

Cartografía de pastos marinos que captan y almacenan carbono azul en Columbia Británica, Canadá, y Washington y Oregón, Estados Unidos



Formulación de un algoritmo y cuantificación de la superficie cubierta por *Zostera marina*

La presente investigación corrió a cargo de:

F. Short y **D. Torio**, de la Universidad de Nuevo Hampshire, Estados Unidos, y **M. Hessing-Lewis**, **L. Reshitnyk**, **T. Denouden**, **W. McInnes** y **C. Prentice**, del Instituto Hakai, Columbia Británica, Canadá

Con el apoyo de la **Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA)** en el marco del proyecto *Avances en la práctica científica para la formulación de políticas en materia de carbono azul en América del Norte* (Plan Operativo 2015-2016).

Reservas de carbono en lechos de *Zostera marina*

El pasto marino *Zostera marina* es la planta enraizada más abundante en las aguas costeras de la región Pacífico Noroeste (que, para fines del presente estudio, comprende los estados de Oregón y Washington, en Estados Unidos, y la provincia canadiense de Columbia Británica). A diferencia de las algas, se trata de una planta marina con raíces que capta, acumula y almacena carbono en los sedimentos donde crece. En la zona cercana a la costa, la distribución de los hábitats de *Z. marina* puede variar: desde extensos bancos y lechos hasta áreas irregulares o franjas estrechas de hábitat a lo largo de la línea costera. Los ecosistemas costeros en los que se encuentra esta especie de pastos ofrecen una amplia gama de funciones ambientales, entre las que se incluyen albergar hábitat vital para especies de invertebrados y peces de importancia comercial y recreativa, y servir de amortiguamiento a la línea costera ante las tormentas ocasionadas por la disminución de las corrientes y la acción del oleaje. Los lechos de este tipo de pasto marino sirven también para filtrar escorrentías y sedimentos suspendidos, al mismo tiempo que absorben y almacenan nutrientes y carbono presentes tanto en el agua como en los sedimentos donde se encuentran enraizados. Por último, el hábitat de *Z. marina* desempeña un papel preponderante al facilitar la acumulación de materia orgánica en los sedimentos, con lo que, a la larga, termina actuando como sumidero de carbono.



Zostera marina en la bahía Pruth, Columbia Británica.

El carbono almacenado en ecosistemas costeros y marinos se conoce como “carbono azul”, y sólo recientemente se empezó a aludir a las reservas de este carbono como de importancia mundial (Fourqurean *et al.*, 2012). De algunos metaanálisis realizados se concluye que los ecosistemas que captan y almacenan carbono azul —sobre todo manglares, lechos de pasto marino y marismas salobres— desempeñan un papel desproporcionadamente significativo en el secuestro de carbono en relación con la superficie que ocupan en el planeta, lo que los convierte en puntos críticos en términos de almacenamiento de carbono (Duarte *et al.*, 2005; McLeod *et al.*, 2011; Fourqurean *et al.*, 2012). Por ejemplo, pese a contener biomasa viva considerablemente más reducida, una hectárea de *Zostera marina* puede almacenar tanto carbono como una hectárea de selva húmeda tropical gracias a la elevada acumulación de carbono en sedimentos y biomasa subterránea (Pendleton *et al.*, 2012). Si bien hoy día se reconoce ya en forma generalizada, y sin lugar a dudas, la importancia de estos

ecosistemas en el balance mundial de carbono, lo cierto es que el conocimiento que se tiene en torno a los sumideros de carbono azul continúa siendo más deficiente que el de los sumideros terrestres de carbono (McLeod *et al.*, 2011), y esta falta de entendimiento limita nuestra capacidad para incluir las reservas de carbono azul en estrategias orientadas a contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático (Macreadie *et al.*, 2014; Hejnowicz *et al.*, 2015). Asimismo, la destrucción y la degradación de ecosistemas que captan y almacenan carbono azul suponen una gran preocupación, por su potencial para no sólo exacerbar los efectos del cambio climático, sino también limitar otros servicios ambientales que prestan estos importantes hábitats marinos (Barbier *et al.*, 2011; Hejnowicz *et al.*, 2015). Los ecosistemas de carbono azul se están perdiendo en todo el mundo: 29% de los lechos de pasto marino, 50% de las marismas y 35% de los manglares son actualmente objeto de degradación o destrucción (Barbier *et al.*, 2011).

