en la naturaleza:



Playas y dunas

El costo total estimado de proyectos de playas y dunas (incluidas las opciones de reconversión) en comparación con otro tipo de SbN es de nivel medio. Los costos de planificación y diseño suelen ser relativamente bajos, ya que la regeneración de playas en ocasiones se basa en principios de diseño ya establecidos y suele recibir buen apoyo público. La presencia y el estado de una playa en pie influirán en gran medida en la determinación de los costos, ya que siempre resultará menos costoso restaurar una playa o un sistema de dunas degradados.

Los costos más elevados provendrán de la construcción y el mantenimiento posterior a la construcción. Los sistemas de playas y dunas suelen instalarse en entornos de alta energía, lo que los hace vulnerables a la erosión inducida por tormentas. El mantenimiento y la operación dependerán en gran medida del éxito del proyecto a la hora de equilibrar el presupuesto destinado a sedimentos y la frecuencia y severidad de las tormentas. En la mayoría de los proyectos, se debe prever la regeneración como parte de la operación y el mantenimiento, cuyo costo puede reducirse cuando la erosión es mínima. Los estudios morfológicos durante la etapa de planificación y diseño del proyecto, así como el monitoreo continuo y el manejo adaptativo, ayudarán a determinar la necesidad de regeneración. Los costos de construcción y mantenimiento variarán aún más en función del volumen, el origen y el tipo de material utilizado y los costos de transporte asociados. La arena dragada durante el mantenimiento de puertos a veces constituye un subproducto relativamente barato de las actividades locales rutinarias (Aerts, 2018), siempre que cumpla con la reglamentación aplicable y los estándares de calidad (por ejemplo, bajas concentraciones de metales pesados e hidrocarburos).



Humedales

Se estima que los costos relativos de la reconversión de humedales (en todas las etapas de ejecución) son de nivel medio en comparación con otros tipos de SbN. En general, se espera que el costo de restauración de un hábitat degradado en pie sea mucho menor que el de un desarrollo virgen.

Al igual que con todas las SbN, la etapa de planificación y diseño requerirá la participación de un equipo multidisciplinario conformado por especialistas en biología, ingeniería y costas. Teniendo en cuenta que los diseños suelen basarse en modelos “análogos” cercanos y establecidos que tienen características físicas similares a las del lugar de estudio, los costos de diseño y planificación de humedales suelen ser bajos o medios. De hecho, esta etapa puede resultar, para los humedales, menos compleja y costosa que en los casos de islas y soluciones híbridas, por ejemplo, e incluso también con respecto de la vegetación terrestre.

Los costos de construcción y manejo adaptativo de humedales variarán de manera significativa dependiendo del tipo de humedal que se pretenda crear y de su idoneidad para el medio ambiente. Los manglares son la opción de humedal más barata por hectárea, mientras que los costos asociados con las marismas son aproximadamente el doble que los de los manglares (Bridges *et al.*, 2021). Los proyectos de humedales tienden a depender en gran medida del manejo adaptativo para hacer frente a las incertidumbres que surgen después de la construcción; sin embargo, los costos de mantenimiento asociados con el manejo suelen ser bajos.



Islas

Si bien es cierto que las islas son la opción de intervención más compleja y costosa —tanto en cada una de las etapas de ejecución de un proyecto como en su conjunto—, los costos asociados podrían reducirse si se restaura una isla degradada o en ruinas que esté en pie.

Por lo general, las islas se sitúan en entornos de alta energía para proteger la línea costera, los cuales erosionan y degradan su estructura (a menos que se adopte un enfoque híbrido). Por ello, las islas requieren una planificación cuidadosa en la que participe un equipo conformado por especialistas en múltiples disciplinas para garantizar el éxito del proyecto. Además, el proceso para la obtención de permisos y autorizaciones para soluciones relacionadas con creación o recuperación de islas suele resultar muy complejo: por ejemplo, puede ser necesario adquirir terrenos adicionales o arrendar la zona intramareal. La construcción de nuevas islas también puede afectar la navegación, los procesos costeros y los hábitats en pie, por lo que se requieren permisos y autorizaciones adicionales. También pueden generarse más costos de planificación si las islas incorporan otros tipos de SbN, como playas o marismas.

Los costos de construcción —por lo general, más altos que los de la mayoría de las otras opciones, con la excepción de los elementos sumergidos— se derivan del significativo tiempo y gran volumen de relleno requeridos para formar una isla y crear una estructura estable. Además, la logística de la construcción es complicada debido a las obras mar adentro (a menudo se requiere trabajar desde una barcaza, lejos de tierra firme), así como a la necesidad de colocar el material por debajo de la marca de marea alta.

Los costos durante las etapas de operación y mantenimiento también son relativamente altos, pues se requiere un monitoreo meticuloso; la probabilidad de reparaciones y mantenimiento es alta, y la complejidad de llevar a cabo el mantenimiento en alta mar es considerable. Como resultado de los altos costos operativos y de mantenimiento, la mayor parte de las islas incorporarán protección costera gris, lo que aumenta los costos y aleja el proyecto del extremo verde del espectro de soluciones basadas en la naturaleza.



Vegetación terrestre

La vegetación terrestre (por ejemplo, árboles, pastos y arbustos) suele ser una de las opciones de SBN más sencillas y menos costosas, y puede plantarse e integrarse en los usos del suelo vigentes, lo que requiere costos mínimos de planificación y diseño. Sin embargo, debido a que todavía se conoce poco sobre su desempeño para MRI por falta de investigación y proyectos piloto, es posible que se requiera modelización numérica o física para demostrar su eficacia.

Para la construcción se requiere contar con un vivero local donde se cultiven especies arbóreas nativas, sembrar manualmente las plántulas y cuidar los ejemplares jóvenes o plántulas una vez finalizada la construcción. Este tipo de intervención será costeable en regiones con bajos costos de mano de obra, aunque el manejo adaptativo será más intensivo en los años inmediatamente posteriores a la construcción, cuando los ejemplares jóvenes y las plántulas son vulnerables a las

tormentas, la sequía y otros efectos estacionales y climáticos. En cualquier caso, este tipo de proyectos conlleva una complejidad relativamente baja y, por lo tanto, los costos relativos de planificación, construcción y mantenimiento son bajos en comparación con otras opciones.



Elementos sumergidos

Los costos de un trabajo de reconversión con elementos sumergidos van de intermedios a altos en comparación con otras opciones de SbN. Sin embargo, un proyecto de restauración de arrecifes puede completarse de manera relativamente eficiente y, por lo tanto, ser menos costoso que intervenir un área virgen. Los costos también variarán de manera considerable según el tipo de elemento utilizado: los arrecifes de coral, por citar un ejemplo, son una opción más costosa que los bancos de ostras y los lechos de pasto marino (*Zostera marina*) (Narayan *et al.*, 2016).

Al igual que con todas las SbN, en el caso de los elementos sumergidos, las etapas de delimitación del alcance, planificación y diseño requerirán la participación de un equipo multidisciplinario que incluya a especialistas en biología, ingeniería y costas. De la misma manera que con los humedales, los diseños —sobre todo en el caso de praderas de pasto marino (*Zostera marina*) y kelp— suelen basarse en modelos “análogos” cercanos y establecidos que tienen características físicas comunes al lugar de estudio; el diseño de arrecifes, en específico, suele basarse en precedentes establecidos para rompeolas sumergidos. Por ello, los costos de diseño y planificación suelen ser intermedios. Cabe señalar que, en algunos casos, pueden surgir complejidades significativas en las fases de diseño y planificación, derivadas del proceso de obtención de permisos y aprobaciones, motivo por el cual debe prestarse especial atención a aspectos relacionados con la navegación, el impacto en los hábitats en pie y la aprobación pública durante dichas etapas tempranas del ciclo de ejecución de soluciones basadas en la naturaleza.

Debido a la complejidad que implica la construcción de obras submarinas y mar adentro, las estructuras sumergidas suelen conllevar costos de construcción relativamente elevados.

Aunque estos sistemas suelen ser relativamente autosuficientes, lo que reduce el riesgo de altos costos de mantenimiento y operación, se debe llevar a cabo un monitoreo y un manejo adaptativo. En caso de requerirse mantenimiento, los costos suelen ser elevados; por ejemplo, existe la posibilidad de que los arrecifes de coral se vean afectados por tormentas de baja frecuencia y daños graves, lo que implicaría la necesidad de una respuesta rápida y costosa de un equipo de buceo cualificado para su reparación. Teniendo en cuenta la sensibilidad de los arrecifes de coral a la calidad del agua y los niveles de nutrientes, y su dependencia de grandes poblaciones de peces herbívoros, en las zonas donde no se dan estas condiciones, estos sistemas requerirán un mayor mantenimiento o incluso podrían no sobrevivir. En México, los arrecifes de coral son vulnerables a las algas sargazo (Chávez *et al.*, 2020), lo que podría aumentar los costos de mantenimiento asociados a su eliminación de los arrecifes. Si dichos elementos se instalan en zonas propensas a huracanes, como el golfo de México, es posible que haya que considerar mayores costos de mantenimiento asociados. Los costos de construcción y mantenimiento variarán aún más en función del volumen, el origen y el tipo de material utilizado, así como de los costos asociados de transporte y colocación.



Elementos o sistemas híbridos

En vista de las marcadas diferencias entre las SbN híbridas, los datos confiables sobre los costos de planificación y diseño, construcción y operación son limitados. De ahí que los costos derivados de toda intervención varíen significativamente dependiendo de la combinación de elementos que se elijan, el entorno del lugar y otros factores particulares del proyecto. Por ejemplo, hacia el extremo gris del espectro híbrido, una opción es añadir a la infraestructura en pie elementos

que favorezcan el hábitat (por ejemplo, texturas o superficies rugosas en diques y malecones, y pozas intermareales de hormigón), lo que supone mejoras sencillas y de bajo costo (véase, por ejemplo, Suedel *et al.*, 2021). Los proyectos más cercanos al extremo verde del espectro, que requieren un trabajo más significativo para modificar o sustituir estructuras en pie (por ejemplo, un sistema de playas con elementos mínimos como promontorios y espigones), serán más costosos. Es importante considerar y sopesar los costos relativos de las opciones disponibles con los posibles beneficios, toda vez que los proyectos más cercanos al extremo verde de la escala suelen generar mayores cobeneficios.

Los sistemas híbridos pueden parecer más sencillos de implementar, ya que guardan una mayor similitud con los métodos convencionales “probados y comprobados”. Sin embargo, la adición de una diversidad de elementos aumenta la complejidad del diseño, la construcción y la operación de las soluciones híbridas, en comparación con la implementación de una solución gris convencional u otras SbN. Como ocurre con todas las SbN, las fases de planificación y diseño requerirán la participación de un equipo multidisciplinario formado por especialistas en biología, ingeniería y costas. Los proyectos que tienen precedentes de importancia y que están bien diseñados (tomando en cuenta las amenazas costeras) probablemente necesiten mantenimiento y reparaciones mínimos; por el contrario, los proyectos mal diseñados o novedosos (ya sea por utilizar una nueva técnica o por aplicar en un entorno nuevo una técnica ya establecida) podrían requerir mayores labores de mantenimiento y manejo adaptativo. La modelización numérica o física y los proyectos piloto permiten comprender con mayor claridad las limitaciones y los costos futuros de las soluciones híbridas novedosas. En cualquier caso, el monitoreo y el manejo adaptativo deben preverse y presupuestarse desde el principio del ciclo de ejecución de un proyecto de reconversión con soluciones basadas en la naturaleza.

3 Delimitación del alcance de oportunidades y opciones de reconversión

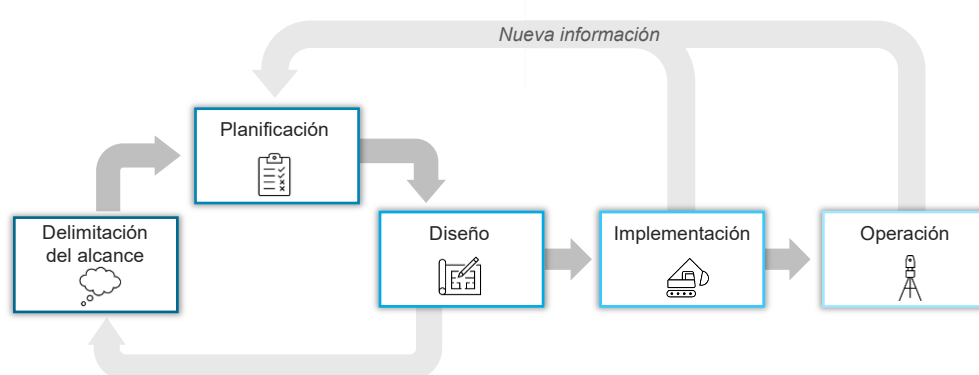
La decisión de llevar a cabo una reconversión utilizando SbN depende de distintos factores, entre los que se incluyen los numerosos beneficios que los sistemas basados en la naturaleza ofrecen. En este apartado se examina el proceso para identificar oportunidades de reconversión y se analizan las herramientas y técnicas para evaluar el potencial de las distintas opciones de reconversión, teniendo en cuenta sus respectivos beneficios. Este marco representa un conjunto integral de prácticas óptimas para explorar y delimitar el alcance las oportunidades y opciones de reconversión; sin embargo, se reconoce que en algunos casos la aplicación directa del marco se verá limitada en virtud de las restricciones de los proyectos y limitaciones de recursos que a veces se presentan. Personas y entidades responsables de la toma de decisiones tendrán la posibilidad de adaptar el nivel de esfuerzo dedicado a este proceso, de manera que sea proporcional a las necesidades de las partes interesadas, los riesgos del proyecto y la disponibilidad de recursos. En ciertos casos, convendrá sufragar el costo de diversos estudios que aporten información para la toma de decisiones, así como contar con un grupo multidisciplinario de especialistas que participen en un proceso interactivo a lo largo de varios años; en otros casos, cuando los recursos son limitados, una persona u organización con práctica profesional y conocimientos especializados en la materia podrá emplear el marco para guiar un proceso de toma de decisiones sencillo y recabar la participación de especialistas externos y grupos de interés conforme se vaya necesitando.

3.1 Etapas de proyecto para la implementación de SbN

El marco para la ejecución de un proyecto de SbN consta de cinco fases principales —iterativas y cíclicas—, a saber: delimitación del alcance, planificación, diseño, implementación y operación (véase la gráfica 20) (Bridges *et al.*, 2021). El proceso cíclico facilita el manejo adaptativo de los

sistemas MRI en pie, en la medida en que se revaloran continuamente, y permite también al equipo encargado del proyecto explorar e implementar procesos de reconversión o cambios en cualquier momento del ciclo de vida del proyecto. Para poner en marcha un proyecto de SbN se requiere un equipo diverso de especialistas, cuyas funciones y responsabilidades se analizan en el apartado 4.2.

Gráfica 20. Marco para ejecutar un proyecto de SbN

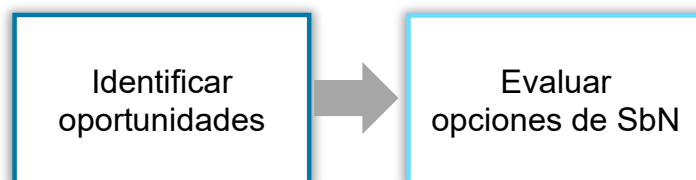


Nota: Las flechas de color gris oscuro corresponden a las vías primarias y las flechas de color gris claro a las vías secundarias (iterativas).

Fuente: Adaptado de Bridges *et al.*, 2021.

Al considerar las posibilidades de reconversión, quienes son responsables de la toma de decisiones deben estudiar con todo detenimiento cómo detectar posibles oportunidades y evaluar las distintas opciones de SbN (véase la Gráfica 21), pasos —ambos— que forman parte de la fase de delimitación del alcance del proyecto y constituyen la parte medular de las fases ulteriores de planificación, diseño, implementación y operación.

Gráfica 21. Marco conceptual para explorar y delimitar el alcance de oportunidades y opciones de reconversión

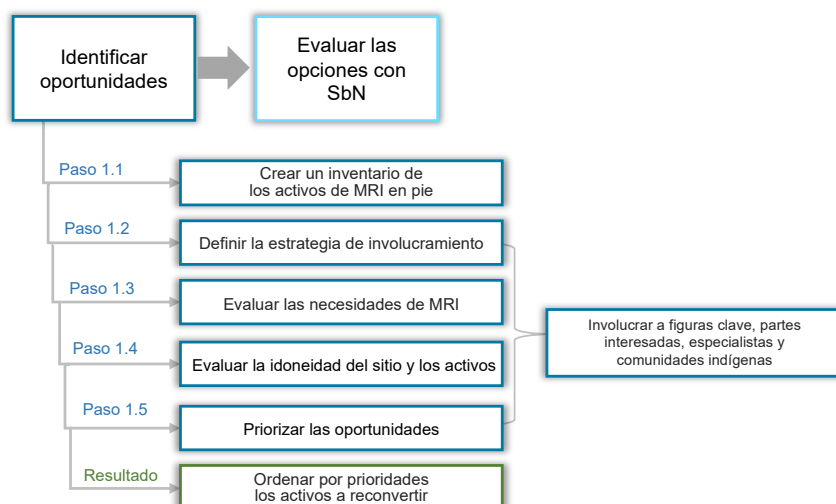


3.2 Identificación de oportunidades de reconversión

El primer paso en la ejecución de un proyecto de SbN es identificar oportunidades para la reconversión de infraestructura en pie, oportunidades que será necesario priorizar a fin de permitir a quienes son responsables de la toma de decisiones seleccionar los activos que se reconvertirán utilizando SbN. La Gráfica 22 ilustra un marco de cinco pasos que sirve de guía en la identificación y priorización de activos de MRI a reconvertir mediante SbN. Estos pasos se describen con más detalle

en los siguientes subapartados. Una vez identificadas las oportunidades, el segundo paso consiste en evaluar las diferentes opciones costeras de MRI, entre las que figuran las soluciones basadas en la naturaleza (paso 2, véase el apartado 3.3).

Gráfica 22. Marco conceptual para identificar oportunidades de reconversión con SbN



3.2.1 Paso 1.1: Crear un inventario de los activos de MRI en pie

El primer paso para identificar oportunidades de reconversión con SbN es crear un inventario (una lista o base de datos) de los activos de defensa costera en pie (por ejemplo, diques, malecones, murallones costeros, revestimientos o dunas) en la región de interés para quien se encargue de la toma de decisiones al respecto. Si se tienen en cuenta todos los activos y lugares que pueden necesitar MRI, se podrá adoptar un enfoque basado en sistemas (véase, por ejemplo, De Vries *et al.*, 2021) y formular una estrategia de MRI amplia, en lugar de tratar cada sitio o activo de forma aislada. Este inventario debe incluir detalles pertinentes de cada uno de los activos, como su propósito, ubicación, longitud, antigüedad, vida útil restante y el estado en que se encuentra. Este inventario será el punto de partida para evaluar las necesidades y la viabilidad de implementar SbN, a partir del cual se pueden ejecutar los siguientes pasos para perfeccionar el inventario y obtener una lista de los sitios prioritarios susceptibles de reconversión.



Resultado: Lista de activos de MRI en pie creada.

3.2.2 Paso 1.2: Definir la estrategia de involucramiento

El hecho de consultar con la comunidad local, figuras clave y partes interesadas directas, organismos responsables de la concesión de permisos y autorizaciones y pueblos indígenas aportará información valiosa sobre necesidades, valores y preocupaciones, de modo que puedan evaluarse y priorizarse las necesidades y oportunidades de MRI. Además de ofrecer la posibilidad de informar sobre las necesidades y opciones de MRI en las zonas costeras (incluidas las SbN), así como de establecer relaciones, la colaboración es una actividad importante que debe llevarse a cabo a lo largo de los procesos de identificación, priorización y evaluación. De ahí la importancia de delinear desde el principio del proceso de identificación una estrategia orientada a fomentar el involucramiento. En ese sentido, definir una estrategia de involucramiento conlleva cierta complejidad, por lo que debe

confiarse a profesionales con la experiencia necesaria. Es fundamental que la estrategia tenga en cuenta quiénes deben participar (es decir, protagonistas y partes interesadas), cuándo deben hacerlo y con qué frecuencia, y cómo (esto es, de qué forma) ha de llevarse a cabo dicha participación (véase el recuadro 15). En el apartado 4.3 se amplía la información sobre el involucramiento.



Resultado: Elaboración de un plan dirigido a propiciar el involucramiento.

Los apartados 3.3.2 y 3.3.6 del documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* y el documento titulado *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.*, 2021) ofrecen orientaciones más detalladas sobre el involucramiento.

Recuadro 15. Preguntas clave a tener en cuenta a la hora de formular una estrategia de involucramiento

	¿Quiénes deben participar?		¿En qué forma se involucrarán los actores y grupos de interés?
	¿En qué momento tendrá lugar la participación?		¿Cuáles son los objetivos? ¿Qué información desea recibir o proporcionar?
	¿Con qué frecuencia se involucrarán las partes interesadas?		¿Cómo se incorporarán al proyecto los comentarios y observaciones recibidos?

3.2.3 Paso 1.3: Evaluar las necesidades de MRI y la estrategia a seguir

El paso 1.3 consiste en evaluar la infraestructura de MRI actual con el objetivo de identificar los sitios y activos que requieren un aumento de MRI. Para cada activo debe determinarse si existe una deficiencia entre la exposición a riesgos costeros y su mitigación. Estas deficiencias en la mitigación de riesgos por inundación aparecen cuando la infraestructura en pie ya no ofrece una protección adecuada contra inundaciones o erosión; no se espera que la infraestructura satisfaga las necesidades futuras a medida que cambia el clima; el estado del activo ha empeorado (o se espera que empeore); se requieren reparaciones, o ha llegado al final de su vida útil. Todas estas deficiencias pueden considerarse oportunidades para mejorar los elementos de MRI costeros en pie recurriendo a una amplia diversidad de opciones (incluidas las SbN), que deben evaluarse en el contexto del sistema y de la estrategia global del manejo de riesgos por inundación.

La evaluación de riesgos permite valorar las necesidades y la estrategia de MRI, para lo cual han de determinarse los factores de riesgo y la vulnerabilidad de las costas. Una práctica óptima consiste en adoptar un enfoque integral y sistémico, considerando el riesgo a una escala espacial adecuada, en lugar de evaluar el riesgo de inundación al interior de una sola área jurisdiccional, por ejemplo (Nicholls *et al.*, 2005; Narayan *et al.*, 2012; Menéndez *et al.*, 2020).

Existe una amplia diversidad de enfoques y marcos para llevar a cabo evaluaciones de riesgos (por ejemplo, Hall *et al.*, 2003; Van Alphen *et al.*, 2011; Narayan *et al.*, 2012; Journeay *et al.*, 2015; Columbia Británica, 2020, y Murphy *et al.*, 2020), si bien los objetivos y elementos globales guardan gran similitud (Jones *et al.*, 2014), donde el riesgo se trata, por lo general, como un producto de la

probabilidad de una amenaza, la vulnerabilidad ante ésta y sus consecuencias.² En la norma ISO 14091 (Organización Internacional de Normalización, 2021), la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) ofrece una guía detallada —paso a paso— para realizar una evaluación de riesgos, la cual se recomienda a escala mundial como mejor práctica. El trabajo que supone completar una evaluación de riesgos puede variar significativamente de un proyecto a otro, y el método elegido y aplicado ha de responder a las necesidades y la escala de la intervención. En algunos casos puede bastar con una evaluación cualitativa exhaustiva basada en estudios ya realizados y en el criterio de profesionales; para proyectos más complejos, pueden seguirse las mejores prácticas descritas por la propia ISO (2021).

