

Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas

Borja G Reguero, Michael W Beck, Iñigo J Losada & Siddharth Narayan

To cite this article: Borja G Reguero, Michael W Beck, Iñigo J Losada & Siddharth Narayan (2017) Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas, Ribagua, 4:1, 41-58

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/23863781.2017.1332824>



© 2017 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)



Published online: 13 Jul 2017.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 60



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas

Borja G Reguero^{a,b}, Michael W Beck^a, Iñigo J Losada^c y Siddharth Narayan^d

^aInstitute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz, CA; ^bThe Nature Conservancy, Santa Cruz, CA, USA; ^cEnvironmental Hydraulics Institute, University of Cantabria, Spain; ^dNational Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS), University of California, Santa Barbara, CA, USA

RESUMEN

En un contexto de crecientes impactos y riesgos socio-económicos en las costas del planeta, la protección costera basada en ecosistemas surge como un nuevo paradigma que une los principios de protección, sostenibilidad y resiliencia, a la vez que proporciona múltiples beneficios. Este artículo ofrece una perspectiva sobre qué son y cómo se pueden utilizar las defensas naturales en el diseño, planificación y gestión de costas. La política pública muestra un creciente interés por su implementación general y el cuerpo de conocimiento y experiencia alrededor de la también denominada infraestructura 'verde' es creciente, pero aún existen importantes barreras que salvar. Una de ellas es estandarizar su diseño en términos ingenieriles, así como reconocer los aspectos que los diferencian respecto a enfoques tradicionales. La adaptación climática y la reducción de riesgos son áreas en las que su utilización puede ser más significativa, debido a la variedad de servicios que ofrecen. Tanto desde el punto de vista técnico como económico, existen argumentos sólidos para evitar la degradación de los ecosistemas, avanzando su restauración y conservación, como también desde la perspectiva de la defensa de las costas.

Bridging between engineering and ecology: ecosystem based coastal defense

ABSTRACT

In a context of increasing socio-economic impacts and risks in the coastal areas of the planet, coastal protection based on ecosystem features becomes a new paradigm that combines the principles of conservation, sustainability and resilience, while providing multiple benefits. This paper provides a perspective on what these are and how they can be used in the design, planning and management of the coastal zones. Policy-makers are calling for further uptake and implementation across the board and the body of knowledge and experience around the so-called 'green' infrastructure is growing, but there are still major barriers for a widespread uptake. One of them is to standardize designs in engineering terms, recognizing the different characteristics compared to traditional engineering solutions. Climate adaptation and risk reduction are areas where its use may be more significant, for the variety of services they offer. Both technically and economically, there are strong arguments to prevent degradation of ecosystems and to advance in their restoration and conservation, as well as from a coastal defense perspective.

ARTICLE HISTORY

Received 29 January 2016
Accepted 18 June 2016

PALABRAS CLAVE

infraestructura verde; adaptación; reducción de riesgos; ecosistema; ingeniería ecológica; cambio climático; barrera natural; costa

KEYWORDS

green infrastructure; adaptation; risk reduction; ecosystem; ecological engineering; climate change; natural barrier; coastal barrier

1. Introducción

Globalmente, las tormentas y los agentes costeros amenazan cientos de millones de personas e infraestructura en las costas, con importantes impactos económicos [1,2]. En todo el mundo más de 600 millones de personas viven en zonas costeras (datos del año 2000) [3]. Sólo en las ciudades costeras más habitadas se estima que más de 40 millones de personas se encuentran expuestas a inundaciones de 100 años de periodo de retorno [4]. Nueva Orleans se encontraba en este grupo antes de que el huracán Katrina aconteciera en el 2005. De ellas, 30 ciudades tienen entorno al 80% de la

población total expuesta y 19 se encuentran en zonas deltaicas sujetas a subsidencia, tanto en países desarrollados como en los países en vías de desarrollo.

Se prevé que los riesgos costeros aumenten en las próximas décadas, por las amenazas crecientes del cambio climático como la subida del nivel del mar y los cambios en las tormentas, pero también por un mayor desarrollo costero y urbano, el crecimiento demográfico y los cambios geomorfológicos de las costas [5–9]. La población expuesta en las principales ciudades podría llegar hasta 150 millones para la tercera parte del siglo, debido al efecto combinado del cambio climático y el desarrollo, para cuando más de

10 veces el valor económico actual resultaría comprometido [4]. Globalmente, la población expuesta podría aumentar entre 1.6 y 2.2 veces la actual [3].

La pérdida de ecosistemas costeros empeora la situación, ya que contribuye a una mayor exposición de las comunidades y activos a los efectos de las inundaciones y la erosión. Marismas, manglares, arrecifes o praderas marinas son cada vez más escasos en las costas del mundo [10–12]. A su desaparición física les siguen los beneficios que aportan, entre ellos la protección del litoral [13]. Esta desaparición se puede medir en términos económicos. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América (EUA), se ha estimado que los humedales costeros funcionan como ‘diques de protección’ con un valor de aproximadamente \$23.2 billones por año en protección proporcionada ante tormentas [14]. En Louisiana EUA, cada 6 km de aumento marginal en la continuidad de los humedales que protegen Nueva Orleans y otros asentamientos supone salvar entre 3 a 5 propiedades por tormenta y por unidad de planeamiento espacial [15].

En este contexto, a nivel global se invierten miles de millones de dólares en reducir los riesgos y adaptarse a las adversidades del cambio climático, lo cual supone tanto amenazas como oportunidades para los ecosistemas. La mayoría de los fondos para la protección de las costas se dedican a estructuras rígidas como diques, espigones y muros (también denominada infraestructura ‘dura’ o ‘gris’). Estas, en muchas ocasiones, degradan aún más los ecosistemas costeros y la costa adyacente [16–18]. Mientras la necesidad de protección costera y el planificar hoy para enfrentar el clima del futuro son cada vez más evidentes y apremiantes, sus altos costos potenciales y recientes desastres como Katrina (2005), Sandy (2012) o el tifón Haiyan (2013) lo urgen. Esta situación crea una ventana de oportunidad para incorporar características naturales y usar sistemas de protección basados en la Naturaleza para aumentar la resiliencia de las comunidades y reducir el riesgo de desastres.

Por estos motivos, existe un creciente interés en soluciones que aúnan principios de la ingeniería y la ecología (i.e. *ingeniería ecológica* o *infraestructura verde*) que utilizan, asemejan o recurren a elementos naturales, como sistemas dunares, arrecifes o humedales, para proporcionar defensa costera además de brindar su servicio como hábitat [17,19,20]. Este tipo de medidas naturales, en ocasiones referidas como *infraestructura verde*, vienen también respaldadas por experiencia y conocimiento creciente [16,19,21,22]. Este artículo proporciona una visión general de las principales

características, principios, estado del conocimiento y retos de estas medidas para su uso en zonas costeras.

2. Enfoque tradicional de la protección costera y retos futuros

Las políticas de gestión costera en los distintos países varían en cuanto a la consideración de:

- (1) La asunción del riesgo privado frente al público,
- (2) La propiedad privada frente al dominio público costero, y
- (3) La definición e implicaciones de zonas inundables.

Independientemente y en muchas ocasiones, la gestión costera ha fallado en encontrar un balance entre la protección de bienes y personas, el intenso desarrollo experimentado y la conservación medioambiental. Ejemplos de esta situación se pueden encontrar en todas las costas del planeta. Algunos efectos observables son la erosión o inundación por: intervenciones humanas; desaparición de mecanismos de defensa naturales como los arrecifes de coral (e.g. Cancún, México) [23] y manglares (e.g. Indonesia o la India) [24]; o desbalances sedimentarios.

La inversión en defensas costeras nace de las necesidades de protección de infraestructura crítica y de bienes. Tradicionalmente, se ha utilizado infraestructura ‘rígida’ o ‘dura’ como muros de protección, diques, barreras estructurales, etc. Sus principales efectos son la atenuación de agentes como el oleaje, la modificación de patrones sedimentarios y circulatorios, y la generación de barreras físicas ante la inundación. Estas medidas están contrastadas por la experiencia y presentan soluciones efectivas si son diseñadas con una perspectiva integradora y consciente de los efectos derivados. De no ser así, en muchas ocasiones generarán problemas en ecosistemas y zonas adyacentes, por la interrupción de los regímenes naturales (e.g. transporte de sedimentos). Tablas 1 y Tabla 2 muestran un resumen simplificado de ejemplos de estas defensas y sus principales características, en función de si se disponen en: (a) el medio marino o (b) en la costa. Las primeras (Tabla 1) buscan modificar la hidrodinámica, cambiando los patrones de propagación del oleaje, controlando la inundación así como el transporte sedimentario que se reflejará en cambios en la línea de la costa. La Tabla 2, sin embargo, muestra ejemplos de medidas de

Tabla 1. Ejemplos de medidas estructurales que afectan a la hidrodinámica. Elaborado a partir de T. S. Bridges et al. [25] y Cunniff & Schwartz [26]. Créditos de imágenes: rompeolas – xbloc.com; estructura sumergida – proyecto DELOS; otras – Google Earth.