Subsanar lagunas en el conocimiento sobre la costa del Pacífico Noroeste

El presente trabajo tiene por objetivo generar información nueva sobre carbono azul en lechos de *Zostera marina* a lo largo de la costa Pacífico Noroeste de América del Norte, a fin de subsanar una importante deficiencia detectada en el conocimiento al respecto. Con tal propósito, se creó un protocolo para calcular la distribución de la especie en la costa de: 1) Columbia Británica; 2) el estrecho de Puget, Washington, y 3) Oregón, a partir de conjuntos disponibles de datos geográficos y batimétricos de la superficie lineal cubierta por este tipo de pasto marino, y utilizando un algoritmo de reciente formulación. Con base en trabajos de muestreo en campo y análisis de las muestras de las tres áreas objeto de estudio, se derivaron estimaciones sobre la capacidad de secuestro y almacenamiento de carbono de lechos de *Z. marina*. Antes de efectuarse este trabajo, se disponía de información muy limitada sobre el área cubierta por estos pastos, amén de registros incompletos de polígonos cartografiados, principalmente para Columbia Británica y el estado de Washington y, en cierta medida, también para Oregón. Con todo, en el caso de las tres zonas cubiertas, se disponía de información relativa a los lugares con presencia de *Z. marina*, en forma de datos empíricos lineales, recogidos utilizando la metodología ShoreZone para la elaboración de mapas (Berry *et al.*, 2004). ShoreZone es el método para clasificar hábitats y elaborar los mapas correspondientes (Howes, 2001) que brinda el conjunto de datos geográficos más exhaustivo en cuanto a características geomorfológicas y biológicas de la línea costera del Pacífico Noroeste,

lo que incluye la provincia de Columbia Británica, en Canadá, y los estados de Washington y Oregón, en Estados Unidos. El más reciente conjunto de datos ShoreZone correspondiente a Columbia Británica se creó a partir de videos y fotografías georreferenciados obtenidos durante la marea baja a lo largo de un vasto periodo que abarca desde finales de la década de 1980 hasta el año de 2004. Estas imágenes georreferenciadas se utilizaron para elaborar mapas sobre la presencia y ausencia de *Zostera marina*, así como la distribución lineal de comunidades biológicas, incluida esta especie de pasto, a lo largo de segmentos de la línea costera.

Por otro lado, para los sitios ubicados en Oregón y Washington, se contó con datos relativos a la biomasa de *Zostera marina* emanados de información disponible en la SeagrassNet (base de datos que también aportó algunas mediciones de biomasa para Columbia Británica). Sin embargo, los datos preexistentes disponibles sobre mediciones de las reservas sedimentarias de carbono y la capacidad de secuestro fueron casi nulos para los tres lugares, lo que obligó a llevar a cabo trabajo de campo original para realizar tales determinaciones. A fin de generar mapas más completos sobre la presencia de *Z. marina*, se creó un algoritmo que permitió extrapolar a las áreas con este pasto datos ShoreZone correspondientes a segmentos lineales, utilizando información obtenida por batimetría en el marco de un sistema de información geográfica (SIG).

Cartografía de *Zostera marina* en Columbia Británica

Las fuentes de información a partir de las cuales se formuló el algoritmo para calcular la superficie de los lechos de *Zostera marina* en Columbia Británica incluyen:

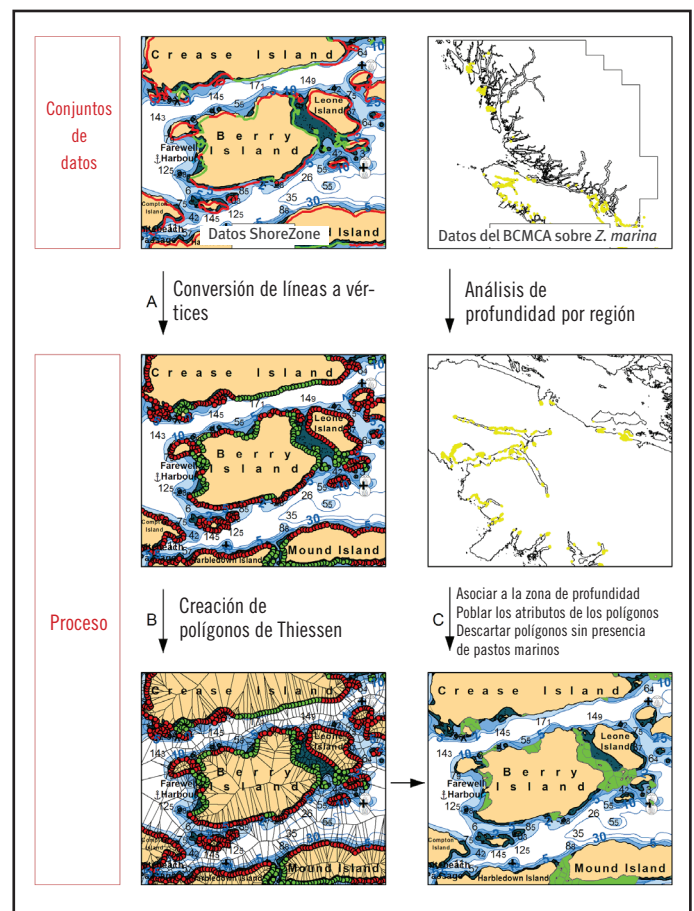
1. Conjunto de datos ShoreZone proporcionado por la provincia de Columbia Británica.
2. Conjuntos de datos batimétricos del Servicio de Hidrografía de Canadá (*Canadian Hydrographic Service*) para la mayor parte del territorio continental de Columbia Británica y la isla de Vancouver, a excepción de Haida Gwaii, y datos batimétricos para Haida Gwaii proporcionados por la Reserva de Parque Nacional, Reserva de Área de Conservación Marina Nacional y sitio patrimonial haida Gwaii Haanas, del Departamento de Parques de Canadá (*Parks Canada*).
3. Mapas de lechos de *Zostera marina* obtenidos de la base de datos en línea del Análisis para la Conservación Marina de Columbia Británica (*British Columbia Marine Conservation Analysis, BCMCA*) y el Instituto Hakai para la Costa Central y Haida Gwaii (*Hakai Institute for the Central Coast and Haida Gwaii*). Además, se analizó la distribución por profundidad de los lechos en los conjuntos de datos correspondientes a dos regiones geográficas: el estrecho de Georgia, por un lado, y el resto de Columbia Británica, por el otro. Con esta división se pretende reflejar la posible variación regional en la distribución por profundidad de dichos pastos en Columbia Británica.