Este apartado ofrece una visión general de los principales elementos de las evaluaciones de riesgos:

1. Analizar el estado actual de los activos de MRI.
2. Evaluar los riesgos costeros actuales y futuros.
3. Determinar la capacidad de los activos en pie para mitigar los riesgos costeros.
4. Completar la evaluación de riesgos y vulnerabilidades.

Paso 1.3.1: Analizar el estado actual de los activos de MRI

La evaluación de riesgos implica, en primer lugar, efectuar un análisis de las condiciones actuales de los activos MRI en pie, con base en la lista de activos recopilada en el paso 1.1. Para ello se requiere, por lo general, una inspección de las condiciones por parte de personas profesionales calificadas y la revisión de documentos históricos (incluidos registros de inspección, planos e informes de mantenimiento).

Paso 1.3.2: Evaluar los riesgos costeros actuales y futuros

El siguiente paso consiste en identificar y evaluar los peligros costeros, como las inundaciones y la erosión, factores que pueden variar de un lugar a otro e incluso entre sitios de proyectos de pequeña escala. Personas profesionales calificadas han de evaluarlos, con vistas a determinar su probabilidad y la gravedad que éstos entrañan (véase, por ejemplo, USACE, 2019b). El objetivo es comprender la exposición a las amenazas costeras, así como la forma en que éstas podrían variar en el futuro con el cambio climático. Los tipos de evaluación necesarios incluyen estimar el nivel del mar actual y futuro; las inundaciones costeras; las mareas; las marejadas; la velocidad y dirección del viento; la formación de olas, su altura y efectos; el transporte de sedimentos, y la erosión costera (FEMA, 2016).

Paso 1.3.3: Determinar la capacidad de los activos en pie para mitigar los riesgos costeros

Una vez entendidos los riesgos costeros presentes y futuros, se debe llevar a cabo una evaluación de la capacidad de la infraestructura en pie para brindar protección suficiente, todo ello con el objetivo de identificar la necesidad de mejorar el MRI. Esta tarea incluye, al menos, evaluar las elevaciones mínimas necesarias para reducir los niveles de ascenso o de rebase (desbordamiento) del oleaje a niveles seguros, y compararlas con las requeridas para mitigar las inundaciones. También se requiere examinar las capacidades de protección frente a la erosión, junto con consideraciones relativas a la estabilidad estructural y geotécnica. Las preguntas clave a considerar comprenden las siguientes:

- ¿Proporciona el activo un adecuado MRI para hacer frente a los riesgos costeros presentes y futuros?
- ¿Cuál es el riesgo de que falle?
- ¿Necesita el activo reparaciones o mantenimiento?
- ¿Está llegando el activo al final de su vida útil?

² Véase Journeay *et al.* (2015) para consultar una reseña de los diferentes métodos de evaluación de riesgos.

Paso 1.3.4: Completar la evaluación de riesgos y vulnerabilidades

A continuación se realizará una evaluación de riesgos que tenga en cuenta la probabilidad y la gravedad de una serie de eventos de inundación costera, junto con sus consecuencias. La evaluación de la vulnerabilidad de la comunidad y del sistema natural ante los riesgos de inundación costera también es una parte esencial de este ejercicio (por ejemplo, IPCC, 2007, 2012). Ésta toma en consideración, además de la vulnerabilidad, la importancia económica y social de las tierras afectadas y la capacidad de adaptación del sistema, así como los riesgos de inundación costera y la fragilidad de la infraestructura (véase la Gráfica 23). La capacidad de adaptación es la habilidad de superar y adaptarse a los impactos del cambio climático (Adger, 2006; IPCC, 2022).



Resultado: Necesidades de MRI (es decir, lagunas y deficiencias) identificadas y cuantificadas.

Gráfica 23. La vulnerabilidad como combinación de la exposición a riesgos costeros, la capacidad de adaptación y la sensibilidad de la zona protegida



Fuente: IPCC, 2007, 2012.

3.2.4 Paso 1.4: Evaluar la idoneidad del sitio y los activos para adoptar SbN

La viabilidad técnica de las SbN aplicadas al MRI dependerá en gran medida de las limitaciones propias del lugar. Este paso implica evaluar la idoneidad de los lugares (identificados en el paso 1.3) para la implementación de SbN. En esta etapa del proceso de exploración y delimitación del alcance, normalmente basta con valerse, por un lado, de conocimientos especializados sobre SbN y, por otro, del reconocimiento del lugar para determinar la viabilidad de un proyecto. Más adelante en el proyecto se requerirán estudios adicionales para comparar los cobeneficios asociados con las opciones viables, seleccionar una opción preferida y emprender el diseño detallado (véase el apartado 3.3). Como parte de esta evaluación exhaustiva de la idoneidad del sitio para implementar SbN, se deben considerar las limitaciones del proyecto descritas en el recuadro 16. Otras limitaciones, como la disponibilidad de financiamiento (véase el apartado 4.4) y los requisitos reglamentarios (véase el apartado 4.5), podrán también considerarse en la evaluación.



Resultado: Comprensión del grado de viabilidad en cuanto a la idoneidad del sitio (para todos los activos del inventario) con vistas a la implementación de SbN.

Cabe señalar que este paso se centra en la viabilidad técnica de las opciones de SbN. Los cobeneficios sociales, ambientales y económicos asociados se evaluarán más a fondo durante la fase de evaluación de opciones (véase el apartado 3.3).

Recuadro 16. Ejemplos de condiciones, limitaciones y oportunidades de un sitio a tener en cuenta para determinar la idoneidad de recurrir a SbN

Lugar adecuado 	• ¿Hay suficiente espacio disponible para todos los tipos de SbN? • ¿Existen conflictos entre los usos de suelo en pie y algunas SbN? • ¿Restringirá la normativa la huella del proyecto? • ¿Se requerirá para algunas SbN comprar o arrendar nuevos terrenos?
Exposición a riesgos costeros	• ¿Está expuesto el sitio a mareas de gran amplitud? • ¿Está expuesto el sitio a olas o marejadas ciclónicas regulares o intensas? • ¿Hay vientos regulares o fuertes?
Suministro actual de sedimentos 	• ¿Se ha alterado el suministro natural de sedimentos al sistema por influencia antropogénica o de la misma naturaleza (es decir, presenta actualmente un déficit de sedimentos)? • ¿Está el sistema dominado por el transporte de sedimentos paralelo a la costa o perpendicular a ésta? • ¿Cuáles son las fuentes de sedimentos externas?
Limitaciones de acceso 	• ¿Cómo se obtendrá acceso durante la construcción? • ¿Entraña la construcción trabajo submarino o en alta mar? • ¿Habrá acceso disponible para, a largo plazo, llevar a cabo tareas de monitoreo y manejo adaptativo? • ¿Podría el mantenimiento periódico causar impactos negativos en los sistemas?
Elementos naturales y ecosistemas presentes 	• ¿Existen elementos naturales (como dunas de arena o humedales) susceptibles de restaurarse o mejorarse? • En caso de construcción nueva, ¿existen elementos naturales o hábitats que puedan verse afectados de forma negativa?
Apoyo de la comunidad 	• ¿Respalda la comunidad la adopción de SbN en este sitio? • ¿Han sufrido las personas integrantes de la comunidad un impacto negativo por proyectos previos de MRI en esta área? • ¿Existe la posibilidad de que la comunidad obtenga cobeneficios significativos?

3.2.5 Paso 1.5: Priorizar las oportunidades

Una vez compilada la lista de activos de MRI en pie (y los detalles asociados identificados en pasos anteriores), el último paso consiste en priorizar las oportunidades de reconversión. El resultado deseado de este paso es identificar qué ubicaciones o sitios de proyecto deben priorizarse para la reconversión que utiliza SbN, en lugar del tipo específico de SbN a implementar. Para este paso se recurre a la información obtenida a lo largo de las tareas previas del proceso de identificación. La participación en esta etapa de las partes interesadas permitirá comprender el apoyo de la comunidad a

la implementación de SbN en determinados lugares. Profesionales con experiencia en MRI y SbN prestarán un valioso apoyo a la realización de este ejercicio de clasificación, el cual podrá completarse con una evaluación comparativa simple y exhaustiva que clasifique los proyectos teniendo en cuenta la vulnerabilidad, el potencial de las SbN y el apoyo de la comunidad a las intervenciones propuestas (véase el recuadro 17).



Resultado: Lista detallada de activos o ubicaciones prioritarios en pie que requieren reforzamiento del MRI

Recuadro 17. Categorías a considerar para clasificar o priorizar proyectos de SbN

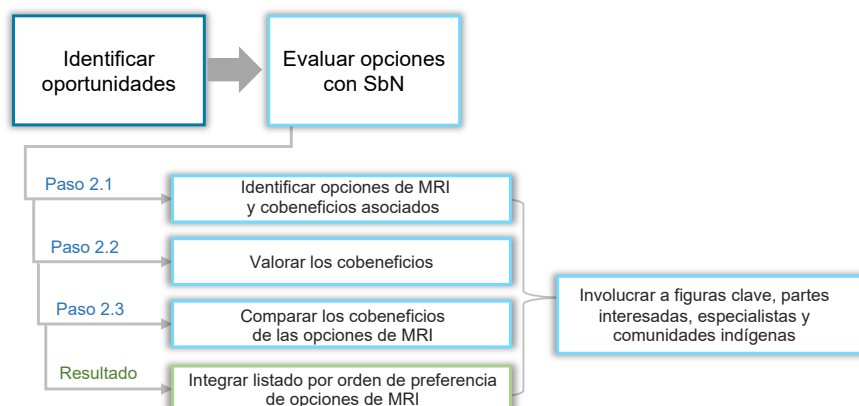
Vulnerabilidad 	• ¿Se acercan los activos en uso al final de su vida útil? • ¿Satisfacen los activos en pie las necesidades presentes y futuras por cuanto a MRI? • De producirse un fallo, ¿son graves las consecuencias? • ¿Cuán poca es la resiliencia del sistema?
Potencial de la SbN 	• ¿Hay potencial significativo para la implementación de SbN? (Por ejemplo, ¿son factibles?). • ¿Hay suficiente espacio o elementos en pie que podrían mejorarse? • ¿Se podrían obtener cobeneficios significativos en relación con los que proporciona el sistema MRI en pie?
Apoyo 	• ¿Cuenta el proyecto con el apoyo de la comunidad? • ¿Se dispone de suficientes conocimientos especializados, fondos y otros recursos para llevar a cabo el proyecto?

3.3 Evaluación de opciones de reconversión

Una vez establecida una lista de sitios prioritarios para la reconversión utilizando el marco descrito en el apartado 3.2, la siguiente etapa consiste en evaluar las diferentes opciones de MRI disponibles, con el objetivo de tomar una decisión fundamentada sobre la mejor opción de manejo de riesgos costeros a implementar. Para comprender plenamente los beneficios que ofrecen las SbN —y poder comunicarlos a titulares de derechos, partes interesadas y otras—, se recomienda evaluar las opciones de SbN junto con las alternativas grises convencionales y un enfoque de “no hacer nada” en el contexto de la estrategia global de MRI. Además, realizar un análisis multicriterio —basado en criterios múltiples— junto con una evaluación de cobeneficios facilita la adopción de un enfoque integral para identificar todos los posibles beneficios, al tiempo que evita el planteamiento de ventajas poco realistas. Este tipo de análisis reviste especial utilidad para mitigar la posibilidad —y la percepción— de “lavado verde de imagen” (*greenwashing*): prácticas y publicidad engañosas en materia de responsabilidad ambiental.

En el apartado 3 del documento de orientación sobre cobeneficios (asociado al presente informe) se analiza en detalle un enfoque recomendado para identificar, comparar y priorizar posibles opciones de MRI en función de los beneficios y cobeneficios de la solución a considerar. Este marco se resume en el contexto de la reconversión en la Gráfica 24 y se describe a continuación.

Gráfica 24. Marco conceptual para la evaluación de opciones de MRI



3.3.1 Paso 2.1: Identificar las opciones de MRI y los cobeneficios asociados

El primer paso consistirá en identificar las posibles opciones de diseño (incluidas las SbN, como se describe en el apartado 2) que podrían aplicarse para satisfacer las necesidades de MRI en los lugares considerados prioritarios en el paso 1.5, junto con las alternativas convencionales y un enfoque de no hacer nada. Se recomienda considerar la viabilidad de todas las posibles soluciones identificadas en este paso, de modo que sólo las que resulten viables desde el punto de vista técnico y logístico se incluyan en los siguientes pasos de evaluación y comparación. Entre las limitaciones a tener en cuenta se incluyen las relacionadas con el presupuesto, el cronograma, la disponibilidad de conocimientos especializados, la viabilidad de la construcción, la idoneidad del entorno, las restricciones físicas y la capacidad para cumplir con las restricciones reglamentarias o de permisos. Es posible que las personas encargadas de la toma de decisiones tengan que consultar a especialistas con experiencia en SbN para elaborar una lista de soluciones viables.

También es necesario definir los plazos generales del proyecto (basándose, por ejemplo, en otros anteriores similares y en los requisitos de financiamiento), los desafíos y objetivos locales y una amplia lista de posibles cobeneficios. Es importante determinar y tener en cuenta los cobeneficios en esta fase inicial, para maximizar el valor del proyecto y evitar que los cobeneficios sean una ocurrencia tardía. Además, permite efectuar una comparación y evaluación más sólidas de las distintas soluciones de MRI disponibles, ya que todos los beneficios (y no sólo los de MRI) asociados al proyecto pueden considerarse y compararse entre sí. Este punto resulta de especial importancia cuando se consideran las SbN junto con opciones de MRI grises más convencionales, que a menudo no valoran lo suficiente los cobeneficios. Véase el apartado 3 del documento de orientación sobre cobeneficios para obtener más información relativa a este paso del proceso de evaluación de los beneficios colaterales asociados.

La participación de figuras clave, partes interesadas, especialistas y comunidades indígenas en esta etapa y a lo largo del resto del proceso (según se describe en el paso 1.2) reviste fundamental importancia, ya que contribuye a identificar los objetivos en materia de MRI y probablemente también a poner de relieve importantes cobeneficios que deben priorizarse. Por ejemplo, es posible que algunas figuras clave hayan expresado la necesidad de mejorar los espacios recreativos, lo que podría conducir a una más alta valoración o clasificación de diversos tipos de SbN en comparación con opciones convencionales grises.



Resultado: Lista de posibles cobeneficios, limitaciones del proyecto y opciones viables de MRI para los sitios prioritarios.

3.3.2 Paso 2.2: Valorar los cobeneficios

El paso 2.2 tiene como objetivo asignar valor a los cobeneficios esperados y alcanzables asociados con cada opción de reconversión preseleccionada en el paso 2.1. Es importante destacar que el valor no es necesariamente monetario y puede referirse a la importancia, valía o utilidad relacionadas con un cobeneficio (DHI, 2022a). Las opciones han de evaluarse y priorizarse en función de la capacidad para cumplir los objetivos del proyecto y de las partes interesadas, su viabilidad, incertidumbre, beneficios y ventajas y desventajas, presupuesto, cronograma y limitaciones por cuanto a conocimientos especializados. Los pasos clave de este proceso incluyen los siguientes:

- identificar limitaciones en los métodos de valoración de cobeneficios;
- seleccionar un método de valoración adecuado;
- decidir sobre los indicadores de desempeño asociados con cada cobeneficio;
- establecer valores de referencia para cada cobeneficio, que sirvan como punto de partida para evaluar los beneficios del proyecto, y
- llevar a cabo la valoración de los cobeneficios.



Resultado: Lista de cobeneficios valorados para cada opción de reconversión.

El documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe) ofrece en el apartado 3.4 una descripción detallada de este paso en el proceso de evaluación de cobeneficios.

3.3.3 Paso 2.3: Comparar opciones

Una vez identificados y valorados los posibles cobeneficios de cada solución viable, se puede realizar una comparación de las diferentes opciones de diseño para cada opción de reconversión, para lo cual existen varias herramientas, entre otras:

- análisis FODA (fortalezas, debilidades, oportunidades, amenazas);
- análisis costo-beneficio;
- análisis multicriterio (basado en criterios múltiples);
- matriz de Pugh;
- análisis de las causas fundamentales;
- análisis de árbol de decisión;
- pruebas A/B;
- creación de prototipos;
- pruebas de usuario, y
- encuesta o cuestionario.

Debido al carácter a menudo intangible de algunos cobeneficios y a la complejidad que implica darles un valor monetario, recomendamos utilizar un análisis basado en criterios múltiples para ponderar y comparar los cobeneficios asociados a cada opción de MRI. Los cobeneficios deben ponderarse en función de su importancia y prioridad para el equipo del proyecto, las partes interesadas y las personas o entidades titulares de derechos del lugar en cuestión. Consúltense el apartado 3.5.3 del documento de orientación sobre cobeneficios asociado al presente informe, para obtener más detalles sobre el análisis multicriterio.

La etapa de comparación tiene como objetivo identificar la(s) opción(es) de reconversión que mejor se adapte(n) a los objetivos del proyecto y de las partes interesadas mediante un análisis multicriterio

—basado en criterios múltiples— de los beneficios y cobeneficios esperados del MRI. Las opciones con la puntuación más alta en el análisis proporcionarán —en teoría— el mayor número de beneficios, dadas las necesidades del proyecto. Sin embargo, los resultados del análisis sólo deben utilizarse como elemento de apoyo y orientación para la toma de decisiones. Aun así, al seleccionar la opción preferida, se deben considerar con detenimiento las necesidades, limitaciones y elementos de concesión o compromiso específicos del proyecto. En particular, también se deben considerar las disyuntivas entre los cobeneficios asociados y la provisión de cobeneficios equitativos entre las partes interesadas y las personas o entidades titulares de derechos.

Con toda probabilidad, la prestación de determinados beneficios (por ejemplo, los menores niveles de inundación) revestirá especial importancia, y en esta fase podría completarse una modelización o un análisis más detallado de varias de las opciones mejor valoradas para confirmar las evaluaciones.



Resultado: Las posibles opciones de MRI se califican mediante un análisis multicriterio, para facilitar la selección de una alternativa preferida para la reconversión.

4 Consideraciones administrativas para la reconversión

En este apartado se describen las principales consideraciones administrativas para sustentar la toma de decisiones relacionadas con la reconversión de sistemas de infraestructura en pie mediante SbN. Asimismo, se sintetizan consideraciones relacionadas con la delimitación del alcance de un proyecto; las funciones y responsabilidades; los desafíos por cuanto a la obtención de financiamiento; el marco reglamentario aplicable, y la elección del momento oportuno para la instrumentación. Las consideraciones técnicas se examinan en el apartado 5.

4.1 Delimitación del alcance

La primera fase del marco para la ejecución de un proyecto de SbN (véase la gráfica 20) es la delimitación del alcance, la cual implica, en términos generales, comprender de manera clara las necesidades del proyecto y definir sus limitaciones. La delimitación del alcance debe llevarse a cabo como parte de una estrategia amplia de MRI basada en sistemas, en lugar de centrarse en sitios individuales. Como ejemplos de estrategias de MRI basadas en sistemas, cabe mencionar el Marco de Adaptación al Aumento del Nivel del Mar de la Bahía de San Francisco (*San Francisco Bay Sea-level Rise Adaptation Framework*) (Point Blue Conservation Science, 2019) y los planes de manejo de la línea costera para Inglaterra y Gales (Environment Agency, 2022).

El apartado 3 detalla paso a paso el proceso de exploración y delimitación del alcance de las oportunidades de reconversión para una cartera de activos de MRI en pie y la identificación de opciones adecuadas. Bridges *et al.* (2021) ofrecen también una descripción exhaustiva de los pasos y resultados relacionados con esta fase. Entre las posibles tareas y consideraciones relacionadas con la delimitación del alcance de un proyecto de reconversión se incluyen las siguientes:

- Identificar e involucrar a las personas o entidades que colaboran en el proyecto, especialistas, actores y partes interesadas (véase el apartado 4.2).
- Consultar proyectos similares llevados a cabo en el pasado, e incluir los resultados de actividades previas destinadas a propiciar la participación.
- Definir de forma colaborativa la problemática, objetivos, necesidades y metas del proyecto.
- Describir el sistema (es decir, los procesos físicos, ambientales, sociales y económicos importantes).

- Empezar a identificar las limitaciones del proyecto (incluidas las espaciales, temporales, reglamentarias, de gobernanza y financieras) y las oportunidades de reconversión (véanse los apartados 3.2 y 4.2 a 4.6).
- Comenzar a determinar las posibles opciones de reconversión (véase el apartado 2).
- Determinar los posibles mecanismos de recaudación de fondos y financiamiento (véase el apartado 4.4).
- Preparar un presupuesto inicial (aproximado) para el proyecto, que debe cubrir los costos relacionados con la planificación y el diseño, la construcción, el monitoreo y manejo adaptativo y el mantenimiento.
- Asegurar el financiamiento para comenzar los análisis preliminares, incluidas la evaluación de las condiciones de referencia y una exploración de las opciones (véase el apartado 3.3).

Durante la fase de delimitación del alcance también es importante comprender, en términos generales, las consideraciones técnicas pertinentes (véase el apartado 5).

4.2 Funciones y responsabilidades

Especialistas que participaron en el taller de la CCA (DHI, 2022b) identificaron a gobiernos, comunidades locales, promotores, inversionistas, personas o entidades propietarias de tierras y otras entidades del sector privado como protagonistas que podrían asumir responsabilidades en la implementación de SbN. En general, se identificó a los gobiernos como responsables en mayor medida. En Canadá, Estados Unidos y México, el traslape de jurisdicciones dificulta la identificación del orden de gobierno responsable de la zona costera; además, distintos niveles de gobierno y figuras no gubernamentales tienen autoridad, responsabilidad, exigencias o intereses respecto de la costa. Los pueblos indígenas y los gobiernos federales, estatales, provinciales y municipales tienen jurisdicción en las zonas costeras y marinas, y sus intereses podrían no coincidir. Más aún, en estas zonas pueden aplicarse también muy diversas leyes, tratados, derechos soberanos y declaraciones (incluida la Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas); de ahí la importancia de que todos los niveles de gobierno asuman su parte de responsabilidad y actúen de forma colaborativa con vistas a proporcionar un marco de políticas y normativo que facilite la implementación de soluciones basadas en la naturaleza.

Los gobiernos federales asumirán muy probablemente las responsabilidades de más alto nivel en la creación y administración de políticas y reglamentos, financiamiento y orientación, amén de ser responsables del establecimiento y la distribución de programas de financiamiento a los que los gobiernos locales tienen derecho a aplicar (véase el apartado 4.4). Asimismo, tienen a su cargo ciertos activos de infraestructura pública, como autopistas e infraestructura militar, los cuales podrían requerir MRI. Por ejemplo, el gobierno federal de Estados Unidos está dando prioridad a la reconversión de bases militares con SbN (La Casa Blanca, 2022) y considerando el uso de este tipo de soluciones para aumentar la resiliencia de las autopistas costeras (Administración Federal de Carreteras, 2018). Las dependencias gubernamentales estatales o provinciales serán responsables de definir políticas, objetivos y reglamentos más detallados que satisfagan las necesidades específicas de su región, al tiempo que se encargarán de proporcionar recursos financieros. A los gobiernos estatales y provinciales corresponde la administración de cierto tipo de infraestructura que puede requerir reconversión. Por ejemplo, en Canadá, la administración tanto de la infraestructura vial como la de los diques regulados corresponde a las provincias.