A. Medidas estructurales en el medio marino	Mecanismo de protección costera	Parámetros más relevantes	Ambiente energético	Nivel de protección	Otros factores a tener en cuenta
Diques rompeolas 	Barrera frente al oleaje Afecta a los patrones de oleaje y corrientes Mayor influencia en la morfodinámica del frente costero (gran zona de sombra)	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración espacial • Pendiente • Cota de coronación • Porosidad • Estabilidad frente a oleaje extremo 	Muy Alto	Alto-Muy alto	Gran efecto en las dinámicas costeras; modifica sustancialmente la costa adyacente Es necesario estudiar su efecto en la propagación de las dinámicas y formas costeras
Estructuras sumergidas o de baja cota de coronación 	Rotura del oleaje Afecta a los patrones de oleaje y corrientes Gran influencia en la morfodinámica del frente costero	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración espacial y orientación • Cota de coronación (Profundidad) • Porosidad • Longitud • Anchura • Pendiente • Sustrato • Características del oleaje 	Alto	Medio-Alto	Requiere un estudio cuidadoso de los patrones de circulación Puede proporcionar beneficios como hábitat
Diques exentos 	Afecta a la rotura del oleaje Afecta a los patrones de oleaje y corrientes Gran influencia en la morfodinámica del frente costero	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración espacial y orientación • Porosidad • Longitud • Anchura • Altura de cresta • Distancia a la costa • Distancia entre unidades • Características del oleaje 	Alto	Medio-Alto	Genera zonas de erosión y sedimentación: el diseño debe estudiar la forma final de la costa Es necesario estudiar su efecto en la propagación de las dinámicas.
Espigones 	Contiene el sedimento en celdas estables Afecta a los patrones de oleaje y las corrientes Provoca una segmentación de la costa en pequeñas celdas sedimentarias	<ul style="list-style-type: none"> • Orientación • Longitud • Profundidad • Porosidad • Altura de cresta • Dirección del oleaje 	Alto	Medio-Alto	Puede provocar impactos en la costa adyacente por un desbalance sedimentario

protección estructural que no afectan a las dinámicas directamente, sino que suponen principalmente una protección física ante el oleaje y el nivel del mar y, por tanto, se sitúan en la línea de costa (e.g. muros) o en tierra (e.g. barreras de inundación locales o temporales).

Ante un futuro con un nivel del mar más elevado y otros efectos del cambio climático, la ingeniería

costera tiene grandes retos que enfrentar [28]. La infraestructura de defensa tendrá que ser adaptada para mantener los niveles de protección, estabilidad y su funcionalidad de diseño [29]. Por ejemplo, los diques de protección en los puertos requerirán mayor dimensionamiento [30], pero el cambio en el clima marítimo también puede presentar retos a la operatividad y funcionalidad en general [31]. Las defensas

Tabla 2. Ejemplos de medidas estructurales que suponen, principalmente, una barrera física a la inundación. Elaborado a partir de T. Bridges et al. [27] y Cunniff & Schwartz [26]. Créditos de imágenes: dique – picasa (Wilfrid); barrera Maeslantkering – Aero Lin Photo; muros – The Nature Conservancy; barrera de inundación local – FEMA.gov.

B. Medidas estructurales en la costa o en tierra	Mecanismo de protección costera	Parámetros más relevantes	Ambiente energético	Nivel de protección	Otros factores a tener en cuenta
Diques costeros 	Barrera física a la inundación por oleaje y marea de tormenta	<ul style="list-style-type: none"> • Oleaje y Niveles • Cota de coronación • Pendiente • Rugosidad • Resistencia a la erosión del talud 	Alto	Alto	Si se rebasan o fallan pueden provocar grandes daños. Es necesario estudiar las condiciones de fallo estructural y la aparición de daños que puedan suponer brechas
Muros y revestimientos 	Evita la erosión del frente costero por acción directa del oleaje Modifica el 'runup' sobre el frente costero original	<ul style="list-style-type: none"> • Características del oleaje • Protección frente a la socavación • Cota de coronación • Pendiente • Rugosidad • Permeabilidad 	Bajo hasta Alto	Medio	Puede provocar problemas en la costa adyacente y a los ecosistemas
Barreras ante la inundación y la marea de tormenta 	Barrera a los niveles extremos de inundación	<ul style="list-style-type: none"> • Altura • Nivel extremo de diseño • Régimen y forma de operaciones (apertura y cierre) 	Muy alto (niveles más extremos y mayor nivel de seguridad)	Muy alto	Puede provocar problemas de calidad de aguas si permanecen demasiado tiempo cerradas.
Barreras locales 	Barrera a los niveles extremos de inundación (local)	<ul style="list-style-type: none"> • Altura • Nivel extremo de diseño • Zonas posibles de brecha o rotura • Estabilidad estructural 	Alto	Alto	Medidas locales; si se rebasan o fallan pueden provocar grandes daños. Temporales o definitivas

costeras tendrán que ser mantenidas y actualizadas para hacer frente al cambio climático, si quieren mantener los niveles de diseño y su régimen de operaciones. Esta 'sobreelevación' (i.e. 'sea level allowance') no es lineal con los cambios en el nivel del mar [32]: las estructuras tendrán que ser elevadas más que lo que ascienda el nivel del mar. Esta 'adaptación' estructural es definitivamente una de las opciones disponibles, pero también lo es proporcionar este refuerzo a través de soluciones híbridas con el uso de sistemas naturales.

3. Un nuevo paradigma: la ingeniería basada en la naturaleza y el uso de los ecosistemas como infraestructura

3.1. Qué se entiende por soluciones basadas en ecosistemas

El uso de ecosistemas para proteger la costa se conoce por términos como 'nature-based defenses' en inglés o 'defensas basadas en la naturaleza' (DBN), o '*elementos naturales y basados en características de la naturaleza*' [nature and nature-based features]. Las DBN imitan

características naturales, pero son creados por el diseño humano y construidas para proporcionar servicios específicos [25,27]. Pueden incluir desde ecosistemas costeros naturales como humedales, marismas, playas, sistemas de dunas, o arrecifes; hasta diseños híbridos que aprovechen los beneficios de la naturaleza en combinación con otros elementos estructurales (y unen las fortalezas de ambos) [33]. En términos más amplios (y más allá de su aplicación en zonas costeras), este tipo de medidas se suelen conocer también como ‘infraestructura verde’ [green infrastructure].

La Comisión Europea, por ejemplo, en su estrategia sobre infraestructura verde, la define como ‘una red estratégicamente planificada de áreas naturales y seminaturales con otras diseñadas y gestionadas para ofrecer una amplia gama de servicios de los ecosistemas,’ e incluye espacios verdes (o azules) y otras áreas terrestres y marinas [34].

Algunos ejemplos de medidas naturales son:

- (1) Restauración de playa y sistemas de dunas,
- (2) Islas barreras,
- (3) Restauración de humedales y marismas,
- (4) Arrecifes y estructuras sumergidas o semi-sumergidas,
- (5) Bosques y vegetación costera como manglares, o
- (6) Riveras con distintos tipos de vegetación.

3.2. *Cómo protegen las costas: fundamentos*

Cada vez es mayor el conjunto de conocimientos y experiencias que muestran que las DBN pueden ser una medida eficaz contra las tormentas, la intrusión salina y la erosión [21,35–41]. La [Tabla 3](#) proporciona una visión general de los tipos de medidas más representativos y sus principales características. Los mecanismos principales a través de los que proporcionan protección física son la mitigación de olas mediante fricción y rotura, y la retención de sedimento. Además, los ecosistemas modifican el paisaje de las costas, interactuando dinámicamente con los factores del clima y cambiando la batimetría y la topografía (ejemplos: dunas o arrecifes).

Es necesario diferenciar qué procesos costeros son los relevantes para cada ecosistema para determinar cuán eficaces son. Por ejemplo, los arrecifes afectan principalmente al oleaje, y se quiere conocer cómo modifican los patrones de refracción y difracción para proteger el litoral de forma efectiva. Los humedales costeros son conocidos por atenuar el oleaje y las mareas de tormenta [storm surge] y suponen una zona de resguardo frente a las tormentas [37]: de ahí que

frecuentemente se utilice el término ‘resguardo verde’ [green buffer] para referirse a esta función. La atenuación del oleaje por vegetación se ha estudiado, medido e incorporado ampliamente en modelos numéricos [38,39,41–45]. Para la vegetación costera (marismas, humedales y manglares) es importante tener en cuenta la atenuación tanto en las ondas cortas (i.e. oleaje de viento) como en las largas (i.e. marea de tormenta). La atenuación del oleaje depende de las características de la vegetación (densidad, dimensiones, profundidad, etc.) y del oleaje [46]. El grado de atenuación de las mareas de tormenta (storm surge) depende de las características de la vegetación y de la tormenta, como la velocidad de traslación y la altura de la marea [47,48].

3.3. *Qué las hace diferentes*

La ingeniería basada en ecosistemas se diferencia de la ingeniería tradicional en dos aspectos principales:

- (1) Tener un comportamiento dinámico, adaptable con condiciones cambiantes del clima y bioquímicas; y
- (2) Proporcionar múltiples beneficios a través de los servicios de los ecosistemas como: creación de hábitat, fomento de pesquerías, filtración y calidad de aguas, recreación y turismo [13,49].

Una característica fundamental de las DBN frente a otro tipo de defensas es su comportamiento dinámico y no lineal frente a las acciones [50] y su capacidad de adaptarse al cambio climático [19,51]. Los ecosistemas también enfrentan amenazas derivadas del cambio climático, como son el aumento del nivel del mar, la acidificación, cambios en salinidad y temperatura [5], pero cuentan con mecanismos para adaptarse a las condiciones cambiantes si se proporcionan las condiciones adecuadas [51,52].