Para calcular la superficie ocupada por lechos de *Zostera marina*, las líneas ShoreZone se convirtieron a polígonos utilizando la herramienta “Gregator”, creada en ArcGIS (v. 10.4), con base en métodos del modelo de remanentes de fondo creado por Gregr *et al.* (2013). (Los pasos implicados en este procedimiento se muestran en la figura 1.)

Se efectuó una evaluación de precisión para los casos en que los polígonos cartografiados de los conjuntos de datos de *Zostera marina* (n = 2807) se superponían con los polígonos derivados de ShoreZone para estos pastos. Sin embargo, no se contó con datos que permitieran determinar la eficacia de ShoreZone para pronosticar la ausencia de *Z. marina*.

De los resultados se desprende una profundidad máxima promedio (el linde de profundidad de *Zostera marina*) de tres metros para el estrecho de Georgia y de cinco metros para el resto de Columbia Británica. Los polígonos para estos

Figura 1 . Representación gráfica de la conversión a polígonos de las “líneas” correspondientes a *Zostera marina* en ShoreZone



pastos, generados a partir de los datos lineales ShoreZone para *Z. marina*, se muestran en la figura 2. La superficie total estimada fue de 416.12 km² y la evaluación de precisión mostró una superposición de 60% de los polígonos de *Z. marina* generados con el conjunto de datos ShoreZone.

En resumen, en Columbia Británica, cuya línea costera tiene una longitud de más de 35 mil km, la capacidad para cartografiar la presencia de *Zostera marina* a esta escala depende directamente del único conjunto de datos de que se dispone —ShoreZone— que cubre esta extensión geográfica. Es muy probable que el algoritmo formulado como parte del presente trabajo para calcular la superficie cubierta por *Z. marina* a partir de la extrapolación de la extensión lineal actualmente cubierta por la especie subestime la presencia de estos pastos a lo largo de la línea costera de la provincia, toda vez que se ha demostrado —con verificación— que los datos lineales ShoreZone subestiman la presencia de dichos pastos (Harper y Morris, 2008). Asimismo, el conjunto de

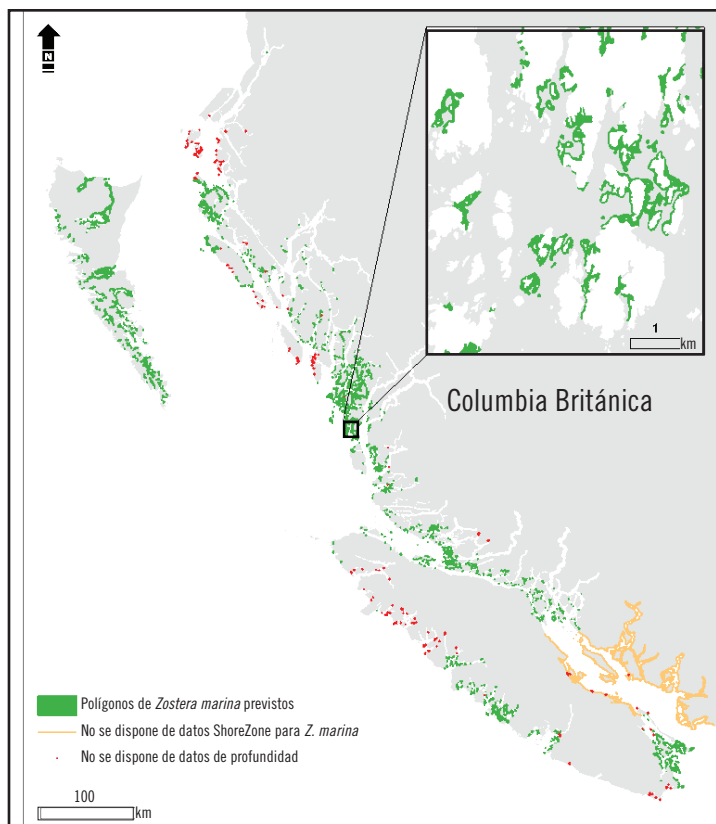
datos utilizados para evaluar la precisión del análisis de ShoreZone representa una conglomeración de conjuntos de datos sobre *Z. marina* procedentes de diversas fuentes reunidos en el curso de varias décadas y mediante métodos distintos. Estos datos revelaron que ShoreZone tendía a clasificar erróneamente lechos de pastos de menores dimensiones.