Los gobiernos locales tendrán por tarea establecer políticas y disposiciones reglamentarias, en especial en relación con los objetivos y las políticas de planificación del uso del suelo, que faciliten y fomenten la adopción de SbN (Pathak *et al.*, 2022). Es probable que los gobiernos locales asuman

gran parte de la responsabilidad de determinar necesidades, preparar planes de proyectos y ejecutarlos, ya que a menudo serán los activos costeros en pie dentro de su jurisdicción y la cartera de infraestructura existente los que estarán sujetos a reconversión. Del mismo modo, las comunidades indígenas asentadas en las costas habrán de tener en cuenta su infraestructura costera, necesidades y políticas en cuanto a MRI y el potencial de las SbN para satisfacer esas necesidades.

Teniendo en cuenta la fragmentación de la gobernanza y los múltiples intereses de las partes interesadas en la zona costera, cobra especial importancia que quienes son responsables de la toma de decisiones trabajen en colaboración con todos los niveles de gobierno, pueblos indígenas, personas o entidades titulares de derechos, comunidades locales, diversas organizaciones (por ejemplo, autoridades de conservación), organismos de autorización y partes interesadas en las primeras etapas de los procesos de implementación de SbN, a fin de garantizar que se tengan en cuenta e incorporen las necesidades de todas las partes. El estudio de caso 8 ofrece una descripción de la iniciativa *Living Dike* [Dique vivo] en Columbia Británica, Canadá, que reúne en una mesa redonda a representantes (incluidas las Primeras Naciones locales, todos los órdenes de gobierno, organizaciones sin ánimo de lucro, la academia y especialistas de la industria) para llevar a cabo la reconversión de la infraestructura de diques en pie utilizando marismas salobres. En el apartado 4.3 se ofrece un análisis más detallado en relación con el involucramiento.

Las comunidades y las personas o entidades propietarias de tierras privadas comparten la responsabilidad de identificar necesidades; involucrar a gobiernos y autoridades locales o realizar acciones de cabildeo ante éstos, así como de participar en el proceso de involucramiento. Quienes poseen tierras privadas expuestas a riesgos de inundación o erosión podrían considerar la reconversión de la línea costera utilizando SbN a fin de mitigar estos riesgos.

La responsabilidad del diseño y la ejecución de los proyectos de SbN recaerá en el equipo a cargo. Como ocurre con cualquier proyecto de SbN, los procesos de reconversión que utilizan este tipo de soluciones requerirán un equipo multidisciplinario de personas profesionales calificadas y, a menudo, la inclusión de especialistas con conocimientos y experiencia locales (Suedel *et al.*, 2021; Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2016). Los proyectos de SbN que abordan el MRI en las costas suelen estar dirigidos por especialistas en geomorfología e ingeniería costeras y biología marina, con el apoyo de equipos que pueden incluir a especialistas en meteorología, cambio climático, hidrogeología e ingenierías geotécnica, estructural marina y civil, así como especialistas en medio ambiente (véase el apartado 5.2), ciencias sociales (apartado 5.3) y economía (apartado 5.4).

Estudio de caso 8. Iniciativa *Living Dike* [Dique vivo]

Iniciativa *Living Dike* [Dique vivo]:

Uso de marismas salobres para adaptar infraestructura de diques

Boundary Bay,
Columbia Británica,
Canadá

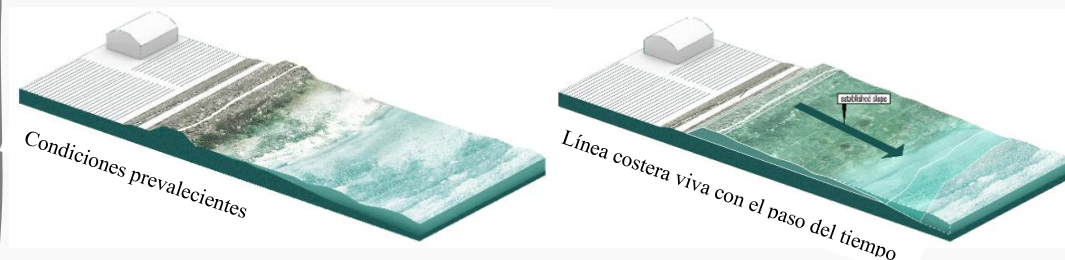
Con casi 400 hectáreas de marismas salobres y extensas llanuras de marea (Molnar *et al.*, 2021), Boundary Bay está bordeada por 15 km de diques, que protegen de las inundaciones costeras las tierras de cultivo, comunidades e infraestructura de las zonas bajas aledañas. Las marismas salobres presentes en la zona constituyen un hábitat importante para los salmones jóvenes y las aves migratorias, y sirven para disipar la energía de las olas en sus suaves pendientes antes de llegar al dique. A medida que aumente el nivel del mar, el prisma de marea se desplazará tierra adentro, obligando a las marismas existentes a migrar y comprimirse contra el dique. Este fenómeno se conoce como *compresión del litoral*. En consecuencia, la marisma salobre se reducirá de tamaño, lo que afectará tanto la disponibilidad de hábitats como la disipación de las olas. Por otro lado, el dique en pie no está diseñado para adaptarse al aumento del nivel del mar ni a una mayor exposición a las olas como resultado de la pérdida de marismas salobres (SNC-Lavalin, 2018).

A fin de adaptarse al aumento del nivel del mar, las ciudades de Surrey y Delta y la Primera Nación Semiahmoo emprendieron una colaboración (Molnar *et al.*, 2021) dirigida a implementar un enfoque innovador ideado originalmente por Westcoast Environmental Law y SNC-Lavalin en 2018: la iniciativa *Living Dike* [Dique vivo] (SNC-Lavalin, 2018; Carlson, 2020). Esta iniciativa consiste en rellenar de forma gradual la marisma existente con sedimentos finos para elevarla poco a poco a lo largo de muchos años (véase la Gráfica 25). La marisma y los organismos que la habitan podrán migrar y adaptarse a las condiciones cambiantes, sin interrumpir los servicios ambientales que prestan. Al ampliar y elevar la marisma, se reduce de manera considerable la necesidad de elevar la infraestructura de diques en pie a fin de adaptarse al aumento del nivel del mar.

La primera etapa de la iniciativa consiste en implementar un proyecto piloto para probar variantes del concepto *Living Dike* [Dique vivo] (ciudad de Surrey, 2022). La planificación, el diseño y la obtención de permisos comenzaron en 2020, y está previsto que la construcción comience en 2023 y finalice en 2027. Los proyectos piloto se están elaborando con la orientación técnica de una mesa redonda de representantes, entre los que se incluyen las Primeras Naciones locales, todos los niveles de gobierno, organizaciones sin ánimo de lucro, instituciones académicas y especialistas de la industria. La información obtenida del proyecto piloto servirá de base para las etapas posteriores y la planificación de las medidas de adaptación en la región.

Los fondos para el proyecto piloto se obtuvieron del Fondo de Mitigación y Adaptación ante Desastres de Infraestructura (*Disaster Mitigation and Adaptation Fund*) de Canadá y de la Secretaría de Planificación de Emergencias de las Primeras Naciones (*First Nations Emergency Planning Secretariat*).

Gráfica 25. Ilustración conceptual de las condiciones prevalecientes (izquierda) y diseño del posible dique vivo futuro (derecha)



Fuente: Lokman, 2022.

4.3 Comunicación e involucramiento

Los proyectos de reconversión de SbN ofrecen una amplia diversidad de oportunidades de participación, que deben maximizarse en aras de mejores resultados. Involucrarse en un proyecto de reconversión que utilice SbN implica comunicarse con el equipo responsable de su ejecución y con las partes interesadas y las personas o entidades titulares de derechos pertinentes. Es importante que el proceso de involucramiento se ponga en marcha pronto en la fase de delimitación del alcance, de manera que mediante un proceso participativo se defina cuál es la problemática a resolver y cuáles las necesidades futuras, y se establezcan las alternativas preferidas para el proyecto (Bridges *et al.*, 2021). Con este fin ha de elaborarse un plan de recursos y participación en las primeras etapas del proyecto, dirigido a garantizar la disponibilidad de recursos suficientes (lo mismo de fondos que de conocimientos especializados) para llevar a cabo todas las actividades de colaboración y comunicación. Los planes orientados a propiciar la participación han de reevaluarse con frecuencia para garantizar que el grado y el tipo de involucramiento siguen ajustándose al propósito del proyecto (Bridges *et al.*, 2021). Es importante señalar que dicho involucramiento debe ser inclusivo, equitativo, accesible y significativo para todas aquellas personas que puedan verse directamente afectadas por el proyecto específico o que tengan interés en el mismo (Bridges *et al.*, 2021; BID, 2020).

Comprender el grado de involucramiento necesario —es decir, leve, moderado o extenso— en cada una de las etapas del proyecto, ayudará a determinar las acciones concretas a emprender. Las situaciones que requieren un involucramiento leve pueden caracterizarse como proyectos con bajo nivel de conflicto o incertidumbre, pocas oportunidades de decisión y escaso interés de las partes interesadas. El recuadro 18 ofrece ejemplos de involucramiento leve en el contexto de las etapas de un proyecto de reconversión con SbN (adaptado de Bridges *et al.*, 2021). Se puede decir que las situaciones donde se requiere de una participación moderada corresponden a proyectos con un conflicto relativamente bajo, donde es necesario involucrar a múltiples partes interesadas y evaluar posibles consecuencias adversas y los elementos de concesión o compromiso asociados. Las situaciones de amplia participación pueden caracterizarse como proyectos con un alto potencial de conflicto o incertidumbre, en los que podrían verse afectadas múltiples partes interesadas —y muy probablemente de manera desproporcionada— y que requieren un alto grado de involucramiento comprometido (Bridges *et al.*, 2021). Es importante tener en cuenta los resultados y comentarios de cualquier trabajo de consulta previo realizado para proyectos o en entornos similares en el pasado. Aunque se recomienda una participación plena (a fondo) cuando así convenga, el grado de involucramiento alcanzado dependerá también de las limitaciones de tiempo y recursos de cada proyecto. El capítulo 3 del documento *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] del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (Bridges *et al.*, 2021) constituye una referencia minuciosa de las actividades de involucramiento recomendadas a completar en todo proyecto de solución basada en la naturaleza.

Recuadro 18. Ejemplos de acciones encaminadas a procurar la participación en todas las etapas de un proyecto de reconversión con SbN que requiere un involucramiento leve de las partes interesadas (adaptado de Bridges *et al.*, 2021)

Delimitación del alcance 	• Determinar el involucramiento general requerido. • Identificar a figuras clave y partes interesadas. • Crear un plan para procurar el involucramiento.
Planificación 	• Con las partes interesadas pertinentes, realizar actividades que propicien la participación. • Recabar comentarios sobre actividades específicas. • En la medida de lo posible, aumentar el nivel de detalles y mejorar la calidad.
Diseño 	• Presentar un plan final a los grupos de interés pertinentes o afectados. • Comunicar qué actividades se llevarán a cabo y cuándo. • Indicar a quién contactar en caso de surgir alguna inquietud.
Implementación 	• A medida que se recopilen nueva información y datos, el plan de participación deberá revisarse, ajustarse o adaptarse.
Operación 	• Mantener el involucramiento durante las tareas de manejo y monitoreo. • Asegurarse de que las partes interesadas afectadas estén informadas con regularidad sobre las actividades de manejo, mantenimiento y monitoreo.

Al involucrarse desde el principio, las partes interesadas y las personas que participan en el proyecto podrán determinar nuevas oportunidades para incorporar múltiples beneficios desde sus perspectivas y objetivos particulares (Bridges *et al.*, 2021). La introducción de un grupo diverso de partes interesadas (ONG, gobiernos locales y regionales, industria local, personas científicas e investigadoras, titulares de tierras, grupos indígenas marginados e integrantes de la comunidad, entre otros) aumenta las posibilidades de aceptación o financiamiento por parte de grupos motivados, si saben que sus inversiones se maximizarán en virtud de los cobeneficios (Brill *et al.*, 2021). Para ello, tal vez se requiera adoptar distintas estrategias de comunicación si se quiere interactuar con eficacia con una variedad de públicos, de modo que todos los grupos de interés puedan familiarizarse con los objetivos y las necesidades del proyecto.

Para obtener más información sobre el involucramiento de las partes interesadas, consúltese el apartado 3.3 del documento de orientación sobre cobeneficios.

4.4 Financiamiento

Los fondos para financiar proyectos de SbN pueden provenir de muy diversas fuentes, como instituciones financieras internacionales, gobiernos, ONG e instituciones privadas. Sin embargo, en el taller de la CCA se destacó que el acceso a estos fondos es uno de los mayores desafíos a abordar (DHI, 2022b). En el presente documento se ofrece una visión general de los diferentes tipos de

financiamiento y algunos ejemplos, y más detalles sobre oportunidades de financiamiento se presentan en el apartado 3.3 del documento *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*. También se encontrará información adicional al respecto en Silva Zúñiga *et al.* (2020) y Pathak *et al.* (2022), en tanto que en la Plataforma de Conocimiento sobre Crecimiento Verde y la Plataforma de Finanzas Verdes para América Latina y el Caribe (véase el recuadro 19) se detallan oportunidades de financiamiento nuevas o de reciente aparición.

En la actualidad, el financiamiento gubernamental representa la fuente de recursos más común para las SbN (PNUMA, 2021) y se obtiene principalmente mediante subvenciones federales (como el programa Construyendo Comunidades e Infraestructura Resilientes [*Building Resilient Infrastructure and Communities*] en Estados Unidos y el Fondo de Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza [*Nature Smart Climate Solutions Fund*] en Canadá); subvenciones estatales (como el Programa de Costas Resilientes de Florida [*Florida Resilient Coastlines Program*]), y préstamos otorgados por gobiernos locales (Pathak *et al.*, 2022). Cabe mencionar que, aunque son menos propensos a ofrecer financiamiento dadas sus limitaciones presupuestarias, los gobiernos locales podrían explorar opciones de asociación con el sector privado. Otros mecanismos de financiamiento gubernamentales podrían incluir créditos de carbono (véase el apartado 6.2.2), préstamos y bonos (véase, por ejemplo, Global Centre on Adaptation, 2021). En el recuadro 19 se ofrece una breve lista de oportunidades de financiamiento disponibles a través de instituciones internacionales y gobiernos federales; si bien no pretende ser exhaustiva, esta lista sirve para ilustrar las principales fuentes de financiamiento disponibles.

México cuenta con dos fondos que promueven el manejo de riesgos por inundación: el Fondo de Desastres Naturales (Fonden) y el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden). El Fondo Sectorial de Investigación Ambiental financia iniciativas destinadas a aumentar la resiliencia local ante los efectos del cambio climático (OCDE, 2021). Con todo, la asignación presupuestaria para la implementación y el monitoreo de las SbN es escasa; de ahí el papel fundamental que han desempeñado agencias de desarrollo internacionales, bancos multilaterales y el sector privado a la hora de facilitar iniciativas de SbN en México. Por ejemplo, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) está trabajando para involucrar al sector privado en el desarrollo de mecanismos alternativos de financiamiento no gubernamentales, reconociendo que aumentar los fondos destinados a SbN con cargo al presupuesto público podría no ser factible (PNUD BIOFIN, 2021).

Recuadro 19. Ejemplos de programas de financiamiento internacionales y específicos de cada país

Instituciones internacionales	
• Fondo Verde del Clima (<i>Green Climate Fund</i>)	
Programas de financiamiento del gobierno de Canadá	
• Fondo de Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza (<i>Nature Smart Climate Solutions Fund</i>)	
• Fondo de Mitigación y Adaptación ante Desastres (<i>Disaster Mitigation and Adaptation Fund</i>)	
• Fondo de Infraestructura Natural (<i>Natural Infrastructure Fund</i>)	
Programas de financiamiento del gobierno de Estados Unidos	
• Construyendo Comunidades e Infraestructura Resilientes (<i>Building Resilient Infrastructure and Communities</i>)	
• Fondo Nacional de Resiliencia Costera (<i>National Coastal Resilience Fund</i>)	
Programas de financiamiento del gobierno de México	
• Fondo de Desastres Naturales (Fonden)	
• Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden)	
Recursos	
• Restaura tu costa (<i>Restore Your Coast</i>) (recurso de búsqueda de fuentes de financiamiento para proyectos en Estados Unidos)	
• Plataforma de conocimiento sobre crecimiento verde (<i>Green Growth Knowledge Platform</i>)	
• Finanzas verdes para América Latina y el Caribe (<i>Green Finance for Latin America and the Caribbean</i>)	
• sitio web de actualización de fondos para combatir el cambio climático “Climate Funds Update”	

El sector privado ofrece financiamiento mediante créditos, bonos verdes y seguros. El estudio de caso 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) ofrece un ejemplo de seguro utilizado para financiar las actividades de monitoreo y mantenimiento del Sistema Arrecifal Mesoamericano en Quintana Roo, México (TNC, 2021). En Canadá se están implementando nuevos incentivos inspirados en este proyecto mexicano. La Iniciativa de Activos Naturales (*Natural Assets Initiative*) se asoció con Swiss Re y la Oficina de Aseguradoras de Canadá (*Insurance Bureau of Canada*) en un proyecto piloto para formular nuevas soluciones de seguros para los gobiernos locales, que proporcionarían una indemnización por los daños a los activos naturales que brindan protección frente a las inundaciones (MNAI, 2023; IBC, 2023). Los bonos de impacto ambiental han tenido éxito en la asociación de inversionistas con municipios para la planificación de proyectos ambientales; por ejemplo, el primer bono de impacto ambiental en Estados Unidos financió el proyecto sobre aguas pluviales de la District of Columbia Water and Sewer Authority, dependencia responsable del suministro de agua y el alcantarillado en el Distrito de Columbia (Quantified Ventures, 2022) y podría aplicarse igualmente a proyectos de soluciones basadas en la naturaleza.

Cada vez se cuenta con más oportunidades creativas de financiamiento, como las asociaciones público-privadas, un modelo común para obtener fondos que implica la colaboración o asociación de entidades de ambos sectores para financiar proyectos (Eyquem, 2021), así como el financiamiento mixto (por ejemplo, Earth Security, 2021). Como alternativa a las opciones convencionales para obtener fondos y financiamiento, las comunidades pueden recaudar capital para proyectos a pequeña escala a través de programas tanto de financiamiento colectivo y como de subvenciones comunitarias (Pathak *et al.*, 2022). Los promotores también están incorporando cada vez más las SBN en los desarrollos costeros para atraer inversión privada.

4.5 Marco reglamentario

Las SbN estarán sujetas a distintos niveles de disposiciones reglamentarias gubernamentales, ya que los gobiernos federales, provinciales, estatales, territoriales, municipales e indígenas ostentan todas las responsabilidades en materia de MRI (véanse, por ejemplo, Vouk *et al.*, 2021, y West Coast Environmental Law, 2022). En el ámbito federal o nacional, la normativa aplicable a las SbN suele enmarcarse en la reglamentación general sobre cambio climático, adaptación frente a sus efectos, MRI o infraestructura. A veces se hace referencia directa a las SbN, pero no siempre se definen reglamentos y objetivos específicos al respecto (DHI, 2022b; Rahman *et al.*, 2019). Por lo tanto, existe la oportunidad de incorporar las SbN de manera más exhaustiva en el panorama normativo a medida que se conviertan en una solución más aceptada y con la que se tenga más familiaridad.

Debido a la complejidad del traslape de jurisdicciones y a la diversidad del panorama normativo entre un país y otro, así como al interior de cada uno de ellos, será necesario contar con el asesoramiento especialistas locales para poder desenvolverse en el entorno normativo que afecta la reconversión de infraestructura de MRI en pie con SbN en una localidad en particular.

En América del Norte se están introduciendo políticas y reglamentos específicos para SbN. Estados Unidos ha anunciado la implementación de una política federal en materia de SbN, como se destaca en el estudio de caso 9, que establece intenciones, objetivos y soluciones para estos sistemas y sienta las bases de un marco normativo. La Ley Bipartidista de Infraestructura (*Bipartisan Infrastructure Law*) constituye, hoy en día, el principal marco de referencia reglamentario que impulsa las SbN en Estados Unidos (La Casa Blanca, 2022), sobre todo brindando orientación y financiamiento a las dependencias gubernamentales competentes en materia de costas, como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA) (NOAA, 2022a). El gobierno de Canadá publicó la Estrategia Nacional de Adaptación (*National Adaptation Strategy*) (2023), un marco de acción de alcance nacional para implementar soluciones de adaptación como las SbN, así como el Plan de Acción de Adaptación (*Adaptation Action Plan*) que orientará futuros programas e inversiones federales en este ámbito (ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá, 2023).

México dispone de un marco normativo y de políticas, pero su aplicación se encuentra en una fase incipiente (DHI, 2022b). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) es la institución con mayor implicación directa en la planificación y aplicación de las SbN en todo el país (OCDE, 2021), las cuales comenzaron a incluirse de forma reciente en algunas de las políticas nacionales de mayor relevancia (por ejemplo, el Programa Nacional Hídrico y el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024) (OCDE, 2021). En México son varias las instituciones gubernamentales que participan en el manejo, aprovechamiento y urbanización de las zonas costeras, y existen más de 40 leyes y reglamentos aplicables a estas zonas. Algunas de las leyes federales de relevancia en materia de SbN son la Ley General de Bienes Nacionales, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General de Vida Silvestre, la

Ley General de Cambio Climático y la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano.

Las políticas y normativa de nivel superior establecen los objetivos que deben seguir los gobiernos estatales, provinciales y locales a la hora de formular sus propias disposiciones, mucho más detalladas y concebidas específicamente para satisfacer las necesidades de la localidad o zona en cuestión. En los tres países, el marco reglamentario de cada provincia o estado influye de manera significativa en los proyectos de SbN, ya que es necesario cumplir los requisitos establecidos en dicha normativa para obtener los permisos y autorizaciones de construcción correspondientes. La reglamentación estatal o provincial aplicable a SbN figura en los reglamentos relativos a la adaptación, el manejo de desastres, la protección del medio ambiente, infraestructura y planes de manejo costero. Por ejemplo, la Ley de Costas de California (*California Coastal Act*) establece la reglamentación relativa a los desarrollos costeros en el estado (Comisión Costera de California, 2023), y en Canadá una reglamentación provincial similar es la Ley de Protección Costera de Nueva Escocia (*Nova Scotia Coastal Protection Act*) (Nueva Escocia, 2021).

A escala local, la normativa aplicable a las SbN en los tres países se relaciona principalmente con la planificación del uso del suelo (Pathak *et al.*, 2022), la adaptación al cambio climático y las políticas sobre medio ambiente. La reglamentación local en materia de medio ambiente y concesión de permisos de urbanización será la de mayor repercusión en los proyectos de SbN; de ahí que los proyectos deban diseñarse de manera que se ciñan a los requisitos establecidos en la normativa específica municipal y urbanística en materia de edificación o construcción en las zonas costeras, así como a la reglamentación ambiental aplicable, para ser aprobados.

Estudio de caso 9. Apoyo financiero y en políticas del gobierno federal para la adopción de SbN

Hoja de ruta para soluciones basadas en la naturaleza:

Estados Unidos

Apoyo financiero y normativo del gobierno federal para la adopción de SbN en Estados Unidos

En 2022, el gobierno de Estados Unidos anunció la Hoja de Ruta de Soluciones Basadas en la Naturaleza (Consejo de Calidad Ambiental de La Casa Blanca, 2022), con el objetivo de “[...] desbloquear todo el potencial de las soluciones basadas en la naturaleza para abordar el cambio climático, la pérdida de naturaleza y la desigualdad” (La Casa Blanca, 2022). La hoja de ruta se propone ofrecer tanto financiamiento como mecanismos reguladores para permitir la ejecución de SbN, al tiempo que proporciona liderazgo al centrarse en la reconversión de instalaciones y activos federales, a partir de los cuales se pondrán a disposición estudios de caso y directrices.