Cualquier acción tomada para reducir el impacto de un peligro tendrá consecuencias adicionales. Los ‘efectos indirectos’ de un proyecto surgen cuando estas consecuencias son negativas o empobrecen la biodiversidad. Sin embargo, los ‘co-beneficios’ son impactos positivos adicionales al objetivo principal del proyecto, como la provisión de servicios de ecosistemas. Esto tiene dos implicaciones muy importantes para las DBN: Primero, los servicios de los ecosistemas deben ser tenidos en cuenta al analizar el costo-beneficio de alternativas. Segundo, las medidas ‘verdes’ tienen que ser diseñadas desde un punto de vista integrador, tanto en su aspecto estructural como funcional, y en el espacio entre la ingeniería y la ecología. Deben funcionar

Tabla 3. Ejemplos de defensas naturales, mecanismos de protección, parámetros más relevantes para su efectividad, adaptabilidad al cambio climático, servicios que proporcionan y tipo de ambiente, en función de la energía del oleaje a la que pueden estar expuestos. A partir de estudios anteriores [25–27]: (1) Si se proporcionan las condiciones adecuadas (e.g. aporte de sedimento); (2) Dependiendo del tipo de costa y vegetación, se pueden erosionar por la acción directa del oleaje; (3) Puede evolucionar y adaptarse a cambios en los agentes costeros, así como erosionarse y evolucionar si hay aporte sedimentario y se permiten las condiciones adecuadas. Créditos de imágenes: The Nature Conservancy.

Defensas basadas en la naturaleza	Mecanismo de protección costera	Parámetros más relevantes	Adaptabilidad al cambio climático	Otros Servicios	Ambiente energético
Vegetación costera: humedales, marismas, manglares, vegetación sumergida 	Disipación del oleaje (principalmente por fricción) Disipación de la marea de tormenta (principalmente por fricción) Retención de sedimento Sistema de retención ante inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros vegetales: densidad, altura de vegetación, diámetro, rigidez • Anchura y extensión • Contornos adyacentes (i.e. coastal squeeze) 	Alta Frente a nivel del mar y oleaje (1)	Regulación de la calidad del agua Hábitat Pesca Turismo y Recreativo	Bajo a Medio (2)
Playas y sistemas de dunas 	Alta disipación del oleaje (principalmente por rotura de las olas) Barrera física frente a la marea de tormenta Forman el frente costero y determinan el transporte sedimentario	<ul style="list-style-type: none"> • Características del frente de playa: anchura, sedimento, pendiente • Características de las dunas: elevación, extensión, vegetación • Características de la costa adyacentes (e.g. barreras al flujo de sedimentos) 	Alta Frente a nivel del mar y oleaje (3)	Turismo y recreativo Cultural Hábitat	Alto a Muy Alto
Islas barreras y barreras con vegetación 	Disipación del oleaje (por rotura) Puede disipar y alterar la marea de tormenta Gran influencia en la morfodinámica de la laguna en su trasdós y en los patrones de circulación	<ul style="list-style-type: none"> • Características de la barrera: anchura, elevación, pendiente, sedimento • Características de la laguna en su trasdós: profundidad, extensión, bocanas y desembocaduras 	Alta Frente a nivel del mar y oleaje (3)	Turismo y recreativo Hábitat	Alto a Muy alto
Arrecifes (corales y bivalvos) 	Disipación del oleaje (por rotura y de forma secundaria, por fricción) Afecta a los patrones de oleaje y corrientes Gran influencia en la morfodinámica del frente costero	<ul style="list-style-type: none"> • Cota de coronación • Anchura • Longitud de las unidades • Espacio entre unidades • Distancia a la costa 	Alta Frente a nivel del mar y oleaje	Hábitat y Pesca	Alto a Muy Alto

como solución a problemas costeros (controlados por complejos procesos no lineales) y actuar a la vez como hábitat. La misma exigencia funcional debe aplicarse a los proyectos de ingeniería que derivan en efectos indirectos debidos a planeamientos o diseños pobres que carecen de una visión integral de los procesos (e.g. barreras a los flujos de transporte sedimentario creado por espigones y puertos).

La valoración económica de estos ecosistemas, incluido su rol en las costas, es, en muchas ocasiones, no tenida en cuenta o infravalorada, su valor dado por supuesto, y como resultado no se considera en la toma de decisiones. A modo de ejemplo, tomemos el caso de los manglares. Los manglares cumplen una función determinante para enfrentar el oleaje, la subida del nivel del mar e incluso las tormentas tropicales [53–55], pero en muchos



Figura 1. Cambios entre 1981 y 2005 (izquierda), y 2005 y 2010 (derecha) en dos zonas de México con distinto grado de desarrollo costero. Datos obtenidos del Sistema de Monitoreo de Manglares de México (SMMM).

lugares del mundo continúan desapareciendo. Se estima que en la segunda mitad del siglo XX, se perdieron aproximadamente una tercera parte de los manglares del mundo, en su mayor parte por causa humana, y se espera que esta pérdida aumente en el futuro [56]. La Figura 1 muestra un ejemplo de cambios significativos ocurridos en México que demuestra la pérdida sostenida de manglar en zonas con alto desarrollo, pero que a la vez enfrentan el impacto de huracanes. Por esta razón, cada vez son mayores los esfuerzos por valorar el capital natural por los servicios que nos proporcionan. Un ejemplo es el programa ‘WAVES’ del Banco Mundial para promover el desarrollo sostenible, garantizando que los recursos naturales son integrados en la planificación del desarrollo y las cuentas económicas nacionales.

3.4. Evidencia de Costo-eficiencia

Existe también un argumento económico en el fomento de la protección y restauración de ecosistemas para protección costera. Los ecosistemas son a menudo baratos de mantener [57,58], pero existen muy pocos estudios que comparen de igual a igual las defensas naturales con otras alternativas. Estos ejemplos se limitan a estudios específicos a escala de ciudades [59] y estuarios [60]. No obstante, en ocasiones, incluso pese a presentar ratios más positivos que otras medidas, no son la primera opción debido a otros factores como nivel de seguridad, experiencia o factores de diseño.

Usando modelos de evaluación del riesgo es posible calcular el daño económico evitado por tener los ecosistemas. Una de las principales limitaciones que enfrentan las DBN es la falta de información sobre cómo y dónde pueden ser más costo-eficientes. A modo de ejemplo, utilizando un modelo de riesgos [61] y simulaciones para distintos escenarios de degradación y restauración en el delta del Mississippi [62], una región en EUA con alta erosión y azotada por huracanes, se puede estimar que existe una diferencia de \$800 millones de dólares

entre el escenario de degradación y restauración de una marisma (Figura 2). La degradación supone por encima del 14% más de riesgo sobre una pérdida actual estimada en \$2,800 millones de dólares, sin considerar el efecto tan significativo del nivel del mar y la subsidencia en esta zona (11 mm/año, muy por encima de la media global).

Información de costo-beneficios puede también facilitar la inclusión de DBN en los instrumentos existentes de planeamiento, e.g. en la Unión Europea [34]. La falta de información de gran escala es, en muchas ocasiones, una limitación para la toma de decisiones. Enfoques similares al ejemplo de la Figura 2 son posibles también a escalas regionales para informar la planificación y la política pública. Por ejemplo, en la costa del Golfo de México de EUA se ha demostrado que (1) un desarrollo costero intenso puede ser un factor más determinante para aumentar el riesgo ante los eventos más extremos que el cambio climático, pero independientemente, (2) la adaptación basada en ecosistemas resulta costo-eficiente en la reducción del riesgo [63]. El estudio analiza la costo-eficiencia de medidas rígidas como barreras a la inundación, el aumento elevaciones de casas, o la restauración de hábitats (Figura 3), así como los lugares donde pueden proporcionar mayores beneficios.

3.5. Un nuevo paradigma en la planificación costera, la adaptación y la reducción de riesgos de desastres

Son crecientes las evidencias que demuestran que las DBN pueden mitigar las inundaciones y reducir la erosión, mientras proporcionan otros servicios complementarios [16,35,39,41]. Estas características hacen que su demanda en la planificación, adaptación y reducción de riesgos sea creciente [19,21,22,64].