Debido a que los lechos de *Zostera marina* en Columbia Británica representan un enorme potencial de reservas de carbono, de gran importancia para la formulación de políticas en materia de cambio climático, al igual que para la gestión y conservación de los ecosistemas costeros, los resultados obtenidos son apenas un primer paso en la estimación del potencial de almacenamiento de carbono en esta región. Combinados con datos y estimaciones sobre la amplitud y capacidad de almacenamiento de carbono de los lechos de este tipo de pastos en el estrecho de Puget, Washington, y la costa de Oregón, estos resultados aportan la primera descripción espacial de carbono asociado con *Z. marina* a lo largo de la costa del Pacífico Noroeste.

Cartografía de *Zostera marina* en el estrecho de Puget, Washington

El algoritmo concebido para calcular la superficie cubierta por lechos de *Zostera marina* en Columbia Británica y elaborar los mapas correspondientes a partir de datos vectoriales lineales y de batimetría se aplicó, con algunas modificaciones, con el propósito de cartografiar los lechos de este pasto en el estrecho de Puget, en el estado de Washington, Estados Unidos. Dicho algoritmo utiliza datos lineales, topobatemetría de alta resolución y una combinación de valores de profundidad mínimos y máximos. Se recurrió al Inventario Estatal ShoreZone de Washington (*Washington State ShoreZone Inventory*), al igual que al conjunto de datos sobre *Z. marina* conformado por polígonos del Programa de Monitoreo de Vegetación Sumergida (*Submerged Vegetation Monitoring Program, SVMP*) (ShoreZone, 2016; SVMP, 2012). Asimismo, se utilizaron datos topobatemétricos para determinar los límites superiores e inferiores de la profundidad de dicha especie, con base en rangos del SVMP (Finlayson *et al.*, 2000).

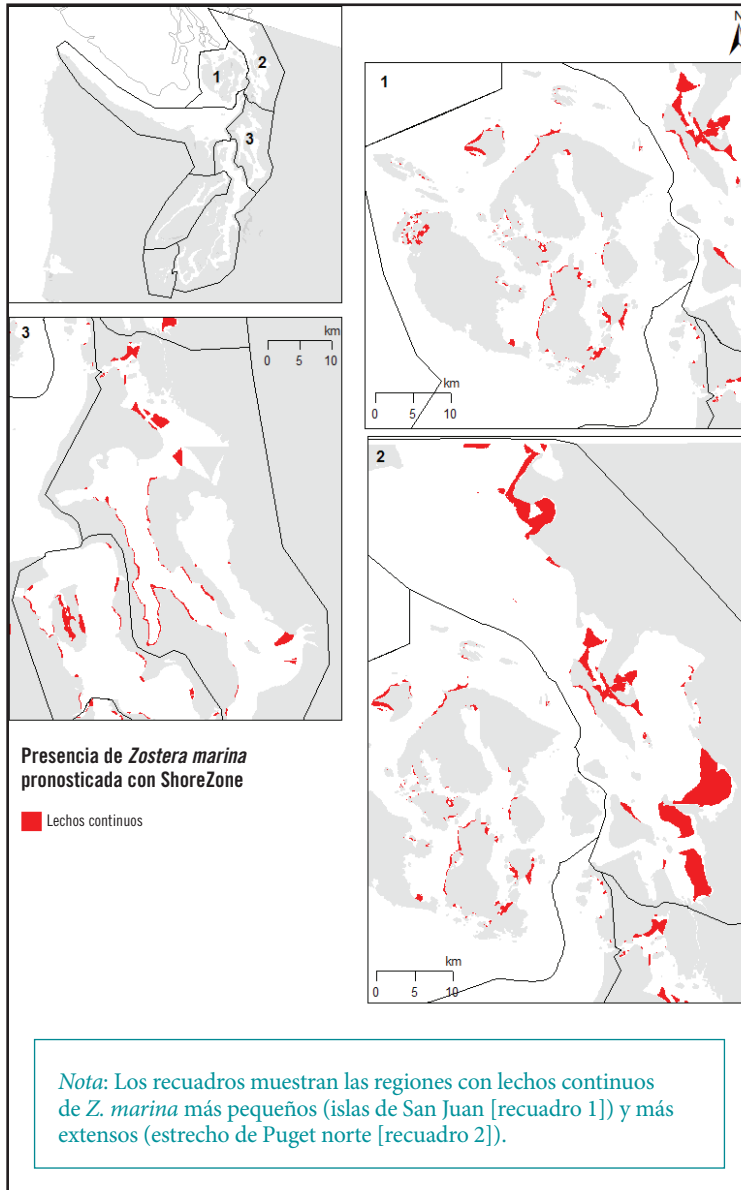
Figura 2. Polígonos con presencia pronosticada de *Zostera marina* creados a partir de datos ShoreZone, y áreas donde no se disponía de datos ShoreZone ni de profundidad