Los fondos disponibles provienen del programa “Construir Comunidades e Infraestructura Resilientes” (*Building Resilient Infrastructure and Communities*) de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (*Federal Emergency Management Agency*, FEMA) (FEMA, 2022), y se trabaja para que los trámites de solicitud de fondos sean más sencillos y accesibles. Se da prioridad al otorgamiento de fondos a comunidades desfavorecidas para ayudarlas a completar un análisis costo-beneficio, requisito para la obtención de permisos relacionados con proyectos de SbN (La Casa Blanca, 2022).

Desde una perspectiva de regulación, los requisitos de manejo de planicies aluviales de la FEMA obligarán a considerar la implementación de SbN “en todos los proyectos que puedan afectar planicies aluviales o humedales” (La Casa Blanca, 2022).

La hoja de ruta busca proporcionar orientación sobre herramientas para evaluar SbN, con un grupo de trabajo dedicado a elaborar directrices aplicables a análisis costo-beneficio específicos para proyectos de soluciones basadas en la naturaleza.

4.6 Elección del momento oportuno para adoptar SbN

Las oportunidades para emprender un proyecto de reconversión de infraestructura de MRI en pie utilizando SbN se presentan a lo largo de todo el ciclo de vida de los activos de protección costera, incluso en el momento de considerar tanto construcción nueva como reparaciones, modificaciones y reemplazos de elementos grises presentes. Sin embargo, la mayor oportunidad para acometer un trabajo de reconversión con SbN se presenta cuando la infraestructura de MRI en pie se acerca al final de su vida útil o necesita reparaciones. La reconversión mediante SbN puede considerarse en las etapas de planificación de mantenimiento, reparación o sustitución para satisfacer las crecientes y cambiantes necesidades de MRI y de las partes interesadas (Suedel *et al.*, 2021).

Otra posibilidad es considerar la reconversión —mediante SbN— de infraestructura de MRI en pie que actualmente se encuentre en buen estado (es decir, que no necesite reparación ni sustitución), pero que no satisfaga las necesidades actuales o futuras de MRI o no proporcione suficientes cobeneficios ambientales, económicos y sociales. Bajo la misma premisa, las zonas identificadas como de baja vulnerabilidad durante la fase previa de planificación y delimitación del alcance de oportunidades y opciones de reconversión (véase el apartado 3) podrían ser ahora más vulnerables debido a las cambiantes condiciones climáticas y al aumento de la densidad poblacional cerca de la costa, por ejemplo. Estas zonas podrían representar una oportunidad para implementar SbN, con una reconversión que se completaría como parte de las actividades de manejo adaptativo de la infraestructura de MRI en pie.

La duración del ciclo de ejecución de SbN (desde la conceptualización hasta la implementación) variará en gran medida en función de la complejidad del proyecto, lo dispuesto en la normativa local, las actividades encaminadas a propiciar la participación y otros factores específicos de cada proyecto. Sin embargo, en muchas ocasiones, la delimitación del alcance, la planificación, el diseño y la construcción de proyectos de SbN requieren entre uno y cinco años. El desempeño de estas soluciones suele variar con el tiempo, ya que puede retrasarse o mejorar a medida que los componentes vegetales se arraigan y el sistema se adapta en respuesta a los factores ambientales. Será necesario llevar a cabo tareas de manejo adaptativo y monitoreo para garantizar el éxito del proyecto (véase el apartado 5 para obtener más información sobre el desempeño variable relacionado con los componentes físicos y ambientales de las SbN). Con frecuencia, la construcción puede completarse en cuestión de una temporada, pero también puede extenderse durante varios años, sobre todo si es necesario aplicar un enfoque por fases o si se requieren labores intensivas de manejo adaptativo. El calendario de construcción variará en función del clima local, los intervalos ambientales de menor daño, las condiciones de marea favorables, las horas de luz y la disponibilidad de contratistas, entre otros factores. El monitoreo y el manejo adaptativo deben extenderse a lo largo de la vida del proyecto; estas tareas pueden presentar variaciones considerables, tema que se analiza en profundidad en el documento asociado *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*.

5 Consideraciones técnicas para la reconversión

El empleo de un enfoque basado en sistemas es fundamental cuando se tiene por objetivo utilizar SbN. Este tipo de enfoques incorporan una amplia diversidad de procesos e interconexiones físicos (ingeniería), ambientales y sociales —en una serie de escalas espaciales y temporales— en el plan de diseño e implementación (Vouk *et al.*, 2021). Las iniciativas de reconversión con SbN deben adoptar un enfoque similar, para lo cual es necesario tener en cuenta numerosos parámetros técnicos. A grandes rasgos, las consideraciones técnicas podrían dividirse en consideraciones de diseño tanto de ingeniería, como ambiental, social y económico. También hay que tener en cuenta desde el principio el tema del monitoreo y el manejo adaptativo a largo plazo. Este apartado ofrece una visión general de los principales aspectos técnicos a tener en cuenta.

5.1 Consideraciones de ingeniería

Los proyectos de reconversión basados en SbN pueden aportar inmensos beneficios sociales, ambientales y económicos (tal como se describe en el documento de orientación sobre cobeneficios) siempre y cuando cuenten con un buen diseño, se implementen de manera adecuada y se gestionen con un enfoque adaptativo. El objetivo de una reconversión basada en SbN será, por lo general, que se mantenga por sí sola y que su desempeño aumente con el paso del tiempo (Bridges *et al.*, 2021); sin embargo, debe preverse un manejo adaptativo, especialmente durante la fase de construcción y en los primeros años posteriores a ésta. La Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*) de Estados Unidos (US FHWA, 2018) sugiere tener en cuenta las siguientes preguntas en la fase de delimitación del alcance del proyecto para, desde una perspectiva de la ingeniería, orientar la evaluación de viabilidad y las etapas iniciales de definición de opciones:

- ¿Es viable desde el punto de vista técnico?
- ¿Es razonable?
- ¿Se justifica?
- ¿Se puede construir?

En la fase de diseño del proyecto (véase la gráfica 20), el equipo responsable del diseño deberá definir, entre otros detalles, los materiales, las dimensiones de la ubicación, las elevaciones, las pendientes y la metodología de construcción (Administración Federal de Carreteras, 2018). Además, habrá de incorporar consideraciones sociales, ambientales y económicas en el diseño y el manejo adaptativo.

Aunque algunos proyectos de reconversión con SbN pueden estar bien definidos en publicaciones con orientación técnica de diseño, muchos quedarán fuera de las directrices técnicas estándar y de los límites de las ecuaciones empíricas. En ese caso podría tener que recurrirse a modelos numéricos o físicos o proyectos piloto para sustentar, perfeccionar o probar el diseño (Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2016). Las herramientas de modelización numérica hidrodinámica, geomorfológica y del oleaje son de uso común cuando se trata de evaluar el desempeño de alternativas de diseño o de perfeccionar la disposición, pendientes, elevaciones o dimensiones de los materiales de un diseño ya en pie (Vouk *et al.*, 2021).

Las herramientas de modelización geomorfológica resultan particularmente útiles para conocer la estabilidad de los sistemas basados en sedimentos (la regeneración de playas, por citar un ejemplo) durante eventos de tormentas aisladas y, a largo plazo, determinar el impacto de las actividades humanas (como el dragado) y conocer la posible necesidad de obras de mantenimiento. Sin embargo, es necesario recopilar una gran cantidad de datos de campo que sirvan de base para la elaboración, calibración y validación de los modelos. Los modelos físicos, por otra parte, se utilizan muchas veces para proyectos de alto riesgo o cuando los modelos numéricos no son adecuados para resolver el problema (Vouk *et al.*, 2021; Wilson *et al.*, 2020), aunque suelen requerir bastante tiempo y recursos, y en América del Norte las instalaciones de que se dispone para llevar a cabo este tipo de trabajo son limitadas. El manejo adaptativo permite al equipo de diseño aprender de los resultados del monitoreo y perfeccionar el diseño durante y después de la construcción para mejorar su desempeño (véase el apartado 5.5).

A continuación se ofrece una serie de preguntas técnicas más amplia, pero no exhaustiva, para orientar los aspectos de ingeniería relacionados con el diseño (adaptado de Administración Federal de Carreteras, 2018; BID, 2020; Suedel *et al.*, 2021; Vouk *et al.*, 2021; Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza, 2016):

Escalas espacial y temporal

- ¿Hay correspondencia entre la escala física y la escala de los procesos costeros?
- ¿Afecta la escala física la navegación o infringe tierras colindantes?
- ¿Tiene en cuenta el diseño los procesos de degradación, tanto aislados o discontinuos como crónicos?
- ¿Tiene en cuenta el diseño el tiempo de demora necesario para alcanzar el pleno desempeño?
- ¿Cuál es la vida útil (conforme a diseño) de los componentes estructurales grises?
- ¿Cuáles son las incertidumbres respecto a las condiciones futuras en el sitio? (Es decir, cuanto mayor sea la incertidumbre, más deseables se vuelven las SbN).

Diseño

- ¿Cómo se mantendrán los suministros de sedimentos, si no son autosuficientes?
- En respuesta a las condiciones morfológicas variables, los cambios en la vegetación o el crecimiento biológico, ¿se ha considerado la posibilidad de modificar el perfil transversal de la costa, la elevación de la cresta y la rugosidad?
- ¿Se han tenido en cuenta los procesos geotécnicos e hidrogeológicos?
- ¿Cómo contribuirán los componentes vivos (es decir, la vegetación y los agentes biológicos) al buen funcionamiento de los sistemas de MRI?

- ¿Cabe la posibilidad de que el diseño afecte de forma negativa estructuras en pie?
- ¿Funcionará el diseño tanto en las condiciones climáticas actuales como en las futuras, teniendo en cuenta una serie de incertidumbres?
- ¿Incorpora el diseño suficiente redundancia o desempeño residual de MRI teniendo en cuenta los procesos conocidos, las incertidumbres y el tiempo de demora?
- ¿Existen riesgos que no se han mitigado?

Construcción y mantenimiento

- ¿Cuándo y dónde se obtendrán los materiales para facilitar la construcción y el mantenimiento?
- ¿Cómo se verá afectada la construcción o el mantenimiento de las estructuras grises en pie?
- ¿Se ha considerado el “cierre” al final de la vida útil del diseño?

El documento titulado *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.*, 2021) constituye la guía más completa de diseño e implementación de SbN. Por cuanto a orientación práctica para el diseño de ingeniería, ha de consultarse el documento *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide* [Guía de implementación de soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia de las autopistas costeras] (US FHWA, 2018). El documento titulado *The Practical Guide to Implementing Green-Gray Infrastructure* [Guía práctica para implementar infraestructura verde-gris] (Green-Gray CP, 2020, p. 107) contiene una lista de documentos de orientación en materia de diseño de ingeniería para SbN disponibles. Para orientación sobre proyectos de reconversión con SbN, específicos para América Latina y el Caribe, véase el documento *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions* [Aumentar la resiliencia de la infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)] (BID, 2020). Obsérvese también que el multicitado documento de orientación sobre monitoreo de la eficacia de las SbN (asociado al presente documento) presenta información detallada sobre el componente de monitoreo de la fase de mantenimiento.

5.2 Consideraciones ambientales

La provisión de cobeneficios ambientales —como la conectividad de hábitats, la captación y el almacenamiento de carbono, y el mejoramiento de la calidad del agua y del aire— es un componente fundamental de los proyectos de SbN. Por todo ello, es fundamental comprender y observar los parámetros de referencia de la ecología y la biología del sistema para el diseño, la implementación y el manejo adaptativo de la reconversión mediante SbN. En particular, este conocimiento respalda el diseño y el manejo adaptativo de la SbN, incluida la decisión del tipo de elemento(s) y de material(es), ubicación y tamaño. La diversificación de los elementos y la inclusión de componentes adaptativos también contribuyen a la resiliencia de un sistema, al establecer múltiples líneas de defensa contra inundaciones y erosión (Vouk *et al.*, 2021).

Los sistemas ambientales evolucionan continuamente en respuesta a factores externos. La influencia del cambio climático y los impactos relacionados supondrán un desafío adicional para los sistemas ambientales (entre los que pueden incluirse las SbN), lo que dará lugar a su adaptación dinámica a corto, medio y largo plazo (Bridges *et al.*, 2021). La resiliencia de los sistemas ambientales es un factor clave para la funcionalidad, durabilidad y sustentabilidad a largo plazo de las SbN, que a su vez deben adaptarse al comportamiento natural de estos sistemas.

Con frecuencia se produce un desfase temporal entre la implementación de un proyecto y su pleno desempeño. El tiempo necesario para obtener todos los beneficios de una reconversión basada en SbN

puede ser difícil de estimar, pero debe tenerse en cuenta e integrarse en el cronograma del proyecto (es decir, gestionarse en las fases de diseño y manejo adaptativo), en el entendimiento de que existirá cierto grado de incertidumbre en cuanto al momento en que se obtendrán todos los beneficios. Esta incertidumbre puede abordarse consultando a especialistas dentro del equipo de diseño y aprendiendo de proyectos similares puestos en marcha en otros lugares. Además, el equipo del proyecto debe tener en cuenta las variaciones naturales del sistema, que pueden afectar el desempeño tanto del MRI como de los cobeneficios. Por ejemplo, la introducción de un sistema de arrecifes de usos múltiples puede requerir varias temporadas de desove antes de que se observen los resultados previstos en relación con la biodiversidad marina y el aumento de la abundancia de peces. La vegetación también presenta un desfase temporal entre la implantación y el crecimiento pleno, que puede variar desde una temporada de crecimiento hasta varios años, dependiendo de las circunstancias específicas del proyecto. El documento titulado *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.*, 2021) ofrece una guía completa sobre la importancia de tener en cuenta el ciclo de vida y su relación con el desempeño en constante cambio de las soluciones basadas en la naturaleza.

Al explorar y determinar las oportunidades y opciones, cabe la posibilidad de recurrir a muy diversos métodos para lograr los objetivos de un proyecto, pero siempre será necesario sopesar las ventajas y desventajas a fin de acotar las opciones. Por ejemplo, plantar especies invasoras de crecimiento rápido puede maximizar la capacidad de almacenamiento de carbono, pero a la vez causar impactos negativos en la vegetación nativa y la vida silvestre (polinizadores, aves e insectos, entre otros). En cualquier caso, los proyectos de reconversión mediante SbN nunca deberán mermar la resiliencia de un sistema ni afectar negativamente los valores ecológicos adyacentes (Al-Rajhi, 2020).

A continuación se ofrece un conjunto de preguntas técnicas con el fin de orientar los aspectos ambientales de un diseño de reconversión que utiliza SbN (adaptado de Bridges *et al.*, 2021; Vouk *et al.*, 2021; Pathak *et al.*, 2022):

Diseño

- ¿El objetivo principal de los componentes naturales es proporcionar servicios de MRI o mejorar el valor ecológico?
- ¿Brindará la SbN beneficios netos positivos para el medio ambiente?
- ¿Existen elementos de concesión o compromiso entre los cobeneficios individuales, en función de posibles desventajas o consecuencias adversas?
- ¿La SbN en cuestión proporcionará a los elementos y procesos naturales el espacio que necesitan para funcionar?
- ¿La SbN protege o restaura infraestructura natural crítica?
- ¿Cuáles son las condiciones ambientales óptimas requeridas en un lugar determinado?

Adaptación a los efectos del cambio climático

- ¿Afectará el cambio climático los activos naturales de los que dependerá la SbN para cumplir su función?
- ¿Pueden los componentes vivos (es decir, la vegetación y los agentes biológicos) soportar los factores de estrés ambientales esperados y aquellos que puedan surgir en el futuro?
- ¿Qué parámetros se necesitan para diseñar elementos de mejoramiento que sean sustentables durante la vida del proyecto y adecuados para hacer frente a los efectos previstos del cambio climático?

Construcción y manejo adaptativo

- ¿Cómo afectará la construcción los elementos vivos presentes?
- ¿De qué manera impactarán las actividades de monitoreo y mantenimiento en los elementos vivos presentes?

El documento de orientación *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* ofrece una extensa lista de posibles cobeneficios ambientales que pueden considerarse como parte de un proyecto de SbN. El informe *Use of Natural and Nature-Based Features for Coastal Resilience* [Uso de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza para reforzar la resiliencia de las costas] (Bridges *et al.*, 2015) brinda orientación adicional sobre el uso de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza para aumentar la resiliencia costera en un contexto de cambio climático.

5.3 Consideraciones sociales

La vulnerabilidad de las comunidades frente a los riesgos de inundación depende en gran medida de su capacidad para prepararse, responder y recuperarse de los peligros que entraña el cambio climático (Arkema *et al.*, 2017). Los principales factores de vulnerabilidad social frente a las amenazas costeras son las diferencias en el acceso a los recursos (económicos y tecnológicos, entre otros); poder (por ejemplo, la influencia política); capacidad (la capacidad social de respuesta), e información. Estos elementos contribuyen a las desigualdades en la respuesta y la recuperación ante desastres (Arkema *et al.*, 2017). La vulnerabilidad social suele ser desproporcionadamente mayor para las minorías y los grupos marginados y para las comunidades de bajos ingresos con altas tasas de pobreza (Arkema *et al.*, 2017). Las zonas con disparidad de ingresos suelen producir resultados socioeconómicos diferentes para un proyecto específico en función de su ubicación. Por ejemplo, al examinar los costos de reemplazo, un vecindario acaudalado podría recibir mayores inversiones en MRI para proteger propiedades de mayor valor, aunque brindar protección ante inundaciones a una comunidad más densamente poblada o de menores ingresos podría generar mayores beneficios no económicos (Arkema *et al.*, 2017). Por lo tanto, es importante plantear —lo mismo al interior que al exterior del equipo del proyecto, y desde su inicio— las interrogantes claves sobre equidad, pueblos indígenas y acceso enumeradas más adelante.

Es importante tener en cuenta que las poblaciones minoritarias, las comunidades históricamente marginadas y las clases socioeconómicas desfavorecidas suelen estar más expuestas a los riesgos climáticos debido a su ubicación geográfica, acceso a recursos, situación económica y régimen de propiedad de la tierra (Pathak *et al.*, 2022). A menos que los proyectos de reconversión con SbN se conciben teniendo en cuenta la equidad como consideración clave, las comunidades socialmente vulnerables seguirán enfrentándose de manera desproporcionada a los riesgos y desafíos derivados del cambio climático (Pathak *et al.*, 2022). Más aún, los grupos minoritarios, las comunidades marginadas y las personas con un estatus socioeconómico bajo suelen tener acceso limitado a medidas de reconversión mediante SBN capaces de proporcionar beneficios sociales y sanitarios, como espacios verdes que mejoran el bienestar mental, reducen las enfermedades crónicas y ofrecen lugares seguros para hacer ejercicio (Pathak *et al.*, 2022).

Los activos naturales y las mejoras ambientales suponen igualmente desafíos para las comunidades en situación de vulnerabilidad social, ya que aumentan los costos de vivienda o alquiler y el valor de las propiedades, lo que provoca gentrificación ecológica y desplazamiento. El equipo encargado del diseño del proyecto debe tener en cuenta las vulnerabilidades sociales y la capacidad de adaptación en las fases de planificación y diseño, y las autoridades locales deberán evaluar los diseños propuestos

para garantizar que el proyecto no agrave las vulnerabilidades socioeconómicas ni resulte desfavorable para estas comunidades (Pathak *et al.*, 2022). Las partes interesadas y las personas o entidades titulares de derechos deben participar desde el principio en el proceso de planificación para comprender las necesidades, los valores y las prioridades. Los elementos de concesión o compromiso entre los cobeneficios deben discutirse en detalle con dichas partes a efecto de maximizar los beneficios para esas comunidades y mejorar la aceptación pública.

Muchas zonas socialmente vulnerables coinciden con comunidades indígenas, que a menudo sufren marginación en la toma de decisiones públicas y privadas (Löfqvist *et al.*, 2022). En el caso de los pueblos indígenas de Canadá, Estados Unidos y México, los esfuerzos por impulsar soluciones climáticas y en favor de la biodiversidad no son nuevos, sino más bien un enfoque adoptado desde hace siglos (Reed *et al.*, 2022). En el proceso de ejecución de SbN, es importante que las perspectivas y los conocimientos indígenas —frecuentemente englobados en el término *conocimiento ecológico tradicional*— reciban al menos la misma consideración que los sistemas de conocimiento occidentales.

En resumen, los distintos tipos y la magnitud de los beneficios sociales que aporta la reconversión utilizando SbN deberían estar en gran medida determinados por las necesidades, los valores y las prioridades de las partes interesadas y personas o entidades titulares de derechos en la localidad. Por lo tanto, es necesario que los proyectos de reconversión mediante SbN tengan en cuenta consideraciones sociales. A fin de contribuir al diseño socialmente responsable de las SbN con una gobernanza inclusiva, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza publicó el *Estándar Global de Soluciones Basadas en la Naturaleza de la UICN* (UICN, 2020). A continuación se presentan una serie de preguntas técnicas para orientar los aspectos sociales del diseño de una SbN (adaptado de Pathak *et al.*, 2022, y Reed *et al.*, 2022):

Equidad

- ¿Está el equipo responsable del proyecto teniendo en cuenta la vulnerabilidad social y económica de las comunidades marginadas?
- ¿Existen implicaciones de equidad relacionadas con la reconversión mediante SbN?
- ¿Reducirá este proyecto de reconversión mediante SbN el riesgo para la comunidad objetivo?
- ¿Participan las partes interesadas locales y las personas o entidades locales titulares de derechos en las distintas fases del ciclo de ejecución de SbN (incluidas la delimitación del alcance, la planificación y la implementación)?
- ¿Existe una representación justa en el proceso de toma de decisiones?
- ¿Existe una asignación justa de recursos, costos y beneficios?

Comunidades indígenas

- ¿Han participado las comunidades indígenas locales en las distintas fases del ciclo de ejecución de SbN (delimitación del alcance, planificación e implementación)?
- ¿Incorpora el diseño el conocimiento ecológico tradicional y perspectivas indígenas?
- ¿Podría este proyecto propiciar o dar lugar a violencia y desposesión de tierras en contra de los pueblos indígenas?

Acceso

- ¿Tienen las personas afectadas acceso para participar en el proceso de toma de decisiones?
- ¿Se les brinda a las personas afectadas acceso a la información relevante para el proyecto?
- ¿Existen obstáculos en materia de transporte o accesibilidad que impidan a los grupos marginados beneficiarse del proyecto propuesto?

El documento sobre cobeneficios asociado al presente informe proporciona una extensa lista de posibles cobeneficios sociales que pueden considerarse como parte de un proyecto de SbN. El informe *Linking social, ecological, and physical science to advance natural and nature-based protection for coastal communities* [Vincular las ciencias sociales, ecológicas y físicas para promover la protección natural y basada en la naturaleza de las comunidades costeras] (Arkema *et al.*, 2017) aporta valiosos conocimientos e indicadores sociales para medir la vulnerabilidad social ante los riesgos costeros. El informe *Toward Indigenous visions of nature-based solutions: an exploration into Canadian federal climate policy* [Hacia visiones indígenas de soluciones basadas en la naturaleza: exploración de la política climática federal canadiense] destaca la importancia de apoyar la autodeterminación sustentable de las comunidades indígenas para impedir que se les causen más daños. El capítulo 3 del documento titulado *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.*, 2021) también presenta estrategias detalladas para el involucramiento de las partes interesadas.