La adaptación es una respuesta al calentamiento global que busca reducir la vulnerabilidad de los sistemas sociales y biológicos al cambio climático y así contrarrestar los efectos adversos (UNFCCC). Incluso

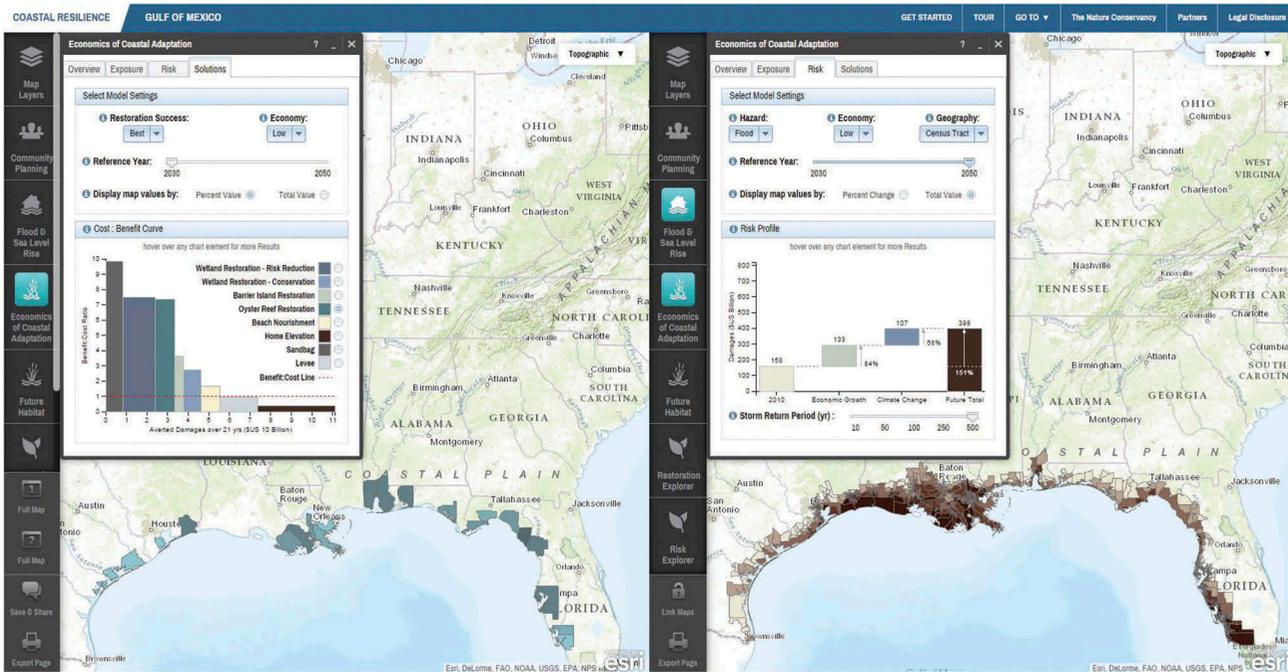


Figura 2. Ejemplo de restauración de marismas en Louisiana (EUA) y beneficio económico en la reducción del riesgo, modelado con HAZUS [61] y escenarios de degradación y restauración [62].

si las emisiones se estabilicen pronto, el calentamiento global y sus efectos persistirán durante años, y la adaptación será necesaria en cualquier caso, para enfrentar sus efectos irreversibles. La adaptación es importante en países en desarrollo, por ser los más afectados por los efectos del cambio climático. La adaptación implica promover soluciones flexibles en lugar de cerrar opciones futuras de forma que se permita a los enfoques evolucionar y responder a condiciones cambiantes, pero evitando el inmovilismo.

La resiliencia busca que los individuos y las comunidades estén en mejores condiciones de hacer frente a los impactos. Muchas de las iniciativas de adaptación al cambio climático se han centrado en el uso de tecnologías y el diseño de infraestructura resilientes al clima. A este respecto, los ecosistemas proporcionan hábitat, refugio, alimentos, materias primas, material genético, purifican el agua, suponen una barrera contra los desastres, una fuente de recursos naturales, son sumideros de carbono y proporcionan muchos otros servicios de los que las personas dependen para su subsistencia, en particular en comunidades en desarrollo, así como valores recreativos y culturales [13,64]. Como defensa natural, en ciertas circunstancias, pueden ser tan eficaces como medidas tradicionales (Tabla 3). La denominada adaptación basada en ecosistemas (ABE) es la utilización de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas como parte de una

estrategia más amplia de adaptación, para ayudar a las personas a adaptarse a los efectos adversos de la variabilidad del clima y el cambio climático [65]. La ABE contribuye a reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia tanto ante el clima como a riesgos no climáticos, y proporciona múltiples beneficios para la sociedad y el medio ambiente. Es una estrategia de no tener arrepentimiento y apta para afrontar la incertidumbre asociada con los impactos del cambio climático [66], además de ser especialmente adecuada para comunidades en desarrollo con menos recursos que invertir en infraestructura más costosa.

Las medidas de adaptación basadas en ecosistemas comúnmente se complementan y alinean con los objetivos que conlleva la reducción del riesgo de desastres [67]: protegen la infraestructura y bienes y contribuyen a la seguridad de las personas al actuar como barreras naturales mitigando el impacto de eventos extremos como inundaciones, sequías, temperaturas extremas, fuegos, deslizamientos, huracanes y ciclones.

Aunque los ecosistemas pueden ayudar a proteger las poblaciones costeras de los impactos del clima [22], existen importantes limitaciones y factores que se deben considerar. En primer lugar, existen límites funcionales en cuanto a reducción de las acciones como el oleaje o las mareas de tormenta. También existen límites ecológicos. En el contexto del cambio climático, puede que las

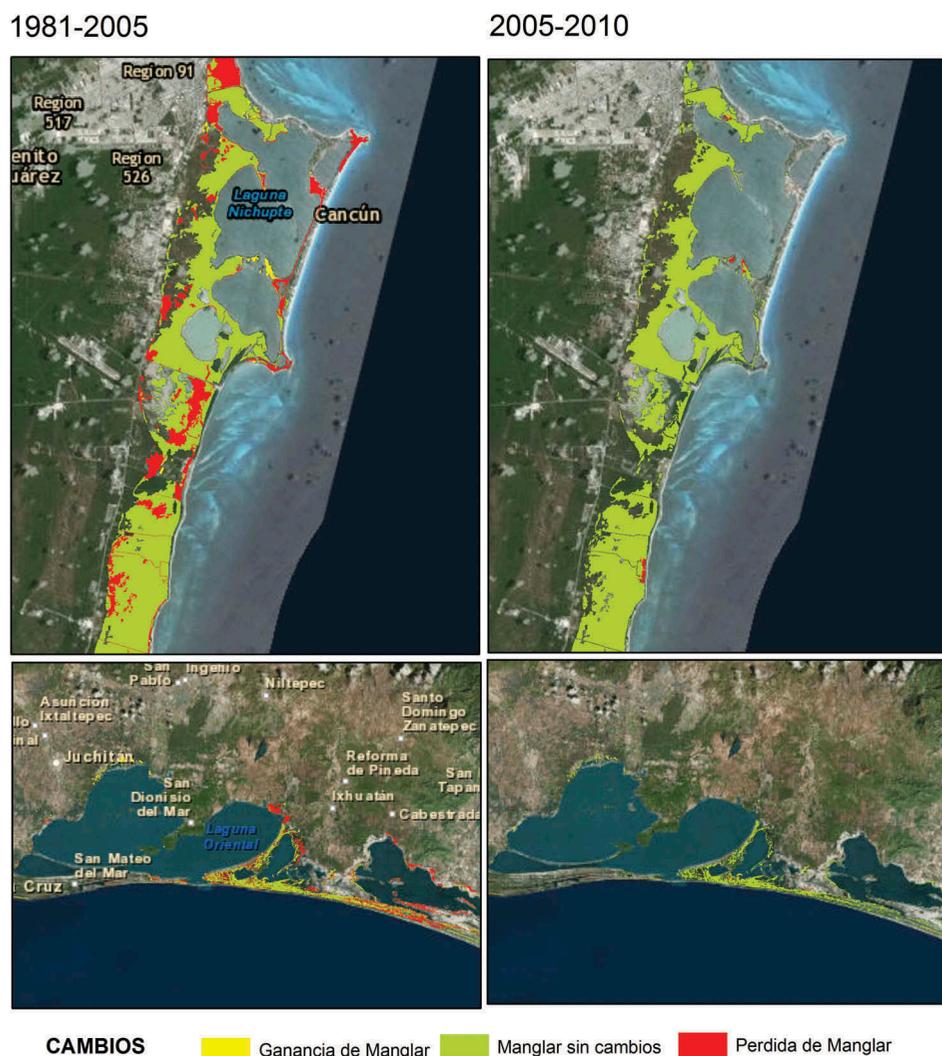


Figura 3. Ejemplo de análisis de gran escala: Economía de Adaptación Costera en el Golfo de México de EUA. Se determinan costos y beneficios de distintas medidas de adaptación (izquierda) y análisis de riesgo por desarrollo costero y clima futuro (derecha). Se puede consultar en: <http://maps.coastalresilience.org/gulfmex/Un> video de demostración está disponible en: <http://coastalresilience.org/economics-of-coastal-adaptation/>

oportunidades para aumentar la resiliencia de los ecosistemas al clima futuro sólo den resultados efectivos en los niveles más básicos de cambio ($\leq 2-3^{\circ}\text{C}$). Más allá de ciertos umbrales, se prevé que los impactos en los ecosistemas sean severos y en gran medida irreversibles [8]. Por ello, no podemos dar por seguro la protección que hoy en día nos brindan y deberíamos fomentar su conservación, restauración y mejora (frente a su continua degradación).

Poder evaluar dónde y cómo la naturaleza se puede utilizar de forma rentable para la defensa costera es de suma importancia para la elaboración de políticas y para fomentar la acción. A nivel de ingeniería, es posible utilizar los procesos naturales para proporcionar beneficios sociales, ambientales y económicos [25], aunque es necesario salvar grandes limitaciones y retos. El siguiente apartado analiza cómo afrontarlos a nivel de planificación y diseño.