Los datos lineales ShoreZone para *Zostera marina* se convirtieron en polígonos utilizando el algoritmo aplicado para Columbia Británica, pero con las siguientes modificaciones: a) se creó una capa de datos de formato ráster con valor de uno en representación de profundidades adecuadas de *Z. marina* a partir de una técnica de umbralización condicional y con una combinación de estadísticas sobre las profundidades superiores e inferiores para estos pastos, y b) los datos ráster resultantes se convirtieron a un polígono vectorial y se utilizaron para recortar los polígonos de Thiessen derivados de ShoreZone. La precisión de la predicción de presencia de *Z. marina* se evaluó mediante el cálculo del número de polígonos del SVMP en superposición con los polígonos pronosticados a partir de los datos lineales ShoreZone, así como su superficie.

Los resultados mostraron que la profundidad de los lechos de *Zostera marina* en el estrecho de Puget es variable, en un intervalo que se ubica entre +2.33 y -12.40 metros. El algoritmo produjo 1,047 polígonos que cubren una superficie de 227 km², con base en los datos lineales ShoreZone continuos correspondientes a dicho estrecho (véase la figura 3). La extensión más reducida de estos pastos se encontró en el estrecho de Juan de Fuca y regiones de las islas San Juan, mientras que los polígonos de mayores dimensiones se observaron en la parte norte del estrecho de Puget. Con la evaluación de precisión se demostró que 83% de los polígonos del SVMP se superponían con los polígonos pronosticados.

Figura 3. Polígonos de lechos de *Zostera marina* pronosticados con el algoritmo, con base en datos ShoreZone de 1994 a 2000 para el estado de Washington



En términos generales, para el estrecho de Puget, el algoritmo permitió un buen pronóstico de la amplitud de los lechos de *Zostera marina* a partir de datos lineales ShoreZone. La superficie estimada con la aplicación del algoritmo, 227 km², resulta ligeramente mayor que los 218 km² de estos pastos inventariados a la fecha por el SVMP. Cabe precisar que se observaron algunas incongruencias que llevan a concluir que se requiere investigación ulterior, sobre todo para lechos de pastos marinos en aguas profundas o turbias.

Cartografía de *Zostera marina* en la costa de Oregón

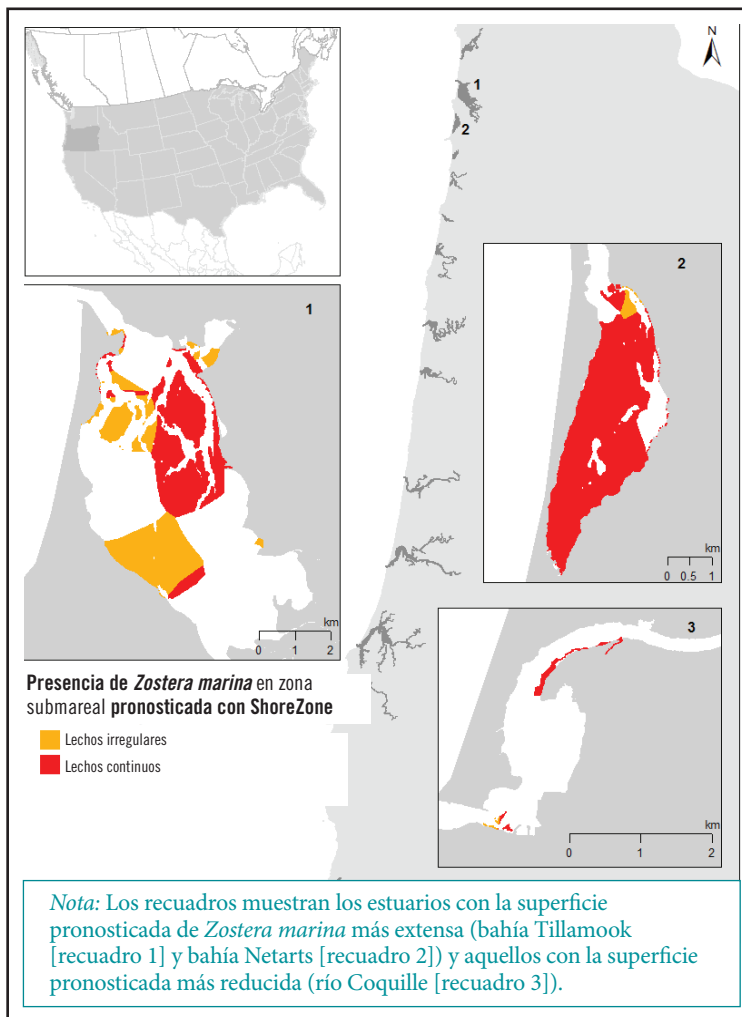
El algoritmo creado para Columbia Británica se utilizó también para estimar la distribución de *Zostera marina* en la costa de Oregón, Estados Unidos, en relación con los datos ShoreZone correspondientes a 2014 para el estado en su conjunto (ShoreZone, 2014a). La zona costera de Oregón difiere de Columbia Británica en cuanto a topografía, hidrología y batimetría, y los estuarios donde se observa la presencia de *Z. marina* son discontinuos, con variaciones en términos de dimensión, profundidad y restricciones en los flujos de marea. Se utilizaron datos topobatimétricos del Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico (*Pacific Marine Environmental Laboratory*) del Centro de Investigación de Tsunamis (*Center for Tsunami Research*) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA) de Estados Unidos (NOAA, 2016), al igual que datos de 2003 del Servicio de Estudios Geológicos de Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS) (NGDC, 2003). A fin de validar los resultados del modelo, se emplearon dos conjuntos de polígonos de *Zostera marina*: los polígonos de hábitats esenciales para los peces de la Comisión para la Gestión de los Recursos Pesqueros de los Estados del Pacífico (*Pacific State Fishery Management Commission*, PSFMC) (PSFMC, 2004) y los polígonos de la EPA sobre distribución de *Z. marina* en estuarios seleccionados de Oregón (Young *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2012). Ante la falta de información respecto de los rangos de profundidad para *Z. marina* lo mismo en el conjunto de datos de polígonos de ShoreZone que en el de la PSFMC, se recurrió a material publicado y se encontró que, en promedio, ésta varía entre -0.5 y -2.25 metros sobre el nivel medio del mar (Boese *et al.*, 2009).