5.4 Consideraciones económicas

Al evaluar diferentes opciones aplicables al MRI, hay una tendencia a centrarse en una comparación directa de costo-beneficio basada sólo en el desempeño en términos de MRI. Este tipo de evaluación no sólo desvaloriza los cobeneficios intangibles, como la equidad y la inclusión, sino que tampoco refleja el impacto económico completo a lo largo del ciclo de vida del proyecto. No tener en cuenta todos los impactos económicos relacionados con un proyecto conlleva consecuencias imprevistas y significativas. En el documento asociado sobre cobeneficios se proporciona un marco que los contempla en la valoración de los proyectos. Entre las alternativas al análisis costo-beneficio se incluyen las siguientes:

- determinación del valor económico
- análisis de insumo-producto
- análisis del costo del ciclo de vida
- análisis de riesgos
- análisis costo-beneficio social

Todos los proyectos de SbN deben considerar una gran variedad de cobeneficios económicos y evaluar el costo total y los ahorros e ingresos a lo largo de la vida del proyecto. Los costos se generan en todas las etapas del proceso de ejecución de SbN, incluso durante el diseño, la operación, la gestión, la construcción, el monitoreo y el manejo adaptativo. Los ingresos pueden generarse cuando los beneficios directos se monetizan, gracias al turismo, la creación de empleos o la compensación de emisiones de carbono, por ejemplo (BID, 2020). Las estimaciones de costos suelen efectuarse durante la fase de diseño (Aerts, 2018); no obstante, en la práctica no todos los costos y ahorros se materializan al mismo tiempo ni conforme a lo planeado, ya que las SbN tienden a evolucionar con el paso del tiempo (BID, 2020). Los costos y ahorros también varían en función de las fluctuaciones socioeconómicas que pueden afectar los costos de mano de obra, el suministro de materiales y el valor de la tierra (Aerts, 2018). Por lo tanto, es importante monitorear y evaluar los cobeneficios económicos del proyecto a medida que evoluciona, e informar de esos beneficios a las partes interesadas.

Los costos directos relacionados con proyectos de reconversión que utilizan SbN pueden desglosarse en categorías que incluyen diseño y construcción, operación y manejo, oportunidad, y costos de transacción. Los costos de diseño y construcción corresponden a inversiones iniciales, que suelen incluir, entre otros, costos derivados de la planificación y el diseño, adquisición de terrenos, permisos,

compra de materiales y maquinaria, y mano de obra (Aerts, 2018; BID, 2020). Los costos de operación y manejo se producen a lo largo del ciclo de vida del proyecto e incluyen los costos anuales necesarios para operar, monitorear, reparar y reemplazar el equipo necesario (Aerts, 2018; BID, 2020). Los costos de oportunidad son la posible pérdida monetaria relativa asociada a la implementación de una medida de reconversión con SbN en lugar de una medida alternativa (BID, 2020). Los costos de transacción están asociados con el tiempo, el esfuerzo y los recursos necesarios para facilitar el proyecto de reconversión con SbN, incluidos los costos de exploración, delimitación del alcance, planificación, toma de decisiones y demás. Los costos de transacción pueden ser elevados para los promotores que carecen de experiencia en proyectos de MRI y SbN, o para trabajos que atraviesan por numerosos comienzos en falso, reajustes en el alcance o reelaboraciones, y cuyos recursos necesarios aumentan el número de horas y el esfuerzo requeridos (BID, 2020).

Si bien es cierto que suele ser difícil que los ahorros, ingresos o valor generados a partir de los beneficios directos del MRI o los cobeneficios de un proyecto de SbN se reflejen en términos monetarios, por tratarse de beneficios de naturaleza no económica, determinar la magnitud de los beneficios económicos derivados de un proyecto con frecuencia resulta útil y necesario. Los métodos de valoración pueden ser cualitativos o cuantitativos, dependiendo de los recursos disponibles y del resultado deseado. Es importante señalar que los métodos e indicadores de valoración deben ser coherentes a lo largo del ciclo de vida del proyecto, de modo que se pueda realizar un monitoreo preciso, vigilar el desempeño y aplicar un manejo adaptativo, así como comunicar los beneficios a las partes interesadas. Para obtener orientación técnica sobre los métodos de valoración y el proceso de evaluación, consúltese el documento asociado sobre cobeneficios.

A fin de garantizar la viabilidad de un proyecto de SbN, es necesario comprender los costos del proyecto —en todas las etapas del ciclo de ejecución— y todas las posibles fuentes de financiamiento. La elaboración de una estrategia de financiamiento y la estimación de los costos o ahorros correspondientes deben realizarse al inicio del proyecto y ajustarse a medida que se disponga de nueva información a lo largo de su ciclo de vida. En el apartado 4.4 se analizan en detalle las oportunidades de financiamiento.

A continuación se incluyen algunas preguntas técnicas que pueden formularse para ayudar a guiar los aspectos económicos de un diseño de SbN (adaptado de Pathak *et al.*, 2022, y BID, 2020):

Costo

- ¿Existe la posibilidad de integrar la reconversión con SbN en los procesos de planificación en curso?
- ¿Cuál es el plazo para incurrir en los costos?
- ¿Esta reconversión con SbN ofrece una alternativa de menor costo (incluida la instalación, el monitoreo y el mantenimiento) en comparación con otras opciones?
- ¿Existen alternativas más rentables?
- ¿Cuál es el costo de los recursos, incluido el tiempo, el esfuerzo y el conocimiento necesarios para la reconversión con SbN?
- ¿Cuánto se necesita invertir en costos iniciales, tales como capital, planificación, permisos, materiales, maquinaria, adquisición de terrenos, mano de obra y construcción?
- ¿Cómo se compara el costo del proyecto de SbN con el de estrategias alternativas de manejo de inundaciones costeras, como estructuras grises o planificación del uso de suelo?
- ¿Cuánto se necesita invertir a largo plazo para cubrir el ciclo de vida del proyecto, lo que incluye operación, mantenimiento, monitoreo y equipo?

Valor

- ¿Contribuirá este proyecto a reducir el riesgo o los daños y, por ende, los costos de recuperación o reparación?
- ¿Cómo se valorarán y monetizarán los beneficios del proyecto de SbN, por ejemplo, por daños evitados, aumento del turismo o mejoramiento de la calidad de vida?
- ¿Cuáles son los beneficios a largo plazo del proyecto?
- ¿Cómo afectará el proyecto de SbN a la economía local y regional, en términos de empleo, ingresos y comercio?
- ¿Qué datos e información se necesitan para evaluar el impacto económico de un proyecto de SbN, y cómo se recopilarán y analizarán?
- ¿Cómo se medirán y monetizarán los ahorros o el valor intangibles?
- ¿Se distribuyen los beneficios económicos entre las partes interesadas y personas o entidades titulares de derechos?
- ¿Qué compensaciones en los costos se producirán a partir de este proyecto?
- ¿Cómo se distribuirán los beneficios del proyecto de SbN entre las diferentes partes interesadas, entre ellas la población local, las empresas y los organismos gubernamentales?
- ¿Cuál es el plazo para generar valor, ingresos o ahorros?

Financiamiento

- ¿Cuál es la estrategia de involucramiento de las partes interesadas?
- ¿En qué consiste la estrategia de financiamiento?
- ¿De qué fuentes de financiamiento se dispone (incluidas las oportunidades de obtención de financiamiento y subvenciones federales)?
- ¿Cómo se financiará y mantendrá el proyecto de SbN a lo largo del tiempo?
- ¿Existen oportunidades sinérgicas que sean aplicables a otras partes interesadas?

El ya citado documento *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* (asociado al presente informe) proporciona una extensa lista de posibles cobeneficios económicos a considerar como parte de un proyecto de SbN. Por su parte, el documento titulado *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions* [Aumentar la resiliencia de infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)] (BID, 2020) ofrece orientación sobre la evaluación económica de las SbN y explica cómo éstas pueden aportar un mayor valor a los proyectos de infraestructura. El informe *A Review of Cost Estimates for Flood Adaptation* [Revisión de las estimaciones de costos de medidas de adaptación frente a inundaciones] (Aerts, 2018) ofrece información procedente de publicaciones revisadas por especialistas sobre los costos de construcción y los gastos de operación y mantenimiento de las soluciones basadas en la naturaleza.

5.5 Consideraciones relativas al monitoreo y el manejo adaptativo

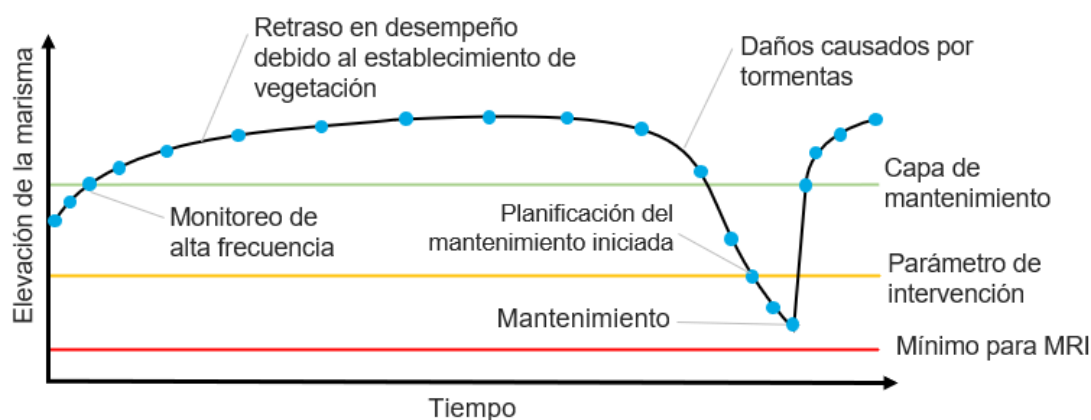
Basado en el principio de abordar y reducir las incertidumbres en los proyectos de SbN en una implementación por fases, el manejo adaptativo reconoce la naturaleza dinámica del medio ambiente y se centra en los aspectos del proyecto que pueden controlarse o adaptarse, lo que aumenta la flexibilidad en las etapas de planificación y permite que el diseño evolucione con el tiempo (De Looft *et al.*, 2021, y referencias en el mismo). Este aspecto reviste especial importancia dada la incertidumbre que plantea el cambio climático frente al futuro (por ejemplo, Cado van der Lely *et al.*, 2021). El monitoreo y el manejo adaptativo de un proyecto de reconversión con SbN contribuirán también a materializar los beneficios y cobeneficios del MRI a lo largo del tiempo (Vouk *et al.*,

2021). De ahí que estas dos tareas sean fundamentales en el ciclo de un proyecto de soluciones basadas en la naturaleza.

Introducir consideraciones de monitoreo y manejo adaptativo en las primeras etapas del ciclo de SbN y continuarlas a lo largo del proyecto ayudará a lograr resultados óptimos. Dichas consideraciones incluyen la identificación clara de las funciones específicas del proyecto, la frecuencia y duración del monitoreo (es decir, el cronograma), la metodología de recopilación de datos, el cumplimiento de las políticas o normas pertinentes, la capacitación necesaria para llevar a cabo las actividades y el financiamiento (Vouk *et al.*, 2021).

El cronograma de monitoreo y manejo adaptativo variará en función del proyecto y de la reconversión con SbN específica que se aplique. Los cronogramas deben considerarse desde el momento mismo de la recolección de datos de referencia hasta aquel en que se recopilan los datos sobre la operación. Dado que la mayoría de los proyectos de reconversión con SbN se llevan a cabo en plazos o marcos temporales amplios, es necesario realizar un mantenimiento regular para garantizar que el proyecto funcione según lo previsto y se materialicen los beneficios (Vouk *et al.*, 2021). Además del mantenimiento periódico, en un momento dado podría requerirse también realizar tareas de mantenimiento de carácter urgente tras una tormenta, por ejemplo. La gráfica 26 ilustra cómo el monitoreo de la elevación de marismas (por ejemplo) podría contribuir a la toma de decisiones sobre cuándo y qué cantidad de sustrato añadir. En este ejemplo, cuando los datos de monitoreo revelan que la elevación de la marisma está por debajo de la métrica de intervención, se inicia la planificación de las actividades de mantenimiento. Por ello es preciso recibir de manera oportuna las observaciones del programa de monitoreo y manejo adaptativo para facilitar la actuación de las personas responsables de la toma de decisiones. El trabajo de mantenimiento debe diseñarse de manera que se logre la capa de mantenimiento y se mantenga siempre el desempeño del manejo de riesgos por inundación.

Gráfica 26. Modelo conceptual de datos de monitoreo de elevación de marismas, mismos que alimentan el manejo adaptativo (adaptado de De Looff *et al.*, 2021, p. 290)



Deben tenerse en cuenta parámetros e indicadores de desempeño, así como métodos de monitoreo y análisis, para garantizar la coherencia a lo largo del proyecto, lo que permite comprender con precisión el desempeño y comparar distintos proyectos (Pathak *et al.*, 2022). Los métodos específicos de recopilación y análisis de datos se determinarán en función de cada proyecto, pero siempre deben aplicarse medidas de aseguramiento y control de la calidad (por ejemplo, metadatos y la documentación adecuada). En los documentos *Monitoreo de la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras* y *Monitoreo*

de la eficacia: metodología e indicadores propuestos (ambos asociados al presente informe) puede consultarse orientación técnica adicional relativa a las actividades de monitoreo y manejo adaptativo.

La frecuencia y la duración de las actividades de monitoreo y manejo adaptativo guardarán relación directa con el alcance de financiamiento necesario (Vouk *et al.*, 2021). Las fuentes de financiamiento pueden incluir instituciones financieras internacionales, entidades públicas (con inclusión de presupuestos gubernamentales, subvenciones, organizaciones sin fines de lucro y programas de voluntariado) y fuentes privadas (donaciones) (De Looff *et al.*, 2021; Silva Zúñiga *et al.*, 2020). Las oportunidades de financiamiento para proyectos de reconversión con SbN se analizan en detalle en el apartado 4.4, y aquellas específicamente relacionadas con el monitoreo pueden consultarse en el primero de los documentos de orientación sobre monitoreo de la eficacia mencionados.

A continuación se presenta una serie de preguntas técnicas que sirven de guía para considerar aspectos relacionados con el monitoreo y el manejo adaptativo (adaptado de BID, 2020, De Looff *et al.*, 2021, y Pathak *et al.*, 2022):

Escalas espacial y temporal

- ¿Cuándo se producirán los beneficios esperados?
- ¿Cuáles son la frecuencia y la duración previstas de las actividades de monitoreo?
- ¿Cuál es la escala espacial de las actividades de monitoreo?
- Basándose en la dinámica temporal, ¿tiene el cronograma la duración suficiente para ver los resultados de una acción?
- ¿Se dispone de tiempo suficiente para implementar un manejo adaptativo?

Recursos

- ¿Se dispone de fondos suficientes para cubrir las tareas de monitoreo y mantenimiento previstas?
- ¿Cómo se financiará el monitoreo?
- ¿Se dispone de los recursos humanos y el equipo necesarios para el monitoreo previsto?

Datos

- ¿Cómo se medirán los beneficios o acciones específicos?
- ¿Qué indicadores se medirán de manera sistemática?
- ¿Qué parámetros se utilizarán para determinar si la SbN está funcionando o si se requieren adaptaciones?
- ¿Cómo se recopilarán los datos requeridos?
- ¿Quién llevará a cabo la recopilación de datos?
- ¿Cómo se manejarán, analizarán y almacenarán los datos?
- ¿Cómo se difundirán los resultados a las partes interesadas y a las personas o entidades titulares de derechos?

Se presenta una guía técnica más detallada sobre la elaboración e implementación de planes de monitoreo en los multicitados documentos de orientación sobre monitoreo de la eficacia de SbN asociados al presente informe. El documento titulado *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions* [Aumentar la resiliencia de infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)] (BID, 2020) también ofrece orientación sobre planes de monitoreo y evaluación para SbN. El capítulo 7 del documento *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] (De Looff *et al.*, 2021) brinda estrategias detalladas para la elaboración de un plan de manejo adaptativo. El conjunto de

Bridges *et al.* (2021) describe estrategias de monitoreo y manejo adaptativo para elementos naturales específicos (por ejemplo, playas y dunas, islas y arrecifes).

6 Incentivos para reconversión con SbN

Existen varios tipos de incentivos para la reconversión de infraestructura de MRI en pie con SbN (en contraposición a opciones de ingeniería gris). Estos incentivos podrían ser inherentes al propio proyecto o bien proceder de fuentes externas como gobiernos, el sector privado, ONG y entidades comunitarias. Este apartado ofrece una visión general de los diferentes tipos de incentivos disponibles en la actualidad, así como de los incentivos que podrían implementarse. Dada esta diversidad de posibilidades y la complejidad del posible apoyo financiero para este tipo de proyecto en cada país, se recomienda obtener el asesoramiento de especialistas locales para ayudar a identificar las opciones de obtención de apoyo financiero.

6.1 Incentivos inherentes

La capacidad inherente de algunos tipos de SbN para adaptarse a las condiciones ambientales tan cambiantes —incluido el aumento del nivel del mar a escala regional— y la oportunidad que presentan estos tipos de proyectos para adoptar un enfoque de manejo adaptativo suponen una ventaja frente a los enfoques convencionales y poco flexibles en un contexto de incertidumbre futura (véase, por ejemplo, Cado van der Lely *et al.*, 2021). Los proyectos de SbN también proporcionan incentivos inherentes para su ejecución gracias a sus numerosos cobeneficios. Aunque los cobeneficios específicos proporcionados variarán de un proyecto a otro, todos los tipos de SbN costeros mencionados en este documento (véase el apartado 2) ofrecerán beneficios directos de MRI y cobeneficios sociales, económicos y ambientales específicamente relacionados con el proyecto, que de otro modo no podrían obtenerse con una opción gris. La mayoría de los proyectos de SbN generarán algún tipo de empleo local en las fases de planificación, diseño, construcción, monitoreo y manejo adaptativo del proyecto. Además, a largo plazo podrían ofrecer beneficios económicos, por ejemplo, al aumentar el turismo o la recaudación de impuestos. Como parte de todos los proyectos de SbN se crearán o restaurarán hábitats, los que, a su vez, prestarán servicios ambientales adicionales. Por ejemplo, un proyecto de SbN que implique el establecimiento de manglares mejorará la calidad del agua y la salud del suelo, y contribuirá a la captación y almacenamiento de carbono. También se generarán beneficios sociales, como la creación de nuevos espacios verdes y recreativos, y la posibilidad de mejorar la salud pública. Se pueden obtener más beneficios sociales (y culturales) facilitando el uso y el manejo tradicionales del suelo por parte de las comunidades indígenas, como la restauración de viveros de almejas. Estos cobeneficios constituyen incentivos inherentes para la reconversión mediante SbN. Para identificar y evaluar los incentivos específicos que pueden ser inherentes a un proyecto, consulte el apartado 2 del documento de orientación asociado sobre cobeneficios.

6.2 Incentivos gubernamentales

Los incentivos que promueven la implementación de las SbN provienen de todos los órdenes de gobierno, desde acuerdos internacionales intergubernamentales (como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2016), hasta gobiernos nacionales o federales, estatales, territoriales o provinciales y locales. Los incentivos gubernamentales en todos los niveles se dividen en dos grandes categorías que se analizan a continuación: (1) disposiciones reglamentarias que incentivan las SbN o simplifican la concesión de permisos para su aplicación, y (2) incentivos

financieros para proyectos e investigación (incluso mediante subvenciones y programas). Además de estas dos categorías principales, los gobiernos también pueden ofrecer incentivos a los proyectos de SbN brindando orientación y educación sobre los beneficios y los elementos de diseño técnicos, así como elaborar programas de certificación destinados a reconocer a las entidades privadas que implementen SbN (véase el apartado 6.3).

6.2.1 Aspectos reglamentarios

Si se quiere que las personas responsables de la toma de decisiones implementen SbN, es necesario tener en cuenta la normativa en las primeras etapas de planificación de los proyectos de MRI, así se trate de construcciones nuevas o de procesos de reconversión. El mismo marco reglamentario y las políticas gubernamentales podrían incentivar la utilización de SbN al hacer que se les considere como requisito en las etapas de planificación de un proyecto. Por ejemplo, en 2016, el pueblo de Qualicum Beach (Columbia Británica, Canadá) creó dos conjuntos de marcos de evaluación para ayudar a evaluar de manera sistemática y transparente las propuestas de desarrollo urbano en el sector costero, y para fundamentar la toma de decisiones relacionadas con su aprobación. El marco exige a quienes presentan una solicitud que comparen su solución propuesta con un enfoque de “no hacer nada” (como mínimo) y promueve orientarse hacia la adopción de SbN si la solución propuesta tiene impactos negativos de ingeniería, ambientales o sociales en relación con el enfoque de “no hacer nada”. En el estudio de caso 6: “Marcos de evaluación del sector costero de Qualicum Beach”, del documento *Cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos por inundación en comunidades costeras*, se proporciona información adicional sobre estos marcos.

Durante la serie de talleres de la CCA (DHI, 2022b), especialistas participantes también señalaron que faltaba orientación sobre el proceso de permisos y aprobación de las SbN. Los gobiernos podrían trabajar juntos para que la obtención de permisos y aprobaciones sea más eficiente o ágil cuando se trate de SbN. Permitir ciertas exenciones de planificación, reducir el cobro de derechos o acelerar los tiempos de procesamiento de solicitudes de permisos para proyectos de SbN también serviría de incentivo para los promotores (Pathak *et al.*, 2022). Del mismo modo, podrían eliminar los desincentivos derivados de requisitos de planificación confusos estableciendo normas de planificación claras y específicas para las SbN, que orienten la ejecución de este tipo de proyectos. Por ejemplo, el programa piloto *Green Shores* [Costas verdes] (Columbia Británica, Canadá) agiliza la concesión de permisos para proyectos de SbN en la costa y ofrece una lista de comprobación detallada de los estudios y la documentación necesarios para solicitar un permiso de SbN (Stewardship Centre for British Columbia, 2022a).

6.2.2 Aspectos financieros

Especialistas que participaron en el taller de la CCA (DHI, 2022b) identificaron el acceso a fondos para proyectos de SbN como un obstáculo para su adopción. Quienes asistieron al taller indicaron que la incertidumbre en torno a las soluciones novedosas (incluidas las SbN), la falta de precedentes y la naturaleza propia de cada lugar donde se lleva a cabo este tipo de proyectos dificultan la obtención de fondos debido a la percepción de un mayor riesgo. Este aumento del riesgo también puede desincentivar los proyectos que dependen de financiamiento privado, el cual exige reembolso (Raška *et al.*, 2022). Las subvenciones federales y estatales y el financiamiento de proyectos en el marco de programas que proporcionan capital sin necesidad de reembolso o con un interés bajo pueden, por tanto, constituir un incentivo al aliviar los costos y reducir el riesgo financiero (véase, por ejemplo, el Fondo Nacional de Resiliencia Costera de Estados Unidos [*National Coastal Resilience Fund*], NOAA, 2022b). Además, los gobiernos tienen la oportunidad de establecer asociaciones público-

privadas para financiar las SbN. El apartado 4.4 ofrece ejemplos y recursos para identificar fuentes de financiamiento para soluciones basadas en la naturaleza.

Otros incentivos financieros gubernamentales podrían provenir de beneficios fiscales y subsidios de seguros para entidades privadas que implementen proyectos o brinden apoyo financiero a SbN. Por ejemplo, los gobiernos podrían proporcionar incentivos fiscales a quienes posean tierras privadas que implementen SbN o restauren ecosistemas costeros a cambio de beneficios de MRI en sus tierras. Las entidades privadas también podrían recibir incentivos para apoyar o implementar proyectos de SbN si reciben reconocimiento público por su labor, de manera que les permita cumplir mejor con los objetivos de responsabilidad social corporativa.