4. Estudio y diseño de infraestructura verde

4.1. Evaluación del valor de protección

La protección que los hábitats naturales ofrecen frente a la inundación o erosión se puede valorar siguiendo dos tipos de enfoques, análisis basados en: (1) índices; o (2) procesos:

- (1) Los enfoques **basados en índices** utilizan estimaciones de la exposición y la vulnerabilidad (física y socioeconómica) para calcular un índice relacionado con las características de la zona costera. El índice se puede calcular en diversos escenarios o situaciones, por ejemplo utilizando distintas configuraciones de hábitats naturales o condiciones ambientales, y por comparativa, comprender la gama de posibles impactos y acciones. Por

ejemplo, en la costa de EEUU se han utilizado índices para determinar la peligrosidad de inundación y la protección proporcionada por los ecosistemas [68], así como la vulnerabilidad frente a erosión costera [69,70].

- (2) Por el contrario, las **evaluaciones basadas en procesos** examinan cómo las variables meteorológicas (olas, mareas, corrientes, nivel del mar, viento) influyen los procesos costeros (transporte de sedimento, interacción con estructuras, inundación) para determinar cómo los hábitats modifican estos procesos y evitan impactos o daños. Este enfoque incluye la física de los procesos y proporcionan información cuantitativa de la extensión o magnitud del impacto en función de métricas físicas como la superficie inundada o erosionada, valor económico dañado, etc.

Los enfoques de valoración del riesgo son también aplicables al estudio de las DBN. Entre otras herramientas de gestión, el análisis de riesgos y la identificación de regiones prioritarias (e.g. Figura 3) puede también ayudar a determinar dónde y cómo encontrar soluciones óptimas. Recientemente, el Banco Mundial desarrolló una guía para la valoración del servicio de protección que proporcionan los ecosistemas (corales y manglares) en la reducción de daños y para su inclusión en las cuentas nacionales [71]. La Figura 4 muestra la metodología y los pasos necesarios para aplicar la metodología para ecosistemas costeros [72].

Dado que en el sistema costero hay una intersección entre el sistema natural y el socioeconómico [8], es importante considerar tres partes fundamentales para su estudio (Figura 4):

- (1) Los agentes costeros (hazards) tales como el oleaje o los niveles del mar que condicionan el impacto en la costa, y que varían desde su generación en aguas profundas [offshore] hasta su llegada a las costas;
- (2) La estructura: en este caso el hábitat, que influye en el oleaje y niveles de agua, y podrá modificar los procesos costeros relacionados con la inundación y la erosión;
- (3) Los impactos y daños provocados por la inundación y la erosión sobre bienes, personas y actividades económicas.

Inicialmente es necesario considerar los procesos de los agentes costeros, así como el efecto del hábitat sobre los mismos (pasos 1 y 2 en la Figura 4). La comparativa entre escenarios: ausencia o presencia del ecosistema; combinación de hábitats y estructuras; clima presente y futuro; o distintas situaciones de desarrollo costero. Los impactos costeros, por ejemplo, la inundación del litoral (paso 3) genera daños sobre la infraestructura y bienes (paso 4), que se pueden calcular a partir de curvas de daño, y la distribución de bienes y población en la costa [63]. Se puede calcular el valor del ecosistema como la protección que ofrece entre escenarios (paso 5; e.g. desaparición frente a conservación) y estimar daños anualizados en unidades monetarias.

En general, los modelos y las herramientas para resolver cada uno de los pasos anteriores son de uso habitual en la práctica de ingeniería de costas (véase un apartado dedicado a la explicación de fundamentos de protección). Si bien aún quedan avances que hacer en los modelos numéricos para su uso específico con ecosistemas, gran parte del conocimiento en la

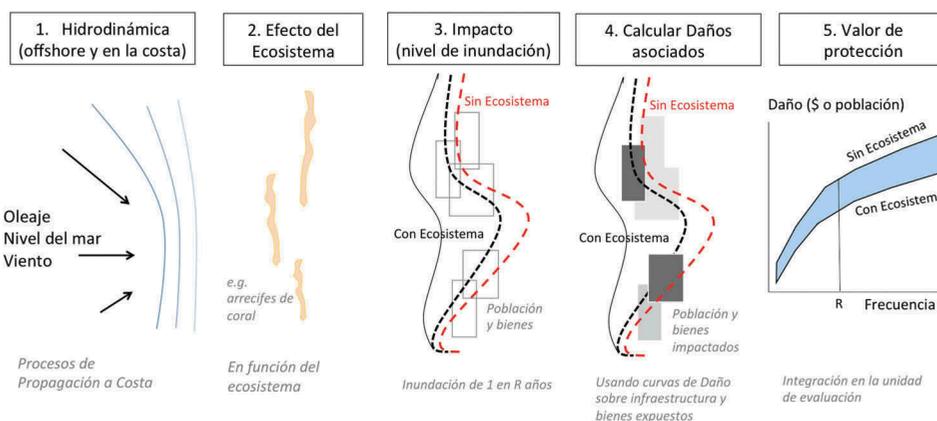


Figura 4. Metodología para la valoración, en términos de reducción del riesgo, de la protección ofrecida por los ecosistemas costeros. Figura modificada [71,72].

disciplina es directamente aplicable. Una sucinta revisión de modelos, herramientas y ejemplos para ayudar en la valoración cuantitativa de la protección se puede encontrar [72]. Otras revisiones y documentos se pueden consultar [48,73–75]. También, en la ‘web’ ‘Coastal Resilience’ [76] proporciona información sobre experiencias y proyectos que reportan beneficios de protección (Figura 5).

4.2. Proceso y pautas para el diseño

El diseño de DBN para la protección costera tiene que considerar dos aspectos diferenciados: (1) los requisitos de protección como la intensidad del peligro, el estándar de protección deseado y el potencial de protección del hábitat; y (2) las limitaciones y técnicas para la restauración del hábitat en cuestión.

Diseñar DBN para proteger bienes y personas implica entender cómo el lugar, tipo y condiciones del hábitat pueden proteger el litoral mediante su efecto en los procesos costeros. Por ejemplo, los manglares pueden atenuar el oleaje, pero sólo están presentes normalmente en ambientes de baja energía con ciertos gradientes de nivel de agua, salinidad y disponibilidad de sedimento [77]. Factores como la escala de los procesos costeros, las condiciones de fallo funcional o estructural, o la escala temporal de diseño son críticos para establecer un paralelismo con otras defensas más convencionales. Estos factores tienen que ser estudiados considerando las particularidades ecológicas y funcionales de los ecosistemas costeros.

Un marco de diseño como el planteado por el ‘Coastal Engineering Manual’ [78], ampliamente utilizado en el diseño ingenieril (Figura 6), es completamente aplicable a la infraestructura ‘verde’. El diseño comienza por la identificación de los problemas, le sigue el análisis de la situación actual y cómo se ha llegado a esos problemas, el estudio de alternativas de solución, su comparación, y termina en la elección de la más óptima, de acuerdo a ciertos criterios predeterminados. Más aún, un marco como este sería recomendable, ya que en muchas ocasiones las defensas basadas en ecosistemas tienen su origen en el campo de la conservación y restauración ambiental, y no resuelven impactos costeros específicos. Existen también marcos de diseño que intentan incluir las características propias de los ecosistemas, e.g.: ‘Engineering with Nature’ (<http://el.erc.usace.army.mil/ewn/>) [25]; o ‘Building With Nature’ – Ecoshape (www.ecoshape.nl) [16,79].

Al diseñar ecosistemas como defensas costeras se tienen que tener en cuenta otros condicionantes propios de su función como ecosistema, como son factores ecológicos o el requerimiento de espacio, por naturaleza, distintos a los de la infraestructura tradicional. Los condicionantes ecológicos y bioquímicos pueden ser críticos para la función ecológica del ecosistema, pero también lo pueden ser para su eficacia ingenieril (e.g. densidad y tipo de vegetación en una marisma). Asegurar el éxito y su funcionalidad tanto desde el punto de vista ingenieril como ecológico exige una multidisciplinaridad en la concepción e

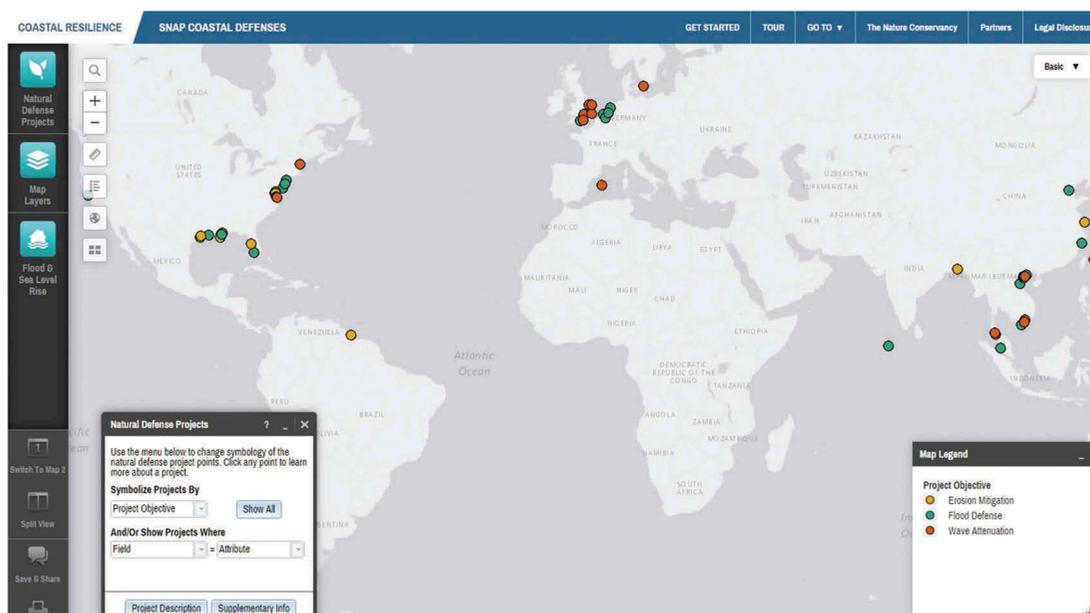


Figura 5. Portal de [coastalresilience.org](http://maps.coastalresilience.org/global/) con información de ecosistemas para la defensa costera. <http://maps.coastalresilience.org/global/>

Marco tradicional de Diseño (Coastal Engineering Manual)



Figura 6. Marco de diseño convencional en ingeniería costera. Elaboración propia a partir de [78].

implementación, i.e. equipos de trabajo multidisciplinares donde ingenieros y ecólogos trabajen en diseños que sean funcionales tanto como estructura como ecosistema.