Siguiendo la metodología empleada para los otros dos sitios objeto del presente estudio y aplicando a Oregón el mismo algoritmo formulado, los datos lineales ShoreZone para *Zostera marina* se convirtieron a polígonos, y luego se aplicaron tanto a segmentos lineales submareales como a segmentos lineales (sub e intermareales) con todos los datos sobre *Z. marina* combinados. Para evaluar la precisión, se calcularon los porcentajes tanto de los polígonos como de superficie que se superponen entre el conjunto de datos de polígonos de la EPA y los polígonos de *Z. marina* pronosticados con el algoritmo.

El algoritmo arrojó 1,611 polígonos de lechos en la franja submareal, cubriendo una superficie de 31.5 km² (véase la figura 4), ligeramente mayor que la superficie inventariada por la PSFMC. En términos de precisión, se observó una superposición de 43% entre los polígonos de *Z. marina* submareal pronosticados con el algoritmo objeto del presente estudio y los polígonos de validación de la EPA y la PSFMC. En la mayoría de las bahías estudiadas, la precisión de la predicción resultó estar por debajo de 50 por ciento. Sin embargo, al utilizar todos los datos ShoreZone correspondientes al segmento lineal (intermareal y submareal) de *Z. marina*, el algoritmo registró una precisión de 63% para los estuarios con los polígonos de validación de la EPA.

En resumen, la mayor presencia de *Zostera marina* en Oregon tiende a registrarse a una profundidad óptima de entre -0.5 y -2.25 m sobre el nivel medio del mar. Este intervalo de profundidad se aproxima a los valores registrados por Young *et al.* (2012) y Boese *et al.* (2009) para los límites de profundidad superiores e inferiores de estos pastos en ciertos estuarios del estado. En este rango de profundidad, los polígonos pronosticados para los lechos en las franjas intermareal y submareal quedaron bastante bien representados en la mayoría de los estuarios de Oregon. Con el algoritmo se pronosticó una superficie total de 43.68 km² de *Z. marina* intermareal y submareal para la entidad.

Figura 4. Polígonos de lechos de *Zostera marina* submareal en Oregon, según los pronósticos obtenidos con el algoritmo



Reservas de carbono en lechos de *Zostera marina* en la costa de la región Pacífico Noroeste

Con base en los pronósticos obtenidos con el algoritmo, Columbia Británica registró la superficie más extensa de lechos de *Zostera marina*, con 361.6 km², lo que equivale a un total de 1,004.4 km² al combinarse con la presencia ya documentada de este tipo de pasto (CCA, 2016), 56% más que lo estimado con anterioridad. En el estrecho de Puget, Washington, la superficie pronosticada con el algoritmo objeto de la presente investigación resultó aproximadamente 24% mayor que la estimada antes por el programa SVMP. En los estuarios costeros de Oregon, la superficie de *Z. marina* pronosticada con el algoritmo resultó considerablemente mayor —en 823%— que las estimaciones previas. La precisión global aportó información sobre la soli-

dez y aplicabilidad a escala de sitio del método propuesto en el presente trabajo, mientras que las precisiones a escala subregional mostraron la importancia de contar con datos de calidad como elementos de entrada y destacaron también las limitaciones de los datos de alcance regional.

Al aplicar índices de secuestro de CO₂ por *Zostera marina* específicos para un sitio en los tres lugares objeto de estudio (CCA, 2017), se llegó a la conclusión de que en Columbia Británica este tipo de pasto absorbe hasta 23,403 toneladas de CO₂ al año; en el estrecho de Puget, Washington, su absorción asciende a 11,722 toneladas anuales, y en Oregon, a 4,217 toneladas anuales.