Los créditos de carbono proporcionan un incentivo financiero para proyectos de SbN como manglares, marismas y lechos de pasto marino, ecosistemas que ofrecen cobeneficios relativos a captación y almacenamiento de carbono. Por ejemplo, se han emitido créditos de carbono para el proyecto de restauración de manglares en San Crisanto, México (Godoy, 2022; para obtener más detalles sobre el proyecto, consúltese el estudio de caso 1 en el documento sobre cobeneficios); en Canadá, la provincia de Columbia Británica ha emitido créditos de carbono para SbN terrestres implementadas por la Iniciativa Gran Oso de las Primeras Naciones Costeras (*Coastal First Nations Great Bear Initiative*) (Primeras Naciones Costeras, 2010).

6.3 Incentivos otorgados por ONG y de base comunitaria

Las ONG y entidades comunitarias también pueden incentivar el uso de SbN con diversas acciones, como la realización de campañas y la procuración de apoyos, la prestación de apoyo técnico o financiero, y la expedición de certificaciones, o bien encabezando proyectos directamente. En México, por ejemplo, las ONG han desempeñado un papel importante en la promoción de las SbN, y casi todos los proyectos piloto han contado con su participación (OCDE, 2021).

Tanto ONG como entidades comunitarias tienen la posibilidad de recabar más apoyo público mediante campañas de información y sensibilización sobre las SbN y sus cobeneficios, y de llamar la atención de entidades responsables de la definición de políticas y de la toma de decisiones sobre las SbN. Un mayor apoyo público redundará en una mayor participación de la comunidad y en la posibilidad de que ésta presione a gobiernos y sector privado para que consideren las SbN como opción para el MRI. Con un mayor grado de conciencia y presión social, las SbN podrían convertirse en una prioridad para los gobiernos e incluirse en las agendas políticas, catalizando así el financiamiento gubernamental y las reglamentaciones necesarias para facilitar la ejecución de proyectos de SbN. Las ONG, por su parte, podrían incentivar la adopción de SbN mediante su contribución a los programas de subvenciones gubernamentales o creando subvenciones propias o en colaboración con entidades privadas para financiar proyectos de este tipo.

Las ONG o los gobiernos podrían ofrecer certificaciones y premios para reconocer a entidades privadas que hayan apoyado o ejecutado proyectos de SbN. Las certificaciones contribuyen a que las empresas privadas cumplan sus objetivos de responsabilidad social corporativa y demuestren su compromiso con el medio ambiente, requisitos cada vez más importantes para clientes y partes interesadas. Por ejemplo, en Columbia Británica, Canadá, y el estado de Washington, Estados Unidos, el programa *Green Shores* [Costas verdes] evalúa proyectos de intervención en la línea costera en función de diversos criterios de diseño sustentable y califica dichas iniciativas con puntos (Stewardship Centre for British Columbia, 2022b). El Instituto para Infraestructura Sustentable (*Institute for Sustainable Infrastructure*) también ofrece un programa global de premios para proyectos de infraestructura evaluados en función de criterios de sustentabilidad, resiliencia y equidad establecidos en su Marco Envision (Institute for Sustainable Infrastructure, 2022).

Indirectamente, las ONG pueden ofrecer incentivos para implementar SbN apoyando proyectos mediante la colaboración con las partes interesadas para identificar sus necesidades de MRI y sus opciones de manejo preferidas; realizando investigaciones y difundiendo conocimientos sobre SbN; ofreciendo orientación técnica a figuras clave locales involucradas en la ejecución, y liderando proyectos de manera directa. Estas oportunidades para las ONG contribuyen a reducir los obstáculos y eliminar los desincentivos relacionados con la reconversión que utiliza soluciones basadas en la naturaleza.

6.4 Incentivos del sector privado

El sector privado podría incentivar la adopción de SbN al ofrecer financiamiento, como subvenciones, préstamos, asociaciones público-privadas, bonos verdes y productos relacionados con seguros (véase el apartado 4.4). Además de proporcionar financiamiento directo a proyectos, las entidades privadas podrían financiar la investigación sobre SbN para ayudar a subsanar las lagunas en el conocimiento que podrían estar obstaculizando este tipo de proyectos; asimismo, tienen la posibilidad de contribuir a ejercer presión social sobre los gobiernos para respaldar e impulsar soluciones basadas en la naturaleza mediante actividades de cabildeo y colaborando con ONG, grupos comunitarios y otras partes interesadas. De ser necesario, las empresas privadas con experiencia y conocimientos técnicos podrían ofrecer orientación a protagonistas locales que deseen llevar a cabo proyectos de soluciones basadas en la naturaleza.

7 Oportunidades y orientaciones futuras

La reconversión de infraestructura de MRI en pie mediante SbN ofrece numerosos resultados positivos, como mayor protección frente a inundaciones, fortalecimiento de la resiliencia climática y grandes cobeneficios ambientales, sociales y económicos. Sin embargo, como se describe en el apartado 1.3, existen varios desafíos y lagunas en el conocimiento que suponen obstáculos para la reconversión. En el recuadro 20 se ofrece un resumen de las posibles oportunidades e iniciativas que las personas responsables de la toma de decisiones pueden aprovechar para mitigar tales obstáculos, a partir de las opciones identificadas en el marco de la serie de talleres de la CCA (DHI, 2022b).

La mayoría de los obstáculos sociales y de percepción relacionados con medidas de reconversión de infraestructura de MRI en pie aplicando soluciones basadas en la naturaleza pueden sortearse, o al menos reducirse, si se mejora la comunicación, se fomenta la participación y se propicia el intercambio de conocimientos. Se puede mejorar la comunicación organizando sesiones, talleres o seminarios sobre soluciones basadas en la naturaleza y sus posibles beneficios, asegurándose de que el formato, el nivel técnico de detalle y los mensajes transmitidos sean adecuados para el público destinatario. Existen otras iniciativas encaminadas a generar e intercambiar conocimientos mediante estudios, proyectos piloto y estudios de caso que también contribuirán a comunicar los beneficios de las SbN a las comunidades. Es posible lograr una mayor participación en un proyecto si ésta se integra en una etapa temprana del ciclo de vida, durante las fases de delimitación del alcance, planificación y diseño.

Los obstáculos técnicos podrán mitigarse mediante la investigación aplicada; la elaboración de orientaciones técnicas adicionales; la educación y la formación; la integración de estudios de caso, y el intercambio de conocimientos. Especialistas que participaron en el taller de la CCA (DHI, 2022b) mencionaron en repetidas ocasiones la necesidad de contar con orientaciones técnicas adicionales sobre las SbN; sin embargo, dada la naturaleza novedosa de muchas de estas soluciones, se requieren más investigaciones y proyectos piloto para fundamentar la elaboración de dichas orientaciones. Los

estudios de caso constituyen también una importante fuente de información, pero a menudo se localizan en regiones similares y utilizan un pequeño subconjunto de técnicas de SbN. Los nuevos estudios de caso habrán de centrarse en técnicas más novedosas, regiones con escasa representación, y resultados tanto negativos como a largo plazo. Es preciso llevar a cabo estudios de caso que comparen la aplicación de las SbN con el uso de infraestructura convencional. La formación y el intercambio de conocimientos se han de lograr mediante la modificación de los programas académicos vigentes y el establecimiento de comunidades de práctica que presten atención a los aspectos multidisciplinarios de las SbN. En el futuro, las regiones septentrionales también tendrán la oportunidad de aprender de las estrategias empleadas en las regiones meridionales, a medida que los ecotipos se desplacen hacia el norte como consecuencia del cambio climático.

La variabilidad estacional y a largo plazo de los sistemas ambientales naturales también supone un obstáculo importante para la reconversión mediante SbN. Fomentar y destacar los estudios de caso con resultados de monitoreo a largo plazo contribuiría a reducir este obstáculo. Asimismo, el establecimiento de redes adicionales para monitorear y difundir datos ambientales básicos o estándar (necesarios para el diseño de SbN) en zonas con pocos datos de monitoreo a largo plazo disponibles ayudaría a reducir las incertidumbres en la comprensión del entorno natural. El documento de orientación *Monitoreo de la eficacia: metodología e indicadores propuestos* (asociado al presente informe) ofrece recomendaciones de datos básicos de monitoreo para las SbN. Además, el desarrollo de proyecciones climáticas más detalladas a escalas regional o local en toda América del Norte proporcionaría a las personas encargadas de la toma de decisiones información útil para presentar argumentos a favor de la reconversión con soluciones basadas en la naturaleza.

Entre las personas con conocimientos especializados encuestadas como parte de la serie de talleres de la CCA sobre SbN (DHI 2022b), en repetidas ocasiones se destacó la falta de fondos y de acceso a ellos como los principales obstáculos para la implementación de SbN y su manejo a largo plazo. En particular, se carece de fondos para actividades de monitoreo a largo plazo, así como para su operación y mantenimiento, lo que desvía los fondos hacia soluciones grises que requieren grandes inversiones de capital. Además, parece que las entidades financiadoras no reconocen los posibles cobeneficios de las SbN que pueden lograrse con la misma cantidad —o ligeramente superior— de fondos que se requieren para los proyectos convencionales de MRI. Al promover fuentes de financiamiento a escala regional se contribuye a reducir los obstáculos asociados a la obtención de fondos para ejecutar proyectos piloto que utilizan SbN novedosas, reconvertir infraestructura en pie, implementar un manejo adaptativo a largo plazo de las soluciones implementadas y planificar estratégicamente la infraestructura de MRI también con un horizonte lejano. Las estrategias de financiamiento deben tener en cuenta las políticas, los mecanismos y los protocolos específicos de cada región (Brill *et al.*, 2021).

Los gobiernos tienen la capacidad de impulsar aún más la reconversión que utiliza SbN, para lo cual han de crear incentivos de políticas y leyes que exijan la consideración de múltiples opciones, la evaluación de cobeneficios y el fomento de inversiones en SbN. Los incentivos representan también un medio para promover que las personas responsables de la toma de decisiones “reconstruyan mejor” (Vouk *et al.*, 2021) tras desastres naturales y fallos en la infraestructura. Las oportunidades institucionales adicionales descritas en el recuadro 20 se refieren a la distribución de información disponible sobre los beneficios de las SbN a entidades gubernamentales; a la protección legal del medio ambiente o de los servicios ambientales, y a la simplificación —mediante la creación de vías simplificadas— del proceso de concesión de permisos para la implementación de SbN.

Recuadro 20. Oportunidades y orientaciones futuras relacionadas con la reconversión mediante SbN, y tipos de obstáculos que las oportunidades abordan

Oportunidades y orientaciones futuras	Tipo de obstáculo que se aborda			
	Social	Técnico	Ambiental	Institucional
1. Organizar o financiar sesiones, talleres y seminarios sobre opciones de reconversión que utilizan soluciones basadas en la naturaleza.	☒	☒	☐	☒
2. Fomentar el involucramiento de diversos grupos de interés (es decir, responsables de la formulación de políticas, comunidades indígenas, agrupaciones sociales) desde un principio del ciclo de vida del proyecto.	☒	☐	☐	☒
3. Establecer a lo largo de diversas regiones una comunidad de práctica sobre SbN con especialistas de múltiples disciplinas.	☒	☒	☐	☐
4. Apoyar y publicar investigaciones sobre reconversión de infraestructura en pie con SbN, así como en torno a SbN novedosas, y elaborar directrices de diseño.	☒	☒	☐	☐
5. Implementar proyectos piloto que contemplen procesos de reconversión con SbN y nuevas formas de este tipo de soluciones.	☒	☒	☐	☐
6. Fomentar la realización de estudios de caso que comparen SbN con infraestructura gris convencional, y darlos a conocer.	☐	☒	☐	☒
7. Fomentar la realización de estudios de caso con resultados a largo plazo, y divulgarlos.	☐	☒	☒	☒
8. Incluir formación interdisciplinaria en diseño e implementación de SbN, como parte de programas o estudios para obtener un grado académico.	☐	☒	☐	☐
9. Establecer redes adicionales donde alojar y compartir datos de monitoreo estándar (por ejemplo, datos de olas) necesarios para el diseño de SbN, y poner los datos a disposición del público.	☐	☒	☒	☒
10. Ajustar las proyecciones climáticas mundiales y nacionales a una escala local, a efecto de reducir la incertidumbre en torno a la adaptación al cambio climático.	☐	☒	☒	☒
11. Modificar las aprobaciones de los organismos reguladores para exigir la comparación de múltiples opciones (que incluyan un enfoque con SbN y otro de “no hacer nada”).	☒	☐	☐	☒
12. Establecer flujos de financiamiento para que los gobiernos regionales y locales puedan formular planes estratégicos de manejo de la infraestructura para MRI.	☐	☐	☐	☒
13. Crear fuentes de financiamiento a escala regional para proyectos piloto de SbN y aquellos con un alto grado de innovación.	☐	☒	☐	☒
14. Establecer fuentes de financiamiento a escala regional para proyectos de reconversión mediante SbN.	☐	☐	☐	☒
15. Distribuir orientaciones disponibles en materia de SbN entre organismos gubernamentales.	☐	☐	☐	☒
16. Simplificar los procesos de concesión de permisos (es decir, agilizar los procesos) para la construcción, el monitoreo y el manejo adaptativo de SbN.	☐	☐	☐	☒
17. Resolver las discrepancias entre reglamentos jurisdiccionales e institucionales.	☒	☐	☐	☒
18. Proporcionar incentivos en las políticas (por ejemplo, mediante exenciones fiscales) para impulsar la adopción de medidas de reconversión que utilizan SbN.	☐	☐	☐	☒
19. Brindar protección legal tanto al medio ambiente como a los servicios ambientales.	☐	☐	☐	☒

8 Conclusiones

El objetivo de la reconversión mediante SbN es la transición del MRI de sistemas grises a sistemas verdes. El presente documento ofrece una síntesis de información relacionada con la reconversión mediante SbN en el contexto del manejo de riesgos por inundación en Canadá, Estados Unidos y México, con atención especial a opciones de reconversión con SbN; la identificación de oportunidades para implementarlas; consideraciones administrativas y técnicas; incentivos para la reconversión con SbN, y oportunidades para subsanar las lagunas en la información y los obstáculos que dificultan su aplicación.

A fin de aumentar la adopción de las SbN, es necesario que las personas responsables de la toma de decisiones primero identifiquen las oportunidades de reconversión tanto en su cartera de infraestructura de MRI como en la estrategia global aplicada al manejo de riesgos por inundación. La identificación de oportunidades debe comenzar en las primeras etapas de un proyecto y reevaluarse periódicamente a lo largo de su ciclo de vida. Este documento propone varios pasos clave destinados a ayudar a quienes toman las decisiones a identificar oportunidades, empezando por evaluar el inventario de activos para el MRI de que se dispone; planificar el involucramiento de las partes interesadas; detectar necesidades y carencias en materia de MRI; evaluar la idoneidad del sitio para implementar SbN, y priorizar activos específicos para su reconversión. Una vez establecidas las prioridades por cuanto a los activos, se podrán determinar las opciones de reconversión que impliquen SbN y evaluarlas frente a opciones grises y el enfoque de “no hacer nada”. En este paso es importante tener en cuenta la viabilidad y la incertidumbre de los posibles proyectos, así como evaluar las opciones de manera integral, considerando tanto los beneficios del MRI como los cobeneficios ambientales, sociales y económicos.

Este documento de orientación también describe consideraciones administrativas clave respecto de la reconversión mediante SbN (es decir, delimitación del alcance, funciones y responsabilidades, comunicación e involucramiento, financiamiento, marco reglamentario y elección del momento oportuno para la instrumentación). La responsabilidad de las medidas de reconversión recae en todos los órdenes de gobierno, así como en las comunidades locales y en quienes son titulares de tierras privadas, y requiere su colaboración. En cuanto al financiamiento para este tipo de intervención, los fondos provienen principalmente de subvenciones gubernamentales, pero también —cada vez más— de fuentes privadas y asociaciones público-privadas. Aunque el marco reglamentario para las SbN todavía es relativamente débil, se están proponiendo políticas y disposiciones reglamentarias en toda América del Norte. Por otro lado, las consideraciones técnicas (es decir, de ingeniería, ambientales, sociales, económicas, de monitoreo y de manejo adaptativo) dependerán de cada proyecto. Las personas responsables de la toma de decisiones y el equipo encargado del proyecto deberán adoptar enfoques basados en sistemas, fomentar el involucramiento ininterrumpido e implementar el manejo adaptativo a lo largo de todo el ciclo de ejecución de soluciones basadas en la naturaleza.

El informe describe diferentes incentivos para aumentar la puesta en práctica de procesos de reconversión con SbN, tanto los que ya se aplican como los que pueden introducirse. Los incentivos inherentes a los proyectos de SbN incluyen una amplia diversidad de cobeneficios ambientales (por ejemplo, restauración de hábitats, mejor calidad del agua), sociales (nuevos espacios verdes, mejor salud pública) y económicos (más oportunidades de empleo, aumento del turismo). Provenientes de muy diversas instancias, entre las que se incluyen los gobiernos, ONG, grupos comunitarios o el sector privado, los incentivos se relacionan principalmente con estímulos financieros y reglamentarios del gobierno, como devoluciones de impuestos y agilización de permisos. Sin embargo, las ONG, los grupos comunitarios y el sector privado incentivan cada vez más la adopción de SbN mediante la promoción, la provisión de fondos o conocimientos técnicos, y directamente a través de la puesta en marcha de proyectos de soluciones basadas en la naturaleza.

Por último, se presentan numerosas oportunidades para promover las SbN al eliminar los obstáculos y las lagunas en la información relacionados con la identificación y evaluación de las oportunidades de reconversión. Las fuentes de financiamiento adicionales o las oportunidades para implementar proyectos piloto de SbN, junto con la identificación de medidas de reconversión, la evaluación y la valoración a largo plazo, el monitoreo y el manejo adaptativo se consideran elementos fundamentales para eliminar los obstáculos.

Bibliografía

- ACEC-BC (2021), “The ACEC-BC Awards: Qualicum Beach Waterfront – Beach Creek Estuary Enhancement” [Premios ACEC-BC: sector costero de Qualicum Beach: mejoras realizadas al estuario de Beach Creek], en: acecbcawards.com/2021-awards/natural-resource-habitat/qualicum-beach-waterfront-beach-creek-estuary-enhancement/ (consulta realizada el 1 de diciembre de 2022).
- Adger, W. N. (2006), “Vulnerability” [Vulnerabilidad], *Global Environmental Change*, núm.16, pp. 268-281, en: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- Aerts, J. C. J. H. (2018), “A review of cost estimates for flood adaptation” [Análisis de las estimaciones de costos de medidas de adaptación frente a inundaciones], *Water*, vol. 10, núm. 11, p. 1646, Suiza, en: doi.org/10.3390/w10111646.
- Anderson, C. C., G. Renaud, S. Hanscomb y A. González Ollauri (2022), “Green, hybrid, or grey disaster risk reduction measures: What shapes public preferences for nature-based solutions?” [Medidas verdes, híbridas o grises para mitigar el riesgo de desastres: ¿qué determina las preferencias del público por soluciones basadas en la naturaleza?], *Journal of Environmental Management*, núm. 310, art.: 114727, en: doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114727.
- Arkema, K. K., R. Griffin, S. Maldonado, J. Silver, J. Suckale y A. D. Guerry (2017), “Linking social, ecological, and physical science to advance natural and nature-based protection for coastal communities” [Vincular las ciencias sociales, ecológicas y físicas para promover la protección natural y basada en la naturaleza de las comunidades costeras], *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1399, núm. 1, pp. 5-26, en: doi.org/10.1111/nyas.13322.
- Baine, M. (2001), “Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance” [Arrecifes artificiales: revisión de su diseño, aplicación, manejo y desempeño], *Ocean Coast. Manag.*, núm. 44, pp. 241-259, en: [doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5).
- Balke T, T. J. Bouma, E. M. Horstman, E. L. Webb, P. L. Erftemeijer y P. M. Herman (2011), “Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats” [Ventanas de oportunidad: umbrales para el establecimiento de plántulas de manglares en marismas], serie *Marine Ecology Progress*, núm. 440, pp. 1-9, en: doi.org/10.3354/meps09364.
- Barbier, E. B., S. D. Hacker, C. Kennedy, E. W. Koch, A. C. Stier y B. R. Silliman (2011), “The value of estuarine and coastal ecosystem services” [Valor de los servicios ambientales de estuarios y costas], *Ecological Monographs*, vol. 81, núm. 2, pp. 169-193, en: doi.org/10.1890/10-1510.1.
- Beheshti, K. y M. Ward (2021), *Eelgrass restoration on the U.S. West coast: a comprehensive assessment of restoration techniques and their outcomes* [Restauración de lechos de *Zostera marina* en la costa oeste de Estados Unidos: evaluación exhaustiva de técnicas de restauración y sus resultados], Pacific Marine and Estuarine Fish Habitat Partnership, en: honu.psmfc.org/media/PMEP/Eelgrass_Restoration_Synthesis/Documents/PMEP_Beheshti_Ward_2021_EelgrassSynthesisReport.pdf.
- BID (2020), *Mejorando la resiliencia de la infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN): guía técnica de doce pasos para desarrolladores de proyectos*, Banco Interamericano de Desarrollo y Acclimatize Building Climate Resilience, en: <https://publications.iadb.org/en/increasing-infrastructure-resilience-with-nature-based-solutions-nbs>.

- Brathwaite, A., E. Clua, R. Roach y N. Pascal (2022), “Coral reef restoration for coastal protection: crafting technical and financial solutions” [Restauración de arrecifes de coral como protección costera: formulación de soluciones técnicas y financieras], *Journal of Environmental Management*, núm. 310, art.: 114718, en: <doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114718>.
- Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder y R. K. Mohan (2021), *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], U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- Bridges, T. S., P. W. Wagner, K. A. Burks-Copes, M. E. Bates, Z. A. Collier, C. J. Fischenich, J. Z. Gailani, L. D. Leuck, C. D. Piercy, J. D. Rosati, E. J. Russo, D. J. Shafer, B. C. Suedel, E. A. Vuxton y T. V. Wamsley (2015), *Use of natural and nature-based features (NNBF) for coastal resilience* [Uso de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza para reforzar la resiliencia de las costas], US Army Engineer Research and Development Center, en: <<https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/3442/>>.
- Brill, G., T. Shiao, C. Kammeyer, S. Diringer, K. Vigerstol, N. Ofosu-Amaah, M. Matosich, C. Müller-Zantop, W. Larson y T. Dekker (2021), *Benefit accounting of nature-based solutions for watersheds: guide* [Guía para contabilizar los beneficios de las soluciones basadas en la naturaleza para cuencas hidrográficas], United Nations CEO Water Mandate y Pacific Institute, Oakland, California, en: <ceowatermandate.org/nbs/wp-content/uploads/sites/41/2021/03/guide.pdf>.
- Brock, K. A., J. S. Reece y L. M. Ehrhart (2009), “The effects of Artificial Beach nourishment on marine turtles: differences between loggerhead and green turtles” [Efectos de la regeneración artificial de playas en las tortugas marinas: diferencias entre las tortugas bobas y las tortugas verdes], *Restoration Ecology*, núm. 17, pp. 297-307, en: <<https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00337.x>>.
- Bryant, D., L. Burke, J. McManus y M. Spalding (1998), *Reefs at risk. A map-based indicator of the threats to the world's coral reefs* [Arrecifes en peligro: indicador basado en mapas de las amenazas a los arrecifes coralinos del mundo], en: <files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/reefs.pdf>.
- Cado van der Lely, A., E. van Eekelen, D. Honingh, J. Leenders, S. McEvoy, E. Penning, M. Sterk, I. Voskamp, A. Warren y V. van Zelst (2021), *Building with nature: a future proof strategy for coping with a changing and uncertain world* [Construir con la naturaleza: estrategia preparada para el futuro con que hacer frente a un mundo cambiante e incierto], Ecoshape, en: <www.ecoshape.org/en/enablers/management-monitoring-maintenance>.
- California Coastal Commission (2023), “The Coastal Act” [Ley de Costas], en: <www.coastal.ca.gov/laws/> (consulta realizada el 26 de enero de 2023).
- Carlson, D. (2020), “Natural infrastructure for coastal flood protection in Boundary Bay, BC” [Infraestructura natural para protección costera contra inundaciones en Boundary Bay, Columbia Británica], presentación por West Coast Environmental Law en la Cumbre sobre Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza, informe, p. 54, en: <sjdavidson1.files.wordpress.com/2017/12/85b33-climate-summit-summary-report-v6.pdf>.
- Casa Blanca, La (2022), “Fact sheet: Biden-Harris Administration announces roadmap for nature-based solutions to fight climate change, strengthen communities, and support local economies” [Hoja informativa: La administración Biden-Harris anuncia hoja de ruta para soluciones basadas en la naturaleza destinadas a combatir el cambio climático, fortalecer comunidades y apoyar a las economías locales], en: <www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-

[releases/2022/11/08/fact-sheet-biden-%E2%81%A0harris-administration-announces-roadmap-for-nature-based-solutions-to-fight-climate-change-strengthen-communities-and-support-local-economies](https://www.fishbase.org/news/releases/2022/11/08/fact-sheet-biden-%E2%81%A0harris-administration-announces-roadmap-for-nature-based-solutions-to-fight-climate-change-strengthen-communities-and-support-local-economies)> (consulta realizada el 4 de enero de 2023).