Una diferencia clave entre el diseño ingenieril y la restauración radica en los objetivos. Por lo general, un proyecto de ingeniería costera responde a un problema específico como la erosión o las inundaciones en un tramo de costa. Por el contrario, la restauración de hábitats a menudo tiene múltiples objetivos, como son la mejora de la biodiversidad o de servicios como la pesca, la regulación de nutrientes, o en algunos casos la protección costera [13].

Estos conceptos se pueden aplicar más allá de las zonas costeras, como las llanuras fluviales. Por ejemplo, *Floodplains by Design* [80] promueve que las llanuras de inundación se utilicen y se gestionen de manera que permitan proporcionar servicios como ecosistemas pero mientras mantienen o mejoran la protección contra inundaciones.

4.3. Espacio propio en la política, planificación y gestión costera

En la política y gestión costera existe un clamor creciente por incorporar el capital natural en los planes y programas en un rango amplio de escalas, desde el ámbito multinacional al de ciudades [33,34,81]. Ofrecer protección contra múltiples peligros es un importante beneficio, ya que rara vez se producen peligros en forma aislada sino que pueden tener lugar simultáneamente o en una cascada de acontecimientos negativos. La variación en la eficacia y la asequibilidad de las opciones sugiere que se debe utilizar una gama de ellas, ya que cada una puede

ser eficaz contra diferentes escalas e intensidades de eventos extremos [63]. El paquete de medidas óptimo es complejo de establecer. La combinación de medidas se puede realizar teniendo en cuenta factores de viabilidad como costes, niveles de protección requeridos, marco legal y permisos, espacio necesario, etc. En general, la implementación de una mayor variedad de opciones aumentará la resiliencia y proporcionará mayores beneficios ante una gama más amplia de impactos.

Sólo desde tiempos recientes se ha considerado utilizar las DBN como defensa en las costas. Un primer marco de clasificación puede considerar el costo y el beneficio (Figura 7) [82], y puede ser informado por el análisis del riesgos y valoración de costos y beneficios a gran escala [63] o a escalas de ciudades [59]. Otras opciones de clasificación pueden distinguir entre mecanismos de protección (tablas 1, 2 y 3); elementos rígidos (e.g. dique) frente a dinámicos (e.g. playas); o si son barreras físicas (e.g. muros) o formas más complejas del paisaje costero (e.g. marismas) [83].

No obstante, unas y otras no son sustitutivas sino complementarias en la mayoría de los casos. A este respecto es útil pensar en esquemas combinados o híbridos y en tipologías de paisajes costeros. Estas tipologías se pueden definir en función de las características geomorfológicas de los tipos de costa [25]. En muchos casos las soluciones híbridas que utilicen combinaciones de elementos naturales e ingeniería pueden aunar los beneficios de ambas. Tal es el caso, por ejemplo, de vegetación costera que disipa el oleaje frente a un dique y ayuda a disminuir su cota de diseño (i.e. disminución de costos y mantenimiento) o aumenta el nivel de seguridad que proporcionaría (i.e. aumento de fiabilidad). En los ambientes urbanos

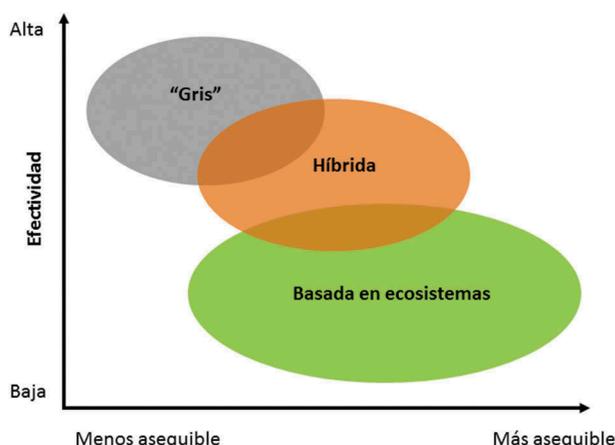


Figura 7. 'Espacio' de las defensas basadas en ecosistemas en función de sus características frente a la infraestructura tradicional. Figura modificada [82].

es posible integrar estas opciones. La Figura 8 ilustra el ejemplo planteado en la recuperación de un humedal en la bahía de San Francisco, en EUA [85]. Otro ejemplo que combina vegetación y ecosistemas en ambientes urbanos se puede encontrar en Pensacola, Florida (EUA), donde el proyecto 'GreenShores' (Figura 9), un proyecto de restauración y creación de hábitat, demostró ser eficaz en proteger una de las vías de comunicación principales y las zonas residenciales ante el huracán Iván.

Otros ejemplos se pueden consultar en: el programa 'Engineering with Nature' [25,86]; 'Building with Nature' [79] y <http://www.ecoshape.nl> (versión también disponible en español); el capítulo de protección costera en el documento guía para un Nueva York (EUA) más resiliente; así como otros ejemplos de infraestructura verde de 'The Nature Conservancy' [84,85,87,88]. Otros ejemplos más allá de las zonas costeras incluyen: depuración de aguas, control de erosión de tuberías, control de temperatura o gestión de aguas de escorrentía durante tormentas [84].

5. Discusión y conclusiones

La necesidad de adaptación para enfrentar los impactos del cambio climático es clara y creciente. La protección que ofrecen los ecosistemas ha sido tradicionalmente infravalorada hasta ahora, permitiendo su desaparición y degradación. Las medidas basadas en ecosistemas juegan un papel crucial para manejar el riesgo actual y futuro en nuestras costas. Tanto la atención pública como el conocimiento sobre ellas han ido en aumento. No obstante, existen todavía significativas barreras antes de la implementación a gran escala y su amplia aceptación.

En primer lugar, debido principalmente a la interdisciplinaridad intrínseca requerida para el diseño de este tipo de defensas (necesitan funcionar como infraestructura y ecosistema), no existen todavía guías claras para su diseño, implementación y gestión. En segundo lugar, pese a la creciente experiencia construida sobre casos pilotos en tiempos recientes, muchos de ellos, no fueron concebidos como proyectos de protección costera sino como proyectos de restauración o conservación. Es por ello también que muchas de estas experiencias carecen de monitoreo y seguimiento adecuado, lo cual es un factor limitante para comparar experiencias entre regiones y ambientes, y poder avanzar hacia una estandarización del diseño. Desde el punto de vista de la implementación, también se necesitan más sitios de demostración y en ambientes con distintas características físicas (e.g. energía del oleaje) y ecológicas (e.g. tipo de especies, o tipo de suelo).

Para avanzar en el desarrollo de estas guías es necesario un marco de diseño que reconozca las peculiaridades, tanto como las similitudes y compatibilidades, y establezca los pasos y elementos concretos para su diseño. El marco que se utilice no sólo deberá abordar estas cuestiones sino, además, establecer también un marco de decisiones que ayude a informar la gestión costera. Factores como el nivel de riesgo presente y futuro, el estado del hábitat y sus amenazas, potenciales cambios futuros, o su eficacia técnica son determinantes para ser considerados en la gestión costera y en la toma de decisiones. Marcos tradicionales usados en ingeniería y otros específicos pueden ser un buen punto de partida. Su unificación con instrumentos de gestión medioambiental, planes de reducción de riesgo y adaptación climática es compatible y recomendable.

En este contexto, cobra especial relevancia el caso de sistemas híbridos, que combinan lo mejor de la ingeniería y los ecosistemas (e.g. Figura 8 y Figura 9). Una defensa

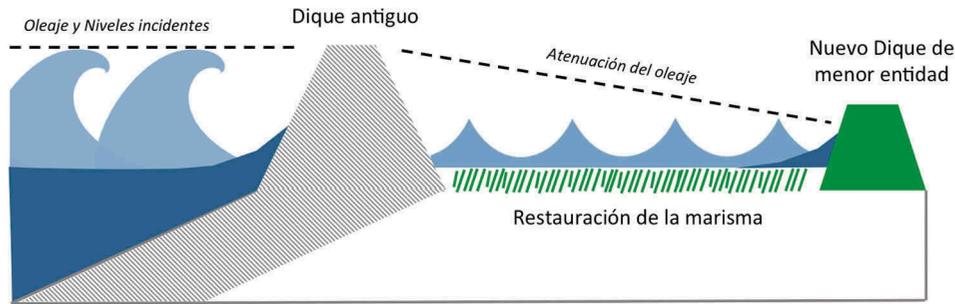


Figura 8. Ejemplo de sección híbrida basada en ecosistemas que sustituye un dique de defensa por una zona de recuperación del humedal que permite un nuevo dique de menor entidad. Modificado de caso de la bahía de San Francisco. Modificado de The Nature Conservancy [84].