Trabajo futuro

El algoritmo creado para este proyecto aporta una herramienta SIG para otros conjuntos de datos ShoreZone y de batimetría. Inicialmente concebido para la costa de Columbia Británica, el algoritmo se adaptó para emplearse en Washington y Oregón, donde se dispone de conjuntos de datos similares, de manera que ahora constituye una herramienta que puede utilizarse con toda facilidad en zonas nuevas. Los mapas y los resultados analíticos emanados de este trabajo buscan servir de punto de partida para informar a sectores interesados sobre el potencial de almacenamiento de carbono azul costero de los hábitats de *Zostera marina*.

Los conjuntos de datos compilados para el presente trabajo, junto con los productos cartográficos y análisis del mismo, sientan las bases para identificar: 1) zonas subregionales específicas para las que no se dispone de datos verificados en el terreno o cuyos datos no pueden utilizarse por ser demasiado antiguos; 2) diferencias regionales en la precisión del conjunto de datos ShoreZone; 3) métodos adecuados para manejar datos sobre *Zostera marina* de alcance regional, incluidas compensaciones de distintas tecnologías para la adquisición de imágenes; 4) zonas donde no se dispone de información de batimetría suficiente, y 5) zonas cuyos datos sobre rangos de profundidad de *Z. marina* resultan insuficientes. A fin de evaluar las reservas y la capacidad de almacenamiento de carbono en las costas, es preciso elaborar mapas de pastos marinos lo mismo para la costa en la región Pacífico Noroeste que para el resto del planeta. Esta tarea cartográfica resultará benéfica también para muchas otras iniciativas de planeación de recursos marinos, incluida la designación y el diseño de redes de áreas marinas protegidas, el manejo pesquero y de invertebrados, y la evaluación de cambios resultantes de la solicitud de nuevas urbanizaciones costeras y su establecimiento.

Agradecimientos

El presente proyecto estuvo dirigido por el doctor Fred Short, con base en la Universidad de Nuevo Hampshire, y contó con la contribución de la doctora Margot Hessing Lewis y sus colegas del Instituto Hakai en Columbia Británica para la formulación del algoritmo, las labores de manipulación y el trabajo de campo en la misma provincia. El doctor Dante Torio prestó apoyo al Dr. Short en la Universidad de Nuevo Hampshire, principalmente con el trabajo cartográfico. El Dr. Jeffrey Gaeckle, del Departamento de Recursos Naturales (*Department of Natural Resources*) del estado de Washington, y Alicia Helms, de la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de South Slough (*South Slough National Estuarine Research Reserve*), Oregón, participaron en evaluaciones en campo de carbono sedimentario y en biomasa en el estrecho de Puget y en Oregón, respectivamente. Nuestro agradecimiento a Cathy Short por su trabajo de redacción y edición.

En Columbia Británica, vaya nuestro agradecimiento a Mary Morris, una de las creadoras del componente biológico de ShoreZone, por revisar el documento en lo correspondiente a la provincia; a Patrick Bartier, por compartir datos de batimetría para Haida Gwaii; Carol Orborne, por facilitar el acceso al más reciente conjunto de datos ShoreZone para Columbia Británica, y Ed Gregr, por sus consejos en torno a los métodos SIG.

En Washington y Oregón, los autores desean agradecer a Walt Nelson de la EPA de Estados Unidos, al igual que a Patrick J. Clinton y Ron Thom, por sus aportaciones a los conjuntos de datos de validación para lechos de *Zostera marina* y por la información brindada sobre topobatimetría de alta resolución.

Referencias

Barbier, E., S. Hacker, C. Kennedy, E. M. Koch, A. C. Stier y B. R. Silliman (2011), “The value of estuarine and coastal ecosystem services”, *Ecological Monographs*, núm. 81(2), pp. 169-193.

Berry, H. D., J. R. Harper, T. F. Mumford, B. E. Bookheim, A. T. Sewell y L. J. Tamayo (2004), *Washington State ShoreZone Inventory User's Manual, Summary of Findings, and Data Dictionary*, informes preparados para el Programa de Hábitats Cercanos a la Costa del Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington (*Washington State Dept. of Natural Resources Nearshore Habitat Program*).

Boese, B. L., W. G. Nelson, C. A. Brown, R. J. Ozretich, H. Lee II, P. J. Clinton, C. L. Folger, T. C. Mochon Collura y T. H. DeWitt (2009), “Lower depth limit of *Zostera marina* (eelgrass) in seven target estuaries”, en: Lee II, H. y C. A. Brown (eds.), *Classification of regional patterns of environmental drivers and benthic habitats in Pacific Northwest estuaries*, informe EPA/600/R-09/140 (octubre de 2009), US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], Washington, DC, pp. 219-241, en: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1006Q2H.txt>> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

CCA (2016), *Carbono azul en América del Norte: evaluación de la distribución de los lechos de pasto marino, marismas y manglares, y su papel como sumideros de carbono*, informe preparado por Chmura, G., F. T. Short y D. Torio, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.

CCA (2017), *Seagrass sediment sampling protocol and field study: British Columbia, Washington and Oregon*, informe final elaborado por la Universidad de Nuevo Hampshire para la Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá (disponible sólo en inglés).