- Chávez, V., A. Uribe Martínez, E. Cuevas, R. E. Rodríguez Martínez, B. I. van Tussenbroek, V. Francisco, M. Estévez, L. B. Celis, L. V. Monroy Velázquez, R. Leal Bautista, L. Álvarez Filip, M. García Sánchez, L. Masia y R. Silva (2020), “Massive influx of pelagic sargassum spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities” [Desafíos y oportunidades sobre la afluencia masiva de especies pelágicas de sargazo en las costas del Caribe mexicano 2014-2020], *Water*, núm. 10, pp. 1-24, en: <doi.org/10.3390/w12102908>.
- Chávez, V., D. Lithgow, M. Losada y R. Silva Casarín (2021), “Coastal green infrastructure to mitigate coastal squeeze” [Infraestructura costera verde para mitigar la compresión de la costa], *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, vol. 2, núm. 1, pp. 1-12, en: <doi.org/10.1186/s43065-021-00026-1>.
- Chen, W. L., P. Muller, R. C. Grabowski y N. Dodd (2022), “Green nourishment: an innovative nature-based solution for coastal erosion” [Regeneración verde: solución innovadora basada en la naturaleza frente a la erosión costera], *Frontiers in Marine Science*, núm. 8, art.: 814589, en: <doi.org/10.3389/fmars.2021.814589>.
- Ciudad de Surrey (2022), “Mud Bay Foreshore Enhancements” [Mejoras en la zona intramareal de Mud Bay], en: <www.surrey.ca/services-payments/water-drainage-sewer/flood-control-and-prevention/coastal-flood-adaptation-projects/mud-bay> (consulta realizada el 2 de septiembre de 2022).
- Coastal First Nations (2010), *Forest carbon credits – economic revenue for forest conservation* [Créditos de carbono forestal: ingresos económicos para la conservación de los bosques], en: <coastalfirstnations.ca/wp-content/uploads/2017/06/CFN-Carbon-Credit-info-brochure-.pdf>.
- Columbia Británica (2020), *Hazard, risk and vulnerability analysis (HRVA). For local authorities and First Nations* [Análisis de peligros, riesgos y vulnerabilidades. Para autoridades locales y Primeras Naciones], Emergency Management BC, en: <www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/local-government/hrva/guides/companion_guide_to_the_hrva.pdf>.
- Columbia Británica (2022), “The Dike Maintenance Act” [Ley sobre Mantenimiento de Diques], en: <www.bclaws.gov.bc.ca/civix/document/id/complete/statreg/00_96095_01> (consulta realizada el 26 de enero de 2023).
- Condado Miami-Dade (2010), *Miami-Dade County Beach Erosion Control Master Plan* [Plan maestro de control de la erosión de las playas del condado de Miami-Dade], en: <www.miamidade.gov/environment/library/reports/beach-renourishment-doc.pdf>.
- Costanza, R., O. Pérez Maqueo, M. Luisa Martínez, P. Sutton, S. J. Anderson y K. Mulder (2008), “The Value of Coastal Wetlands for Hurricane Protection” [Valor de los humedales costeros como protección frente a huracanes], *Source*, vol. 37, núm. 4, pp. 241-248, en: <www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/2008_J_Costanza_HurricaneProtection.pdf>.
- De Looff, H., T. Welp, N. Snider y R. Wilmlink (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 (eds.), informe

- especial, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <hdl.handle.net/11681/41946>.
- De Schipper, M. A., S. de Vries, G. Ruessink, R. C. de Zeeuw, J. Rutten, C. van Gelder-Maas (2016), “Initial spreading of a mega feeder nourishment: observations of the Sand Engine pilot project” [Observaciones en torno al esparcimiento inicial de material de regeneración del megaproyecto piloto *Sand Engine*], *Coastal Engineering*, núm. 111, pp. 23-38, en: <[doi:10.1016/j.coastaleng.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.011)>.
- De Vries, J., D. Reed, S. K. McKay, T. Bouma, S. E. Cunniff, B. Grasmeijer, P. Mason, A. Nicholson, P. Quinn y J. M. Smith (2021), “Planning and implementing NNBF using a systems approach” [Planificación e implementación de atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza con un enfoque sistémico], capítulo 4, 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 (eds.), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- Dean, R. (2002), *Beach Nourishment Theory and Practice* [Teoría y práctica sobre la regeneración de playas], World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Hackensack, Nueva Jersey, ISBN 9789810215484.
- Dean, R. G. y R. A. Dalrymple (2010), *Coastal Processes with Engineering Applications* [Procesos costeros con aplicaciones de ingeniería], Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, en: <doi.org/10.1017/CBO9780511754500>.
- DHI (2022a), *Co-benefits of nature-based solutions: a practical synthesis* [Cobeneficios de soluciones basadas en la naturaleza: síntesis práctica], Comisión para la Cooperación Ambiental.
- DHI (2022b), *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], Comisión para la Cooperación Ambiental.
- DHI (2022c), *Monitoring the efficacy of nature-based solutions: a practical synthesis* [Monitoreo de la eficacia de soluciones basadas en la naturaleza: síntesis práctica], Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Diez, J. J., M. D. Esteban, R. Paz, J. S. López Gutiérrez, V. Negro, J. V. Monnot (2011), “Urban Coastal Flooding and Climate Change” [Inundaciones costeras urbanas y cambio climático], *Journal of Coastal Research*, núm. 64, pp. 205-209, Szczecin, Polonia, ISSN 0749-0208, en: <www.jstor.org/stable/26482162>.
- Doberstein, B., J. Fitzgibbons y C. Mitchell (2019), “Protect, accommodate, retreat or avoid (PARA): Canadian community options for flood disaster risk reduction and flood resilience” [Proteger, adaptar, retirar o evitar (PARE): opciones comunitarias canadienses para reducir el riesgo de inundaciones y aumentar la resiliencia], *Natural Hazards*, núm. 98, pp. 31-50, en: <doi.org/10.1007/s11069-018-3529-z>.
- Doswald, N., S. Janzen, U. Nehren, K. Santamaría, M. J. Vervest, J. Sans, L. Edbauer, S. Chavda, S. Sandholz, F. Renaud, V. Ruiz, L. Narváez, S. Yang, D. Mohil, D. Uzoski, N. Gerner y C. Grey (2021), “Nature-Based Solutions for Disaster Risk Reduction” [Soluciones basadas en la naturaleza para reducir el riesgo de desastres], serie de guías “De las palabras a la acción”, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastre, en: <www.preventionweb.net/files/74082_naturebasedsolutionsfordrr20210624c.pdf>.

- Duarte, C. M., I. J. Losada, I. E. Hendriks, I. Mazarrasa y N. Marbà (2013), “The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation” [Función de las comunidades vegetales costeras en la mitigación y adaptación al cambio climático], *Nat. Clim. Change*, núm. 3, pp. 961-968, en: <doi.org/10.1038/nclimate1970>.
- Earth Security (2021), *The blended finance playbook for nature-based solutions* [Manual de financiamiento mixto para soluciones basadas en la naturaleza], en: <www.convergence.finance/resource/the-blended-finance-playbook-for-nature-based-solutions/view>.
- Eger, A. M., C. Layton, T. A. McHugh, M. Gleason y N. Eddy (2022), *Kelp Restoration Guidebook: Lessons Learned from Kelp Projects Around the World* [Guía de restauración de bosques de kelp: lecciones aprendidas de proyectos sobre kelp en todo el mundo], The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, Estados Unidos, en: <kelpforestalliance.com/TNC-KFA-Kelp-Guidebook-2022.pdf>.
- Environment Agency (2022), *Shoreline management plans* [Planes de manejo de la línea costera], Gobierno del Reino Unido, en: <www.gov.uk/government/publications/shoreline-management-plans-smmps/shoreline-management-plans-smmps>.
- Eyquem, J. L. (2021), *Rising Tides and Shifting Sands: Combining Natural and Grey Infrastructure to Protect Canada's Coastal Communities* [Mareas crecientes y arenas movedizas: combinación de infraestructura natural y gris para proteger a comunidades costeras de Canadá], Intact Centre on Climate Adaptation, Universidad de Waterloo, en: <www.intactcentreclimateadaptation.ca/wp-content/uploads/2021/12/UoW_ICCA_2021_12_Coastal_Protection_Grey_NbS.pdf>.
- US FHWA (2018), *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide* [Guía de implementación de soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia de las autopistas costeras], US Federal Highway Administration, en: <www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/ongoing_and_current_research/green_infrastructure/implementation_guide/fhwahep19042.pdf>.
- FEMA (2016), *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping – Coastal Water Levels* [Guía para el análisis y levantamiento de mapas de riesgo de inundación: niveles de agua costeros], Federal Emergency Management Agency [Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos], en: <www.fema.gov/sites/default/files/2020-02/Coastal_Water_Levels_Guidance_May_2016.pdf>.
- FEMA (2021), “The Southern Flow Corridor Flood Reduction and Habitat Restoration Project” [Proyecto de reducción de inundaciones y restauración del hábitat del corredor de flujo sur], Federal Emergency Management Agency [Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos], en: <www.fema.gov/case-study/southern-flow-corridor-flood-reduction-and-habitat-restoration-project> (consulta realizada el 20 de octubre de 2022).
- FEMA (2022), “Building resilient infrastructure and communities” [Construir infraestructura y comunidades resilientes], Federal Emergency Management Agency [Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos], en: <www.fema.gov/grants/mitigation/building-resilient-infrastructure-communities> (consulta realizada el 18 de enero de 2023).
- Florida Department of Environmental Protection (2021), “Project GreenShores” [Proyecto *GreenShores*], Departamento de Protección Ambiental de Florida, en: <floridadep.gov/rcp/aquatic-preserve/content/project-greenshores> (consulta realizada el 22 de octubre de 2022).

- Ford, J. D., N. Couture, T. Bell y D. G. Clark (2018), “Climate change and Canada’s north coast: research trends, progress, and future directions” [Cambio climático y costa norte de Canadá: tendencias de investigación, progreso y orientaciones futuras], *Environmental Reviews*, núm. 26, pp. 82-92, en: <doi.org/10.1139/er-2017-0027>.
- Gailani, J., P. Whitfield, E. Murphy, J. de Vries, G. Thomson, W. Mears y D. Szimanski (2021), “Islands” [Islas], capítulo 11 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 (eds.), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- Gedan, K. B., M. L. Kirwan, E. Wolanski, E. B. Barbier y B. R. Silliman (2011), “The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm” [Función presente y futura de la vegetación de los humedales costeros en la protección de las costas: respuesta a los recientes desafíos al paradigma], *Climatic Change*, núm. 106, pp. 7-29, en: <[doi:10.1007/s10584-010-0003-7](https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7)>.
- Ghanbari, M., M. Arabi, S. Kao, J. Obeysekera y W. Sweet (2021), “Climate Change and Changes in Compound Coastal Riverine Flooding Hazard Along the U.S. Coasts” [Cambio climático y variación de los riesgos de inundación costera fluvial compuestos a lo largo de las costas de Estados Unidos], *Earth’s Future*, núm. 9, en: <doi.org/10.1029/2021EF002055>.
- Gijssman, 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: análisis sobre la reducción del riesgo de inundaciones costeras con manglares], *Frontiers in Marine Science*, núm. 8, pp. 1-26, en: <doi.org/10.3389/fmars.2021.702412>.
- Godoy, E. (2022), “Mexico’s blue carbon pioneers progress despite lack of state support” [Pioneros del carbono azul en México avanzan a pesar de la falta de apoyo estatal], Earth Journalism Network, 24 de julio, Sinanché, México, en: <earthjournalism.net/stories/mexicos-blue-carbon-pioneers-progress-despite-lack-of-state-support> (consulta realizada el 28 de septiembre de 2022).
- Gray, D. H. (1995), “Influence of Vegetation on the Stability of Slopes. Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection, and Ecology” [Influencia de la vegetación en la estabilidad de las laderas: vegetación y laderas: estabilización, protección y ecología], memorias de la Conferencia Internacional, Oxford, Reino Unido, 29 y 30 de septiembre de 1994; Barker, D. H., T. Telford (eds.), American Society of Civil Engineers, Londres, Reino Unido; Nueva York, Nueva York, Estados Unidos, pp. 2-25, ISBN 0727720317, en: <doi.org/10.1680/vasspae.20313.0002>.
- Green-Gray CP (2020), *Practical guide to implementing green-gray infrastructure* [Guía práctica para implementar infraestructura verde-gris], Green-Gray Community of Practice – Conservation International, en: <www.conservation.org/projects/global-green-gray-community-of-practice>.
- Hall, J. W., R. J. Dawson, P. B. Sayers, C. Rosu, J. B. Chatterton y R. Deakin (2003), “A methodology for national-scale flood risk assessment” [Metodología para evaluar el riesgo de inundaciones a escala nacional], memorias de la Institución de Ingenieros Civiles - Ingeniería Marítima e Hidráulica, vol. 156, núm. 3, pp. 235-247, en: <doi.org/10.1680/wame.2003.156.3.235>.
- Hanley M. E., S. P. G. Hoggart, D. J. Simmonds, A. Bichot, M. A. Colangelo, F. Bozzeda, H. Heurtefeux, B. Ondiviela, R. Ostrowski, M. Recio, R. Trude, E. Zawadzka-Kahlau y R. C.

- Thompson (2014), “Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes” [¿Arenas movedizas? Protección costera mediante bancos de arena, playas y dunas], *Coastal Engineering*, núm. 87, pp. 136-146, en: <[dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.020](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.020)>.
- IBC (2023), “Nature based solutions” [Soluciones basadas en la naturaleza], Insurance Bureau of Canada [Oficina de Aseguradoras de Canadá], en: <www.ibc.ca/pe/disaster/nature-based-solutions> (consulta realizada el 19 de enero de 2023).
- Institute for Sustainable Infrastructure (2022), “Verify a project” [Verifica un proyecto], en: <<https://sustainableinfrastructure.org/project-verification/verify-a-project/>> (consulta realizada el 25 de enero de 2023).
- IPCC (2007), *Impacts, adaptations and vulnerability* [Cambio climático 2007: impactos, adaptación y vulnerabilidad; contribución del Grupo de Trabajo II al *Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*], Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos, M. L. Change *et al.* (eds.), Cambridge University Press, en: <www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf>.
- IPCC (2012), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation* [Manejo de los riesgos de eventos extremos y desastres para promover la adaptación al cambio climático], informe especial de los Grupos de Trabajo I y II del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos, C. B. Field *et al.* (eds.), Cambridge University Press, p. 582, en: <www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.
- 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 Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*], Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds.), Cambridge University Press, art.: 10.1017/9781009325844, en: <report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf>.
- ISO (2021), “ISO 14091:2021(en)”, *Adaptation to climate change — guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment* [Adaptación al cambio climático: directrices sobre vulnerabilidad, impactos y evaluación de riesgos], Organización Internacional de Normalización, en: <www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14091:ed-1:v1:en>.
- Jones, R. N., A. Patwardhan, S. J. Cohen, S. Dessai, A. Lammel, R. J. Lempert, M. M. Q. Mirza y H. von Storch (2014), “Foundations for decision making” [Fundamentos para la toma de decisiones], en: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad; contribución del Grupo de Trabajo II al *Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*], Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos, pp. 195-228, en: <www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap2_FINAL.pdf>.

- Jordan, P. y P. Fröhle (2022), “Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation? A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection” [¿Salvar la brecha entre la ingeniería costera y la conservación de la naturaleza? Análisis de los ecosistemas costeros como soluciones basadas en la naturaleza para la protección de las costas], *Journal of Coastal Conservation*, vol. 26, núm. 4, en: doi.org/10.1007/s11852-021-00848-x.
- Journey, M., S. Talwar, B. Brodaric y N. L. Hastings (2015), “Disaster resilience by design: a framework for integrated assessment and risk-based planning in Canada” [Resiliencia ante desastres basada en el diseño: marco para la evaluación integral y la planificación basada en el riesgo en Canadá], *Geological Survey of Canada*, núm. 7551, p. 336, en: doi.org/10.4095/296800.
- Judge, J., S. Newkirk, K. Leo, W. Heady, M. Hayden, S. Veloz, T. Cheng, B. Battalio, T. Ursell y M. Small (2017), *Case studies of natural shoreline infrastructure in coastal California: a component of identification of natural infrastructure options for adapting to sea-level rise (California's Fourth Climate Change Assessment)* [Estudios de caso de infraestructura natural de la línea costera en California: componente en la identificación de opciones de infraestructura natural como medida de adaptación frente al aumento del nivel del mar (cuarta evaluación del cambio climático en California)], The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, Estados Unidos, en: scc.ca.gov/files/2017/11/tnc_Natural-Shoreline-Case-Study_hi.pdf.
- Kalloe, S. A. (2019), *Wave damping potential of woody riparian vegetation: Comparing terrestrial laser scanning with manual measuring techniques* [Potencial de amortiguamiento de olas de la vegetación ribereña leñosa: comparación entre el escaneo láser terrestre y técnicas de medición manual], tesis para obtener el grado de maestría, Universidad Tecnológica de Delft, repositorio, en: repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6e9c1f7a-4ef9-48ef-bb97-796a9b74fe6b/datastream/OBJ/download.
- Kalloe, S. A., B. Hofland, J. A. A. Antolinez y B. K. van Wesenbeeck (2022), “Quantifying frontal-surface area of woody vegetation: a crucial parameter for wave attenuation” [Cuantificación de la superficie frontal de vegetación leñosa: parámetro crucial para la atenuación de las olas], *Front. Mar. Sci.*, núm. 9, en: doi.org/10.3389/fmars.2022.820846.
- Kim, J., E. Murphy, I. Nistor, S. Ferguson y M. Provan (2021), “Numerical analysis of storm surges on Canada’s western Arctic coastline [Análisis numérico de las marejadas ciclónicas en la costa occidental del Ártico canadiense], *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, núm. 3, p. 326, en: doi.org/10.3390/jmse9030326.
- Kirwan, M. L. y J. P. Megonigal (2013), “Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise” [Estabilidad de los humedales intermareales frente a los impactos humanos y el aumento del nivel del mar], *Nature*, núm. 504, pp. 53-60, en: doi.org/10.1038/nature12856.
- Levy, N., O. Berman, M. Yuval, Y. Loya, T. Treibitz, E. Tarazi y O. Levy (2022), “Emerging 3D technologies for future reformation of coral reefs: Enhancing biodiversity using biomimetic structures based on designs by nature” [Tecnologías 3D emergentes para la futura reforma de los arrecifes de coral: mejorar la biodiversidad utilizando estructuras biomiméticas basadas en diseños de la naturaleza], *Science of the Total Environment*, núm. 830, art.: 154749, en: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154749.
- Lodder, Q., C. Jeuken, R. Reinen-Hamill, O. Burns, R. Ramsdell, III, J. de Vries, B. McFall, S. IJff, C. Maglio y R. Wilmlink (2021), “Beaches and Dunes” [Playas y dunas], capítulo 9, en: *Natural and Nature-Based Features Guidelines* [Directrices sobre elementos naturales y atributos basados en la naturaleza], T. S. Bridges, J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder y R.

- K. Mohan (eds.), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <[dx.doi.org/10.21079/11681/41946](https://doi.org/10.21079/11681/41946)>.
- Löfqvist, S., F. Kleinschroth, A. Bey, A. de Bremond, R. DeFries, J. Dong, F. Fleischman, S. Lele, D. Martin, P. Messerli, P. Meyfroidt, M. Pfeifer, S. Rakotonarivo, N. Ramankutty, V. Ramprasad, P. Rana, J. Rhemtulla, C. Ryan, I. Vieira, G. Wells y R. Garrett (2022), “How social considerations improve the equity and effectiveness of ecosystem restoration” [De qué manera las consideraciones sociales mejoran la equidad y la eficacia de la restauración de ecosistemas], *BioScience*, biac099, en: <doi.org/10.1093/biosci/biac099>.
- Lokman, K. (2022), “How do you integrate co-benefits into a NBS value proposition? Living with water – case studies” [¿De qué manera integrar los cobeneficios en una propuesta de valor sobre SbN? Vivir con el agua: estudios de caso], presentación realizada en el taller sobre los cobeneficios de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) de la serie de talleres sobre soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en las costas de la CCA, en: <www.cec.org/es/eventos/serie-de-talleres-sobre-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-para-hacer-frente-a-inundaciones-en-las-costas-taller-sobre-los-cobeneficios-de-las-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-sbn/>.
- Lowe, R. J., E. McLeod, B. G. Reguero, S. Altman, J. Harris, B. Hancock, R. ter Hofstede, E. Rendle, E. Shaver y J. M. Smith (2021), “Reefs” [Arrecifes], capítulo 12, 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 (eds.), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <[dx.doi.org/10.21079/11681/41946](https://doi.org/10.21079/11681/41946)>.
- Martell, R., E. Mendoza, I. Mariño Tapia, I. Odériz y R. Silva (2020), “How Effective Were the Beach Nourishments at Cancun?” [¿Cuán eficaz resultó el programa de regeneración de playas en Cancún?], *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, núm. 6, p. 388, en: <doi.org/10.3390/jmse8060388>.
- Maun, A. y D. Fahselt (2009), “Dune systems in relation to rising seas”, capítulo 13, en: *The biology of coastal sand dunes* [Biología de las dunas de arena costeras], Oxford, en: <doi.org/10.1093/oso/9780198570356.003.0018>.
- Mayakoba (2020), *Mayakoba Sustentable*, en: <viewer.joomag.com/mayakoba-sustentable-2020-revista2020/0429507001564016107?short>.
- Menéndez, P., I. J. Losada, S. Torres Ortega, S. Narayan y M. W. Beck (2020), “The global flood protection benefits of mangroves” [Beneficios globales de los manglares en la protección frente a inundaciones], *Nature Scientific Reports*, vol. 10, núm. 1, pp. 1-11.
- MNAI (2023), “Innovative, new, nature-based insurance product to help protect natural assets” [Producto de seguro innovador, novedoso y basado en la naturaleza para ayudar a proteger los activos naturales], Municipal Natural Assets Initiative [Iniciativa de Activos Naturales Municipales], en: <<https://mnai.ca/insurance-protect-natural-assets/>> (consulta realizada el 6 de septiembre de 2023).
- Molnar, M., P. Olmstead, M. Mitchell, C. Raudsepp-Hearne y M. Anielski (2021), “Ecosystem Services” [Servicios de los ecosistemas], capítulo 5, en: *Canada in a Changing Climate: National Issues Report* [Canadá en un contexto de cambio climático: informe sobre problemáticas nacionales], Gobierno de Canadá, Ottawa, Ontario, en: <changingclimate.ca/national-issues/chapter/5-0/>.