Figura 9. Ejemplo de medidas basadas en ecosistemas para la protección de centros urbanos. Sistema combinado de arrecifes de ostras (izquierda) protegiendo una restauración de marismas (centro y derecha) en Pensacola, FL, EUA. Créditos de imágenes: The Nature Conservancy y Greenshore project: <http://www.dep.state.fl.us/northwest/Ecosys/section/greenshores.htm>

'híbrida' hace uso de los hábitats naturales para complementar una estructura de ingeniería. Ante niveles del mar más elevados que en la actualidad y un clima más severo, la infraestructura tendrá que ser adaptada y elevada. Esta protección adicional podría lograrse mediante modelos híbridos de forma que cubran el déficit de protección a través de ecosistemas. En las zonas desarrolladas y urbanizadas, en particular, hay una gran oportunidad para la innovación, sobre todo relacionados con los enfoques híbridos, porque en general hay condiciones más restrictivas, por ejemplo, en términos de espacio disponible. No obstante, hay muy poca información sobre qué combinaciones de estructuras y dimensiones y propiedades exactas. Otra consideración a tener en cuenta es que depender de un único sistema de protección también es arriesgado y puede ser muy costoso en términos de impacto [89].

También existe un reto en el planeamiento: una limitación es la identificación de áreas donde estas medidas puedan proporcionar la protección más óptima y dónde las inversiones pueden ser más rentables. Se reconoce que tienen que ser integradas en instrumentos de planeamiento y política [34], pero

por otro lado existe muy poca información de gran escala que pueda informar la política pública. Sin embargo, los análisis a múltiples escalas (desde regiones a ciudades) son posibles, así como lo es incorporar varios escenarios de clima y desarrollo, y comparar las medidas y localizaciones más adecuadas [59,63]. Vencer estos obstáculos es posible. De hacerlo, conseguiremos dar respuestas a la necesidad de enfrentar los riesgos impuestos por el clima y compatibilizar conservación medioambiental, sostenibilidad y desarrollo costero.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo al trabajo de: 'The Nature Conservancy'; el programa SNAPP (<http://snappartnership.net>); la participación de todos los expertos involucrados en el grupo de trabajo SNAPP sobre defensas costeras así como al comité de expertos de apoyo; el National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS); y a 'Wildlife Conservation'. Se agradece especialmente a Juliano Calil su ayuda con la Figura 1; a Christine Shepard y Zach Ferdana sus comentarios y materiales en relación a 'Coastal Resilience'; y la labor de los revisores anónimos.

Glosario

- CONABIO - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad DBN - Defensas Basadas en la Naturaleza
- EbA /AbE - Ecosystem based Adaptation /Adaptación basada en ecosistemas EEUU - Estados Unidos de América
- FEMA - Federal Emergency Management Agency, Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los EEUU - <https://www.fema.gov/es>
- GI - Green Infrastructure /Infraestructura Verde
- HAZUS - Modelo de Riesgos de FEMA - <https://www.fema.gov/hazus> NbD - Nature based Defenses (Defensas basadas en la Naturaleza)
- NNBF- Nature and Nature-based Feature /Elementos Naturales y basados en la Naturaleza SMMM - Sistema de Monitoreo de Manglares de México
- SNAP - Science for Nature And People; <http://www.snap.is/groups/coastal-defenses/UNFCCC> - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - <http://newsroom.unfccc.int/>
- WAVES - Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services - <http://www.wavespartnership.org/>

References

- [1] Kron W. Coasts: the high-risk areas of the World. *Nat Hazards*. 2013;66:1363–1382.
- [2] McGranahan G, Balk D, Anderson B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low-elevation coastal zones. *Environ Urban*. 2007;19(1):17–37.
- [3] Neumann B, Vafeidis AT, Zimmermann J, et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment. *Plos One*. 2015;10:e0118571.
- [4] Nicholls RJ, Hanson S, Herweijer C, et al. 2008. Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates (OECD Environment Working Papers (1)). Available from: <http://eprints.soton.ac.uk/52831/>
- [5] Hallegatte S, Green C, Nicholls RJ, et al. Future flood losses in major coastal cities. *Nat Clim Chang*. 2013;3:802–806.
- [6] Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, et al. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nat Clim Chang*. 2012;2(6):462–467.
- [7] Reguero BG. Effects of climate change on exposure to coastal flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS ONE*. 2015;10(7):e0133409.
- [8] Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, et al. Coastal systems and low-lying areas. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., editors. *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 of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. p. 361–409.
- [9] Woodruff JD, Irish JL, Camargo SJ. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*. 2013;504(7478):44–52. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24305147>
- [10] MEA. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Washington (DC): Island Press; 2005.
- [11] Orth RJ, Carruthers TJB, Dennison WC, et al. A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*. 2006;56(12):987.
- [12] Worm B, Barbier EB, Beaumont N, et al. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*. 2006;314(Nov):787–790. Available from: <http://science.sciencemag.org/content/314/5800/787>
- [13] Barbier EB. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol Monogr*. 2011;81(2):169–193.
- [14] Costanza R, Pérez-Maqueo O, Martínez ML, et al. The value of coastal wetlands for hurricane protection. *Ambio*. 2008;37(4):241–248. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18686502>
- [15] Barbier EB, Georgiou IY, Enchelmeier B, et al. The value of wetlands in protecting southeast Louisiana from hurricane storm surges. *PLoS ONE*. 2013;8(3):e58715. Available from: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3594144&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- [16] Borsje BW, van Wesenbeeck BK, Dekker F, et al. How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecol Eng*. 2011;37(2):113–122. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857410003216>
- [17] Chapman MG, Underwood AJ. Evaluation of ecological engineering of 'armoured' shorelines to improve their value as habitat. *J Exp Mar Bio Ecol*. 2011;400(1–2):302–313.
- [18] Martin D, Bertasi F, Colangelo MA, et al. Ecological impact of coastal defence structures on sediment and mobile fauna: evaluating and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats. *Coastal Eng*. 2005;52:1027–1051.
- [19] Cheong S-M, Silliman B, Wong PP, et al. Coastal adaptation with ecological engineering. *Nat Clim Chang*. 2013;3(9):787–791.
- [20] Van Wesenbeeck BK, Griffin JN, van Koningsveld M, et al. Nature-based coastal defenses: can biodiversity help? *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*. 2013; October 2015:451–458. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123847195003233>
- [21] Spalding MD, Mcivor AL, Beck MW, et al. Coastal ecosystems: a critical element of risk reduction. *Conservation Lett*. 2014;7:293–301.
- [22] Temmerman S, Meire P, Bouma TJ, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*. 2013;504(7478):79–83. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24305151>
- [23] Ruiz De Alegria-Arzaburu A, Mariño-Tapia I, Enriquez C, et al. The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*. 2013;198:69–83.

- Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X13002882>
- [24] Badola R, Hussain SA. Valuing ecosystem functions: an empirical study on the storm protection function of Bhitarkanika Mangrove Ecosystem, India. *Environ Conserv*. 2005;32(1):85–92.
- [25] Bridges T, Wagner PW, Burks-Copes KA, et al. Use of natural and nature-based features (NNB) for coastal resilience. Vicksburg (MS): US Army corps of engineers, engineer research and development center; 2015.
- [26] Cunniff S, Schwartz A. Performance of natural infrastructure and nature-based measures as coastal risk reduction. Environmental Defense Fund; 2015. Available from: http://www.edf.org/sites/default/files/summary_ni_literature_compilation_0.pdf
- [27] Bridges T, Henn R, Komlos S, et al. Coastal risk reduction and resilience: using the full array of measures (Report number CWTS 2013-3). Washington (DC): Directorate of Civil Works, US Army Corps of Engineers; 2013 Sep 21.
- [28] Demirbilek Z. Sea level rise and impacts on engineering practice. *Ocean Eng*. 2013;71:1–2. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801813002795>
- [29] Burcharth HF, Andersen TL, Lara JL. Upgrade of coastal defence structures against increased loadings caused by climate change: a first methodological approach. *Coastal Eng*. 2014;87:112–121. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383913002123>
- [30] Mase H, Tsujio D, Yasuda T, et al. Stability analysis of composite breakwater with wave-dissipating blocks considering increase in sea levels, surges and waves due to climate change. *Ocean Eng*. 2013;71:58–65.
- [31] Reguero BG, Losada IJ, Méndez FJ. Port cities and climate change. *Portus – Port Cities: Climate Change and Environmental Sustainability*. 2012;24:21–25.
- [32] Hunter JR, Church JA, White NJ, et al. Towards a global regionally varying allowance for sea-level rise. *Ocean Eng*. 2013;71:17–27.
- [33] Sutton-Grier AE, Wowk K, Bamford H. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environ Sci Policy*. 2015;51:137–148. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901115000799>
- [34] EU. Green infrastructure – enhancing Europe’s natural capital. Brussels: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; 2013.
- [35] Ferrario F, Beck MW, Storlazzi CD, et al. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat Commun*. 2014;5(May):3794. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24825660>
- [36] Maza M, Lara JL, Ondiviela B, et al. Wave attenuation modelling by submerged vegetation: ecological and engineering analysis. *Coastal Eng Proc*. 2012;1(1):2. Available from: <http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6937>
- [37] Möller I, Kudella M, Rupprecht F, et al. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nat Geosci*. 2014;7(Sep):727–732.
- [38] Narayan S, Beck MW, Reguero BG, et al. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS ONE*. 2016;11(5):e0154735.
- [39] Pinsky ML, Guannel G, Arkema KK. Quantifying wave attenuation to inform coastal habitat conservation. *Ecosphere*. 2013;4(8):art95.
- [40] Reddy SMW, Guannel G, Griffin R, et al. Evaluating the role of coastal habitats and sea-level rise in hurricane risk mitigation: an ecological economic assessment method and application to a business decision. *Integr Environ Assess Manag*. 2016;12:328–344.
- [41] Shepard CC, Crain CM, Beck MW. The protective role of coastal marshes: a systematic review and meta-analysis. *PloS One*. 2011;6(11):e27374. Available from: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3223169&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- [42] Arkema KK, Verutes GM, Wood SA, et al. Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature. *Proc Natl Acad Sci*. 2015;112:7390–7395.
- [43] Gedan KB, Kirwan ML, Wolanski E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Clim Change*. 2011;106(1):7–29.
- [44] Knutson PL, Brochu RA, Seelig WN, et al. Wave damping in Spartina alterniflora marshes. *Wetlands*. 1982;2(1):87–104.
- [45] Ondiviela B, Losada IJ, Lara JL, et al. The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Eng*. 2014;87:158–168. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383913001889>
- [46] Mendez FJ, Losada IJ. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and non-breaking waves over vegetation fields. *Coastal Eng*. 2004;51:103–118.
- [47] Hu K, Chen Q, Wang H. A numerical study of vegetation impact on reducing storm surge by wetlands in a semi-enclosed estuary. *Coastal Eng*. 2015;95:66–76. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383914001823>
- [48] Resio DT, Westerink JJ. Modeling the physics of storm surges. *Phys Today*. 2008;61(9):33–38.
- [49] Barbier EB. Valuing ecosystem services as productive inputs. *Econ Policy*. 2007;22(Jan):177–229.
- [50] Koch EW, Barbier EB, Silliman BR, et al. Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Front Ecol Environ*. 2009;7(1):29–37.
- [51] Rodriguez, A. B., et al. Oyster reefs can outpace sea-level rise. *Nat Clim Chang*. 2014 Apr;4(6):493–497. DOI:10.1038/NCLIMATE2216
- [52] Gilman EL, Ellison J, Duke NC, et al. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. *Aquatic Bot*. 2008;89:237–250.
- [53] Mcivor A, Möller I, Spencer T, et al. 2012. Reduction of wind and swell waves by mangroves (Natural Coastal Protection Series: Report 1). Available from: <http://>

- www.naturalcoastalprotection.org/documents/reduction-of-wind-and-swell-waves-by-mangroves.
- [54] Mcivor A, Spencer T, Möller I, et al. 2012. Storm surge reduction by mangroves (Natural Coastal Protection Series: Report 2). Available from; <http://www.naturalcoastalprotection.org/documents/storm-surge-reduction-by-mangroves>.
- [55] Mcivor A, Spencer T, Möller I, et al. 2013. The response of mangrove soil surface elevation to sea level rise (Natural Coastal Protection Series: Report 3). Available from: <http://coastalresilience.org/science/mangroves/surface-elevation-and-sea-level-rise>.
- [56] Alongi DM. Present state and future of the World's mangrove forests. *Environ Conserv.* 2002;29(3):331–349.
- [57] Bayraktarov E, Saunders MI, Abdullah S, et al. The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Appl.* 2015;26:1055–1074.
- [58] Groot RSDE, Blynnaut J, van der Ploeg S, et al. Benefits of investing in ecosystem restoration. *Conservation Biology* : the Journal of the Society for Conservation Biology. 2013;27(6):1286–1293. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24112105>
- [59] Aerts JCJH, Botzen WJW, Emanuel K, et al. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities. *Science.* 2014;344(6183):473–475.
- [60] Broekx S, Smets S, Liekens I, et al. Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt Estuary using a risk-based approach. *Nat Hazards.* 2010;57(2):245–266.
- [61] Scawthorn C, Flores P, Blais N, et al. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II: damage and loss assessment. *Nat Hazards Rev.* 2006;7:72–81.
- [62] Wamsley TV, Cialone MA, Smith JM, et al. Influence of landscape restoration and degradation on storm surge and waves in Southern Louisiana. *Nat Hazards.* 2009;51(1):207–224.
- [63] Reguero BG, Bresch DN, Beck M, et al. 2014. Coastal risks, nature-based defenses and the economics of adaptation: an application the Gulf of Mexico, USA. Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering; Seoul, Korea. Available from: <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/7585>.
- [64] Colls A, Ash N, Ikkala N. Ecosystem-based adaptation: a natural response to climate change (International union for conservation of nature, publication Id 9439). Gland; 2009. Available from: <https://www.iucn.org/es/content/ecosystem-based-adaptation-natural-response-climate-change>
- [65] Lhumeau A, Cordero D. Adaptación basada en ecosistemas: una respuesta al cambio climático. Quito: UICN; 2012. p. 17.
- [66] Hallegatte S. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob Environ Change.* 2009;19(2):240–247. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378008001192>
- [67] IPCC. Summary for policymakers. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, et al., editors. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. p. 1–32. Available from: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf
- [68] Arkema KK, Guannel G, Verutes G, et al. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nat Clim Chang.* 2013;3(Oct):913–918.
- [69] Boruff BJ, Emrich C, Cutter SL. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *J Coastal Res.* 2005;215:932–942.
- [70] Gornitz VM, Daniels RC, White TW, et al. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. south-east. *J Coastal Res.* 1994;327–338. Available from: <http://www.jstor.org/stable/25735608>
- [71] Beck MW, Lange GM, editors. Managing coasts with natural solutions: guidelines for measuring and valuing the coastal protection services of mangroves and coral reefs. Wealth accounting and the valuation of ecosystem services partnership (WAVES); Waves technical paper. Washington (DC): World Bank Group; 2016. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/995341467995379786/Managing-coasts-with-natural-solutions-guidelines-for-measuring-and-valuing-the-coastal-protection-services-of-mangroves-and-coral-reefs>
- [72] Kroeker K, Reguero BG, Rittelmeyer P, et al. Ecosystem service and coastal engineering tools for coastal protection and risk reduction. In: Beck MW, Lange GM, editors. Managing coasts with natural solutions: guidelines for measuring and valuing the coastal protection services of mangroves and coral reefs. Washington (DC): World Bank – WAVES; 2016.
- [73] Battjes JA, Gerritsen H. Coastal modelling for flood defence. *Philosophical transactions. Ser A, Mathematical, Physical, Eng Sci.* 2002;360:1461–1475.
- [74] Cavaleri L, Alves JHGM, Ardhuin F, et al. Wave modelling. The state of the art. *Progress in Oceanography.* 2007;75(4):603–674.
- [75] Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Eng.* 2009;56(2009):1133–1152.
- [76] TNC. 2015. Coastal resilience. Available from: <http://maps.coastalresilience.org/global/>
- [77] Balke T, Bouma TJ, Horstman EM, et al. Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats. *Mar Ecol Prog Ser.* 2011;440:1–9. Available from: <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v440/p1-9/>
- [78] USACE. Coastal engineering manual. Washington (DC): U.S. Army Corps of Engineers; 2002.
- [79] Van Slobbe E, De Vriend HJ, Aarninkhof S, et al. Building with nature: in search of resilient storm surge protection strategies. *Nat Hazards.* 2013;65:947–966.
- [80] TNC. 2014. Floodplains by design. The Nature Conservancy. Available from: <http://www.nature.org/ourinitiatives/habitats/riverslakes/floodplains-by-design.xml>.
- [81] NYC. Plan NYC: a stronger, more resilient. New York (NY); 2013. Available from: <http://www.nyc.gov/html/sirr/html/report/report.shtml>
- [82] The Royal Society. Resilience to extreme weather. London: The Royal Society; 2014.

- [83] Hill K. Coastal infrastructure: a typology for the next century of adaptation to sea-level rise. *Front Ecol Environ.* 2015;13(9):468–476.
- [84] TNC. Green infrastructure case studies. San Francisco (CA): The Nature Conservancy; 2013.
- [85] TNC. 2015. Reducing climate risks with natural infrastructure. San Francisco (CA): The Nature Conservancy; 2015c. Available from: <https://www.nature.org/ourinitiatives/regions/northamerica/unitedstates/california/ca-green-vs-gray-report-2.pdf?redirect=https-301>
- [86] U.S. Army Corps of Engineers. 2015. North atlantic coast comprehensive study: Resilient adaptation to increasing risk. Available from: <http://www.nad.usace.army.mil/CompStudy/>.
- [87] TNC. 2015. Natural infrastructure and restoration projects database. The Nature Conservancy. Retrieved from [http:// projects.tnc.org/coastal/](http://projects.tnc.org/coastal/)
- [88] Pontee NI, Narayan S, Beck M, et al. Building with nature: lessons from around the World. *Spec Edition Maritime Eng J.* 2015;169:29–36.
- [89] Colten C, Kates R, Laska S. Community resilience: lessons from New Orleans and Hurricane Katrina. 2008. Available from: http://www.resilientus.org/library/FINAL_COLTEN_9-25-08_1223482263.pdf