Duarte, C. M., J. J. Middelburg y N. Caraco (2005), “Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle”, *Biogeosciences*, núm. 2, pp. 1-8.

Finlayson, D. P., R. A. Haugerud, H. Greenberg y M. G. Logsdon (2000), *Puget Sound digital elevation model*, Universidad de Washington, en: <www.ocean.washington.edu/data/pugetsound/> (consulta realizada el 21 de octubre de 2016).

Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. A. Mateo, E. T. Apostolaki, G. A. Kendrick, D. Krause Jensen, K. J. McGlathery y O. Serrano (2012), “Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock”, *Nature Geoscience*, núm. 5(7), pp. 505-509.

Gregg, E. J., J. Lessard y J. Harper (2013), “A spatial framework for representing nearshore ecosystems”, *Progress in Oceanography*, núm. 115, pp. 189-201.

Harper, J. R. y M. C. Morris (2008), *British Columbia ShoreZone verification project*, informe de contrato preparado por Coastal and Ocean Resources Inc., Sidney, Columbia Británica, para la División de Manejo Integral de la Tierra (*Integrated Land Management Branch*), Ministerio de Silvicultura (*Ministry of Forestry*), Victoria, Columbia Británica.

Hejnowicz, A. P., H. Kennedy, M. A. Rudd y M. R. Huxham (2015), “Harnessing the climate mitigation, conservation and poverty alleviation potential of seagrasses: Prospects for developing blue carbon initiatives and payment for ecosystem service programmes”, *Frontiers in Marine Science*, núm. 2, pp. 1-22.

Howes, D. (2001), “British Columbia biophysical ShoreZone mapping system: A systematic approach to characterize coastal habitats in the Pacific Northwest”, relatorías y memorias de la Conferencia sobre Investigaciones en el Estrecho de Puget, Seattle.

McLeod, E., G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte, C. E. Lovelock, W. H. Schlesinger y B. R. Silliman (2011), "A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂", *Frontiers in Ecology and the Environment*, núm. 9(10), pp. 552-560; disponible en: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/110004/abstract>>.

NGDC (2003), "US Coastal Relief Model – Northwest Pacific and Central Pacific", National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration [Centro Nacional de Datos Geofísicos, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos], doi:10.7289/V5H12ZX], en: <www.ngdc.noaa.gov/mgg/coastal/grddas08/grddas08.htm> y <www.ngdc.noaa.gov/mgg/coastal/grddas07/grddas07.htm> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

NOAA (2016), "National Oceanic and Atmospheric Administration tsunami inundation digital elevation models (DEM)", en: <www.ngdc.noaa.gov/mgg/inundation/tsunami/> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

PSFMC (2004), "Groundfish essential fish draft EIS", Pacific State Fishery Management Commission [Comisión para la Gestión de los Recursos Pesqueros de los Estados del Pacífico], en: <www.oregonocean.info/index.php/home/downloads/maps-data/gis-data/shapefiles/biology-1/plants-1/352-alternative-b-4-seagrass-for-west-coast-groundfish-essential-fish-habitat-draft-eis-psmfc-2004> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

Pendleton, L., D. C. Donato, B. C. Murray, S. Crooks, W. A. Jenkins, S. Sifleet, C. Craft, J. W. Fourqurean, J. B. Kauffman, N. Marbà y P. Megonigal (2012), "Estimating global 'blue carbon' emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems", *PLOS ONE*, núm. 7(9), pp. 1-7.

ShoreZone (2014a), "Coastal habitat monitoring program", Oregon Department of Fish and Wildlife [Departamento de Pesca y Vida Silvestre de Oregón], en: <<http://oregonshorezone.info/>> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

ShoreZone (2014b), "Coastal habitat monitoring program", informe de síntesis, Oregon Department of Fish and Wildlife [Departamento de Pesca y Vida Silvestre de Oregón]; disponible en: <http://oregonshorezone.info/docs/Oregon_Summary_Report_14July14_final.pdf> (consulta realizada el 5 de diciembre de 2016).

ShoreZone (2016), "Washington nearshore habitat inventory", en: <www.dnr.wa.gov/programs-and-services/aquatics/aquatic-science/nearshore-habitat-inventory> (consulta realizada el 9 de septiembre de 2016).

Young, D. R., P. J. Clinton, H. Lee II, D. T. Specht y T. C. Mochon Collura (2009), "Aerial measure of estuarine intertidal and shallow subtidal *Zostera marina* coverage", en: Lee II, H. y C. A. Brown (ed.), *Classification of regional patterns of environmental drivers and benthic habitats in Pacific Northwest estuaries*, informe EPA/600/R-09/140 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Washington, DC, octubre de 2009, pp. 219- 241, en: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1006Q2H.txt>>.

Young, D., P. Clinton, D. Specht, T. Collura e I. I. Lee (2012), "Determining bathymetric distributions of the eelgrass *Zostera marina* L. in three turbid estuaries on the eastern North Pacific coast", *Botánica Marina*, núm. 55, pp. 229-240.