- Montgomery, J. M., K. R. Bryan, J. C. Mullarney y E. M. Horstman (2019), “Attenuation of Storm Surges by Coastal Mangroves” [Atenuación de las marejadas ciclónicas mediante manglares costeros], *Geophysical Research Letters*, vol. 46, núm. 5, pp. 2680-2689, en: doi.org/10.1029/2018GL081636.
- Morris, R. L., T. M. Konlechner, M. Ghisalberti y S. E. Swearer (2018), “From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence” [Del gris al verde: eficacia de las soluciones de ecoingeniería para la defensa costera basada en la naturaleza], *Global Change Biology*, vol. 24, núm. 5, pp. 1827-1842, en: doi.org/10.1111/gcb.14063.
- Murphy, Enda, L. Tamsin, J. Wiebe, S. Hund, M. Davies y D. Williamson (2020), *Coastal flood risk assessment guidelines for building and infrastructure design: supporting flood resilience on Canada’s coasts* [Directrices de evaluación de riesgos de inundación costera para el diseño de edificios e infraestructuras: fortalecimiento de la resiliencia ante inundaciones en las costas canadienses], National Research Council of Canada: Ocean, Coastal and River Engineering [Ingeniería oceánica, costera y fluvial], en: publications.gc.ca/collections/collection_2021/cnrc-nrc/NR16-333-2020-eng.pdf.
- Naciones Unidas (2015), *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* [Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030], en: www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030.
- Narayan, S., M. W. Beck, B. G. Reguero, I. J. Losadavan, B. Wesenbeeck, N. Pontee, J. N. Sanchirico, J. C. Ingram, G. M. Lange y K. A. Burks-Copes (2016), “The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences” [Eficacia, costos y beneficios que ofrecen las defensas naturales y otras basadas en la naturaleza para la protección de las costas], *PLoS ONE*, vol. 11, núm. 5, en: doi.org/10.1371/journal.pone.0154735.
- Narayan, S., S. Hanson, R. J. Nicholls, D. Clarke, P. Willems, V. Ntegeka y J. Monbaliu (2012), “A holistic model for coastal flooding using system diagrams and the Source-Pathway-Receptor (SPR) concept [Modelo integral de inundaciones costeras mediante diagramas de sistema y el concepto fuente-vía-receptor], *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, núm. 12, pp. 1431-1439, en: [doi:10.5194/nhess-12-1431-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-1431-2012).
- Naturally Resilient Communities (2022a), *Case study: South Cape May Meadows, Cape May Point, New Jersey* [Estudio de caso: South Cape May Meadows, Cape May Point, Nueva Jersey], en: nrcsolutions.org/wp-content/uploads/2017/09/NRC_CaseStudies_CapeMayPoint_NJ.pdf (consulta realizada el 28 de julio de 2022).
- Naturally Resilient Communities (2022b), *Case study: Pensacola, Florida* [Estudio de caso: Pensacola, Florida], en: nrcsolutions.org/wp-content/uploads/2017/06/NRC_CaseStudies_Pensacola_FL.pdf (consulta realizada el 20 de octubre de 2022).
- NOAA (2022a), “Bipartisan Infrastructure Law” [Ley Bipartidista de Infraestructura], National Oceanic and Atmospheric Administration [Administración Nacional Oceánica y Atmosférica], en: www.noaa.gov/infrastructure-law (consulta realizada el 19 de enero de 2023).
- NOAA (2022b), “National Coastal Resilience Fund” [Fondo Nacional de Resiliencia Costera], National Oceanic and Atmospheric Administration [Administración Nacional Oceánica y Atmosférica], en: www.coast.noaa.gov/resilience-grant/ (consulta realizada el 25 de enero de 2023).
- NRCan (2015), “Overview of Climate Change in Canada” [Panorama general del cambio climático en Canadá], Gobierno de Canadá, Natural Resources Canada [ministerio de Recursos Naturales]

- de Canadá], en: <www.nrcan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/overview-climate-change-canada/10321>.
- Nueva Escocia (2021), *Proposed coastal protection act regulations* [Propuesta de reglamento de la Ley de Protección de las Costas], en: <<https://novascotia.ca/coast/docs/part-2-detailed-guide-to-proposed-Coastal-Protection-Act-Regulations.pdf>>.
- O'Shaughnessy, K. A., S. J. Hawkins, A. J. Evans, M. E. Hanley, P. Lunt, R. C. Thompson, R. A. Francis *et al.* (2019), "Design Catalogue for Eco-Engineering of Coastal Artificial Structures: A Multifunctional Approach for Stakeholders and End-Users" [Catálogo de diseño para la ecoingeniería de estructuras artificiales costeras: enfoque multifuncional para las partes interesadas y las personas usuarias finales], *Urban Ecosystems*, núm. 23, pp. 431-443, en: <doi.org/10.1007/s11252-019-00924-z>.
- OCDE (2021), *Scaling up nature-based solutions to tackle water-related climate risks. Insights from Mexico and the United Kingdom* [Ampliar las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos climáticos relacionados con el agua: perspectivas de México y el Reino Unido], Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OECD Publishing, París, en: <doi.org/10.1787/736638c8-en>.
- Odell, R. E., B. R. Hall y P. C. Brooks (2008), "Conceptual design and modeling of restored coastal wetlands" [Diseño conceptual y modelización de humedales costeros restaurados], *Intl. J. River Basin Management*, vol. 6, núm. 3, pp. 283-295, en: <www.doi.org/10.1080/15715124.2008.9635356>.
- Osborne, P. (2022), "Obstáculos o lagunas en los conocimientos o los datos que dificultan una aplicación más amplia de la conversión de SbN", taller sobre conversión de infraestructuras utilizando soluciones basadas en la naturaleza (SbN) de la serie de talleres sobre soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a inundaciones en las costas, Comisión para la Cooperación Ambiental, en: <www.cec.org/wp-content/uploads/2B_PhilOsborne_en.pdf>.
- Pathak, A., P. Glick, L. J. Hansen, L. E. Hilberg, J. Ritter y B. A. Stein (2022), *Incorporating nature-based solutions into community climate adaptation planning* [Incorporar soluciones basadas en la naturaleza en la planificación de la adaptación climática en el ámbito comunitario], National Wildlife Federation [Federación Nacional para la Vida Silvestre] y EcoAdapt, Washington, DC, en: <www.nwf.org/-/media/Documents/PDFs/NWF-Reports/2022-NWF-EcoAdapt_Nature-based_Solutions>.
- Peterson C. H. y M. J. Bishop (2005), "Assessing the Environmental Impacts of Beach Nourishment" [Evaluación de los impactos ambientales de la regeneración de playas], *BioScience*, vol. 55, núm. 10, pp. 887-896, en: <[doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0887:ATEIOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0887:ATEIOB]2.0.CO;2)>.
- Piercy, C. D., N. Pontee, S. Narayan, J. Davis y T. Meckley (2021), "Coastal Wetlands and Tidal Flats" [Humedales costeros y planicies intermareales], capítulo 10, 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, Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- PNUD BIOFIN (2021), "Mexico" [México], Iniciativa Finanzas para la Biodiversidad, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en: <www.biofin.org/mexico> (consulta realizada el 10 de enero de 2023).

- PNUMA (2021), *State of finance for nature: tripling investments in nature-based solutions by 2030* [Estado de las finanzas para la naturaleza: triplicar las inversiones en soluciones basadas en la naturaleza para 2030], Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi, en: wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36145/SFN.pdf.
- Point Blue Conservation Science, Instituto del Estuario de San Francisco y condado de Marín (2019), “Sea-level rise adaptation framework—a user guide to planning with nature as demonstrated in Marin County” [Marco de adaptación ante el aumento del nivel del mar: guía de personas usuarias para planificar con la naturaleza, tal como se demuestra en el condado de Marín], Point Blue Conservation Science (contribución #2239), Petaluma, California, San Francisco Estuary Institute [Instituto del Estuario de San Francisco] (publicación núm. 946), Richmond, California, en: www.pointblue.org/science_blog/sea-level-rise-adaptation-framework/.
- PQB News (2022), “Artificial Spit Near New Qualicum Beach Roundabout Holds up Well as Waves Bash Waterfront” [Espigón artificial cerca de la rotonda de New Qualicum Beach resiste bien el embate de las olas en el sector costero], *Parkville Qualicum Beach News*, en: www.pqbnews.com/news/artificial-spit-near-new-qualicum-beach-roundabout-holds-up-well-as-waves-bash-waterfront/ (consulta realizada el 12 de enero de 2023).
- Qualicum Beach (2022), “Beach Creek Estuary & Marine Spit” [Estuario de Beach Creek y espigón marino], en: www.qualicumbeach.com/beach-creek-estuary-project (consulta realizada el 1 de diciembre de 2022).
- Quantified Ventures (2022), “Environmental Impact Bonds” [Bonos de impacto ambiental], en: www.quantifiedventures.com/what-is-an-environmental-impact-bond (consulta realizada el 19 de enero de 2023).
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, R. J. Diaz y D. Justic (2009), “Global change and eutrophication of coastal waters” [Cambio global y eutrofización de las aguas costeras], *ICES J. Marine Science*, vol. 66, núm. 7, pp. 1528-1537, en: doi.org/10.1093/icesjms/fsp047.
- Rahman, H. M. T., K. Sherren y D. van Proosdij (2019), “Institutional innovation for nature-based coastal adaptation: Lessons from Salt Marsh restoration in Nova Scotia, Canada” [Innovación institucional para la adaptación costera basada en la naturaleza: lecciones de la restauración de las marismas en Nueva Escocia, Canadá], *Sustainability*, vol. 11, núm. 23, p. 6735, en: doi.org/10.3390/su11236735.
- Ráška, P., N. Bezak, C. S. S. Ferreira, Z. Kalantari, K. Banasik, M. Bertola, M. Bourke, A. Cerda, P. Davids, M. Madruga de Brito, R. Evans, D. C. Finger, R. Halbac-Cotoara-Zamfir, M. Housh, A. Hysa, J. Jakubinsky, M. K. Solomun, M. Kaufmann, S. Keesstra, E. Keles, S. Kohnova, M. Pezzagno, K. Potocki, S. Rufat, S. Seifollahi-Aghmiuni, A. Schindelegger, M. Sraj, G. Stankunavicius, J. Stolte, R. Stricevic, J. Szolgay, V. Zupanc, L. Slavikova y T. Hartmann (2022), “Identifying barriers for nature-based solutions in flood-risk management: An interdisciplinary overview using expert community approach” [Identificación de obstáculos para la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza en el manejo de riesgos por inundación: visión interdisciplinaria basada en el enfoque comunitario de especialistas], *J Environ Management*, núm. 310, art.: 114725, en: doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114725.
- Reed, Graeme, N. Brunet, D. McGregor, C. Scurr, T. Sadik, J. Lavigne y S. Longboat (2022), “Toward Indigenous Visions of Nature-Based Solutions: An Exploration into Canadian Federal Climate Policy” [Hacia visiones indígenas de soluciones basadas en la naturaleza: exploración de la política climática federal canadiense], *Climate Policy*, vol. 22, núm. 4, pp. 514-533, en: doi.org/10.1080/14693062.2022.2047585.

- Reguero, B. G., F. Secaira, A. Toimil, M. Escudero, P. Díaz Simal, M. W. Beck, R. Silva, C. Storlazzi e I. J. Losada (2019), “The Risk Reduction Benefits of the Mesoamerican Reef in Mexico” [Los beneficios de reducción de riesgos del Arrecife Mesoamericano en México], *Frontiers in Earth Science*, núm. 7, en: <doi.org/10.3389/feart.2019.00125>.
- Saunders-Hastings, P., M. Barnard y B. Doberstein (2020), *Planned retreat approaches to support resilience to climate change in Canada* [Enfoques de retirada planificada para reforzar la resiliencia frente al cambio climático en Canadá], Natural Resources Canada [ministerio de Recursos Naturales de Canadá], Ottawa, Canadá, en: <doi.org/10.4095/328323>.
- Sayers, P., Y. Li, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen y T. Le Quesne, *Flood-risk management: a strategic approach* [Manejo de riesgos de inundación: enfoque estratégico], Unesco, París, en: <hdl.handle.net/11540/81>.
- Scheres, B. y H. Schüttrumpf (2019), “Enhancing the ecological value of sea dikes” [Realzar el valor ecológico de los diques marinos], *Water*, vol. 11, núm. 8, p. 1617, en: <doi.org/10.3390/w11081617>.
- Semarnat-INECC (2016), *Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy* [Estrategia de México ante el cambio climático a mediados de siglo], Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México, México, en: <unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/mexico_mcs_final_cop22nov16_red.pdf>.
- Shaw, G. R. y S. J. Dundas (2021), *Socio-economic impacts of the Southern Flow Corridor Restoration Project: Tillamook Bay, Oregon* [Impactos socioeconómicos del proyecto de restauración de corredores de flujo del sur: bahía de Tillamook, Oregón], Tillamook Estuaries Partnership, Garibaldi, Oregón, en: <ossfc.files.wordpress.com/2021/12/shawdundas_memooct2021_v3.pdf>.
- Shepard, C. C., C. M. Crain y M. W. Beck (2011), “The protective role of coastal marshes: A systematic review and meta-analysis” [El papel protector de las marismas costeras: revisión sistemática y metanálisis], *PLoS ONE*, vol. 6, núm. 11, pp. 1-11, en: <doi.org/10.1371/journal.pone.0027374>.
- Šile, U., D. Caković, F. Küzmič y D. Stešević (2017), “Trampling Impact on Vegetation of Embryonic and Stabilised Sand Dunes in Montenegro” [Impacto del pisoteo de vegetación de dunas de arena embrionarias y estabilizadas en Montenegro], *Journal of Coastal Conservation*, vol. 21, núm. 1, pp. 15-21, en: <www.jstor.org/stable/45046617>.
- Silva Zúñiga, M. C., G. Watson, G. G. Watkins, A. Rycerz y J. Firth (2020), *Increasing infrastructure resilience with Nature-based solutions (NBS): A 12-step technical guidance document for project developers* [Fortalecimiento de la resiliencia de infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza (SbN): documento de orientación técnica de doce pasos para promotores de proyectos], Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Washington, en: <dx.doi.org/10.18235/0002325>.
- Simm, J. D. (2021), “Introduction to NNBF in coastal systems” [Introducción a los atributos naturales y otros elementos basados en la naturaleza presentes en sistemas costeros], capítulo 8, 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 (eds.), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.

- SNC-Lavalin Inc. (2018), *Design Basis for the Living Dike Concept* [Base de diseño para el concepto “dique vivo”], informe preparado para West Coast Environment Law, documento núm. 644868-1000-41EB-0001, Rev 1, en: <www.wcel.org/publication/design-basis-living-dike-concept>.
- Spalding, M. D. y B. E. Brown (2015), “Warm-water coral reefs and climate change” [Arrecifes de coral de aguas cálidas y cambio climático], *Science*, vol. 350, p. 6262, en: <doi.org/10.1126/science.aad0349>.
- Stewardship Centre for British Columbia (2022a), *The green shores guide to expedited process for nature-based shoreline projects in BC* [Guía de costas verdes para agilizar el proceso de proyectos costeros basados en la naturaleza en Columbia Británica], en: <www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/natural-resource-use/land-water-use/crown-land/crown-land-uses/greenshores_guide_to_foreshore.pdf>.
- Stewardship Centre for British Columbia (2022b), “Green Shores” [Costas verdes], <<https://stewardshipcentrebc.ca/green-shores-home/>> (consulta realizada el 25 de enero de 2023).
- Strain, E. M. A., C. Olabarria, M. Mayer-Pinto, V. Cumbo, R. L. Morris, A. B. Bugnot, K. A. Dafforn et al. (2018), “Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: which interventions have the greatest ecological benefit?” [Ingeniería ecológica de infraestructura urbana para la biodiversidad marina y costera: ¿qué intervenciones tienen el mayor beneficio ambiental?], *Journal of Applied Ecology*, núm. 55, pp. 426-441, en: <doi.org/10.1111/1365-2664.12961>.
- Suedel, B. C., L. A. Naylor, T. Meckley, C. Cairns, J. Bernier, E. Morgereth, W. Mears, C. D. Piercy, y R. ter Hofstede (2021), “Enhancing structural measures for environmental, social, and engineering benefits” [Mejorar las medidas estructurales para obtener beneficios ambientales, sociales y de ingeniería], capítulo 14, 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], U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Misisipi, Estados Unidos, en: <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- 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: potencial de la infraestructura natural e híbrida para fortalecer la resiliencia de nuestras comunidades, economías y ecosistemas costeros], *Environmental Science and Policy*, núm. 51, pp. 137-148, en: <doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>.
- Teutli Hernández, C., J. A. Herrera Silveira, D. J. Cisneros de la Cruz, R. Román Cuesta (2020), *Guía para la restauración ecológica de manglares: lecciones aprendidas*, Cifor, Cinvestav-IPN, UNAM-Sisal PMC, en: <www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/2020-Guide-SWAMP.pdf>.
- The Nature Conservancy (2022), “South Cape May Meadows is a globally renowned birders paradise” [South Cape May Meadows es un paraíso para los observadores de aves de renombre mundial], en: <www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/places-we-protect/south-cape-may-meadows/#link03> (consulta realizada el 19 de octubre de 2022).
- Tillamook Estuaries Partnership (2021), “Southern Flow Corridor Project Supports Millions of Dollars in Community and Economic Benefits” [El proyecto *Southern Flow Corridor* genera millones de dólares en beneficios comunitarios y económicos], en: <www.tbnep.org/southern-flow-corridor-project-supports-millions-of-dollars-in-community-and-economic-benefits.php> (consulta realizada el 20 de octubre de 2022).

- UICN (2020), *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, en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Es.pdf>.
- USACE (2002), *Coastal Engineering Manual (CEM)* [Manual de ingeniería costera], EM 1110-2-1100, Washington, DC, en: www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/.
- USACE (2019a), *Guidelines for Landscape Planting and Vegetation Management at Levees, Floodwalls, Embankment Dams, and Appurtenant Structures* [Directrices para la plantación de paisajes y el manejo de la vegetación en diques, muros de contención, presas de terraplén y estructuras auxiliares], U.S. Army Corps of Engineers, documento técnico núm. ETL 1120-2-583, Department of the Army [Departamento del Ejército], Washington, DC, en: www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EP_1110-2-18.pdf?ver=bVt-L-DvQrASeFS6szPNaw%3D%3D.
- USACE (2019b), *Risk Assessment for Flood Risk Management Studies* [Evaluación de riesgos para estudios de manejo de riesgos por inundación], U.S. Army Corps of Engineers, ER 1105-2-101, Department of the Army [Departamento del Ejército], Washington, DC, en: www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/ER%201105-2-101_Clean.pdf.
- USACE (2021), “Capital Stock: Infrastructure Age” [Capital social: antigüedad de la infraestructura], U.S. Army Corps of Engineers, en: www.iwr.usace.army.mil/Missions/Value-to-the-Nation/Fast-Facts/Capital-Stock/Infrastructure-Age/ (consulta realizada el 24 de enero de 2023).
- Van Alphen, J., L. Bourget, C. Elliott, K. I. Fujita, D. Riedstra, D. Rooke y K. Tachi (2011), *Flood Management Approaches. As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States* [Estrategias de manejo de inundaciones, tal como se practican en Japón, Países Bajos, Reino Unido y Estados Unidos], Institute for Water Resources, informe núm. 2011-R-08, U.S. Army Corps of Engineers, Alexandria, en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:c9995920-75a7-4e1a-ae6e-0f09d473e34e>.
- Van Loon-Steensma, J. M. (2015), “Salt marshes to adapt the flood defences along the Dutch Wadden Sea coast” [Marismas salobres para adaptar las estructuras de defensa frente a inundaciones a lo largo de la costa holandesa del mar de Frisia], *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20, núm. 6, pp. 929-948, en: doi.org/10.1007/s11027-015-9640-5.
- Van Loon-Steensma, J. M. y P. Vellinga (2013), “Trade-offs between biodiversity and flood protection services of coastal salt marshes” [Disyuntivas entre biodiversidad y servicios de protección contra inundaciones de las marismas costeras], *Current opinion in Environmental Sustainability*, núm. 5, pp. 320-326, en: doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.007.
- Van Loon-Steensma, J. M., H. A. Schelfhout y P. Vellinga (2014), “Green adaptation by innovative dike concepts along the Dutch Wadden Sea coast” [Adaptación verde mediante innovadores conceptos de diques a lo largo de la costa holandesa del mar de Frisia], *Environmental Science & Policy*, núm. 44, pp. 108-125, en: doi.org/10.1016/j.envsci.2014.06.009.
- 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 por inundación y erosión costeras y fluviales], Canadian Standards Association, en: www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Nature-Based-Solutions-for-Coastal-and-Riverine-Flood-and-Erosion-Risk-Management.pdf.

- West Coast Environmental Law (2022), “Frequently asked questions: provincial jurisdiction of British Columbia over coastal and ocean matters” [Preguntas frecuentes: jurisdicción provincial de Columbia Británica sobre asuntos costeros y oceánicos], junio, en:
<www.wcel.org/sites/default/files/publications/2020-06-faq-provincialjurisdiction-coastal-updated.pdf> (consulta realizada el 21 de septiembre de 2022).
- Wilmink, R. J. A., Q. J. Lodder y P. Sørensen (2017), “Assessment of the design and behavior of nourishments in the North Sea region. Towards an NSR guideline for nourishments” [Evaluación del diseño y comportamiento de las obras de regeneración en la región del Mar del Norte. Hacia una directriz dirigida a esta área para obras de regeneración], *Coastal Dynamics*, núm. 4, pp. 801-809, en:
<vb.northsearegion.eu/public/files/repository/20171117131215_CoastalDynamics2017paper43Wilminketal.pdf>.
- Wilson, J. y G. Lamont (2021), *Concept designs for neighbourhood-scale coastal adaptation measures in Royston and Qualicum Beach, B.C.* [Diseños conceptuales para medidas de adaptación costera a escala de localidad en Royston y Qualicum Beach, Columbia Británica], Stewardship Centre for B.C. Northwest Hydraulic Consultants, Nanaimo, en:
<www.stewardshipcentrebc.ca/PDF_docs/greenshores/Resources/NHCCConceptDesigns21.pdf>.
- Wilson, J., Nistor, I., Mohammadian, M., Cornett, A., Falkenrich, P. y G. Lamont (2020), “Nature-based coastal protection using large woody debris” [Protección costera basada en la naturaleza utilizando grandes desechos de madera], *Coastal Engineering*, núm. 36, en:
<<https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.8>>.