

Variabilidad en la capacidad de almacenamiento de carbono azul en lechos de *Zostera marina* en la costa del Pacífico en Canadá



Evaluación de la variabilidad al interior de franjas submareales e intermareales, y entre una y otra, en tres praderas en la parte sur del estrecho de Clayoquot, Columbia Británica

La presente investigación corrió a cargo de **A. McGowan**, **V. Postlethwaite** y **K. Kohfeld**, de la Universidad Simon Fraser; **J. Yakimishyn**, del Departamento de Parques de Canadá (*Parks Canada*), y **C. Robinson**, de la Universidad de Victoria.

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).

Zostera marina a lo largo de la costa norte del Pacífico en América del Norte

Reconocidos como sistemas altamente productivos, los ecosistemas costeros marinos tienen además la capacidad de captar y almacenar carbono orgánico, denominado “carbono azul”. Sin embargo, en la costa del Pacífico de América del Norte no se ha prestado la debida atención al potencial de estos hábitats como sumideros de carbono azul (Nellemann *et al.*, 2009; McLeod *et al.*, 2011). Se estima que los ecosistemas costeros con vegetación —manglares, marismas, lechos de pasto marino y bosques de algas— almacenan carbono a un ritmo hasta doce veces mayor que los bosques terrestres (Fourqurean *et al.*, 2012). Estimaciones recientes sugieren que los lechos de pasto marino —que cuentan entre las comunidades vegetales acuáticas más productivas del planeta— constituyen sumideros de carbono de alta eficacia, al almacenar una cantidad de carbono desproporcionada para la superficie relativamente pequeña que ocupan (Duarte, 2002; Pendleton *et al.*, 2012; Duarte *et al.*, 2013). Aunque sólo ocupan aproximadamente 0.2% de la superficie oceánica mundial, se estima que estos hábitats dan cuenta de más de 15% de la captación de carbono a escala mundial (Duarte *et al.*, 2010). Estudios recientes sugieren que entre 300,000 y 600,000 km² de la superficie terrestre total están cubiertos por hábitats de pasto marino, con un potencial de almacenamiento de hasta 19.9 petagramos (Pg) de carbono (C) (Fourqurean *et al.*, 2012).

Los pastos de la especie *Zostera marina* se encuentran en aguas someras de estuarios de zonas templadas a lo largo de la costa del Pacífico en Canadá y Estados Unidos (Raposa y Bradley, 2009; Lavery *et al.*, 2013). Además del papel que desempeñan en la función ecosistémica, la deposición de sedimentos y la estabilización de sustratos, estos pastos marinos actúan como importantes sumideros de carbono (Raposa y Bradley, 2009), mismo que se almacena en los sedimentos y se acumula principalmente a partir de la producción *in situ* y la precipitación desde la columna de agua (Greiner *et al.*, 2013).



Caleta Kennedy, Columbia Británica.

Lamentablemente, las praderas marinas figuran también entre los ecosistemas costeros más amenazados como resultado de actividades humanas y la urbanización (Orth *et al.*, 2006; Waycott *et al.*, 2009). Cada año se pierde entre 0.4 y 2.6 por ciento de los lechos de pasto marino a escala mundial, lo que significa que podrían estarse liberando a la atmósfera de 0.15 a 1.02 Pg de dióxido de carbono (CO₂) al año (Pendleton *et al.*, 2012). Cuanto mayor sea la pérdida de estos ecosistemas menor será su capacidad para captar y almacenar carbono. En algunas regiones del mundo, la destrucción de estos hábitats puede dar como resultado la liberación de volúmenes de carbono acumulados durante hasta ocho mil años (Campbell, 2010; CCA, 2016). El desconocimiento sobre la importancia de

los lechos de *Zostera marina* como sumideros de carbono entorpece la planeación que busca conservar los hábitats que captan y almacenan carbono azul, al igual que la formulación de políticas integrales relacionadas con el manejo del carbono costero en la costa del Pacífico de América del Norte (Sutton Grier y Moore, 2016). Dada la falta de información geoespacial sobre la cobertura de las praderas marinas y en general de las principales reservas de carbono azul, recientemente se identificó a la costa del Pacífico de América del Norte como sitio prioritario para la elaboración de mapas de lechos de pasto marino y para llevar a cabo investigaciones en torno a su capacidad de captación y almacenamiento de carbono (CCA, 2016).

Resumen de la investigación

El presente estudio tiene como objetivo obtener estimaciones sobre la variabilidad en el almacenamiento y la acumulación de carbono de praderas de *Zostera marina* ubicadas a lo largo de una gradiente de 25 km de entradas de agua dulce en el estrecho de Clayoquot, Columbia Británica, Canadá. Específicamente, se evalúa, desde una perspectiva cuantitativa, la variabilidad espacial en la biomasa de *Z. marina*, la captación de carbono y los índices de acumulación del mismo al interior de zonas intermareales y submareales de tres praderas marinas en la parte sur del estrecho de Clayoquot (véase la figura 1). Este trabajo de investigación da respuesta a varias interrogantes:

- En términos geoespaciales, ¿cuáles son la extensión y áreas que las porciones intermareales y submareales de las praderas de *Zostera marina* ocupan?
- ¿Cuál es la variabilidad en la densidad y biomasa de los brotes de *Zostera marina* al interior de las praderas, y entre una pradera y otra?
- En comparación con sitios intermareales desprovistos de vegetación, ¿cuál es la variabilidad en la capacidad de los sedimentos para captar y almacenar carbono al interior de las praderas de *Zostera marina*, y entre una pradera y otra?
- En conjunto, ¿de qué manera estas condiciones diferentes influyen las estimaciones del carbono orgánico total captado y almacenado en las praderas de *Zostera marina*?

Los tres sitios de praderas marinas objeto de estudio de la presente investigación se ubican en la ensenada de Tofino, localizada en la parte sur del estrecho de Clayoquot, costa suroccidental de la isla de Vancouver, Columbia Británica, Canadá. Uno de estos sitios —la bahía de Grice— se encuentra al interior de la Unidad Long Beach de la Reserva Parque Nacional de la Cuenca del Pacífico de Canadá, pero los tres sitios pertenecen a la Reserva de la Biosfera de Clayoquot,

reconocida como tal por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco). Los tres sitios de pastos marinos se distribuyen en la ensenada de Tofino a lo largo de una gradiente de temperatura del agua y salinidad de la superficie, resultante de la descarga de agua dulce procedente de la parte baja del río Kennedy (Robinson y Yakimishyn, 2008).

A fin de estimar la extensión de las regiones intermareales y submareales de cada una de las praderas analizadas, se utilizaron los siguientes métodos: a) durante la bajamar se obtuvieron en campo las coordenadas del sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*, GPS) para demarcar los límites de las praderas intermareales

Figura 1. Localización de los tres sitios de praderas marinas en los que se tomaron muestras, en el estrecho de Clayoquot, Columbia Británica, Canadá



Zona de proyección: Sistema Geodésico Mundial (WGS, por sus siglas en inglés) del sistema de coordenadas geográficas (GCS) 1984, zona 9-10 N del sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM). Fuente del mapa base: Google Maps, 2016, McGowan, Aimee.

Figura 2. Obtención de coordenadas GPS a lo largo del límite hacia tierra de la bahía de Grice



y submareales (véase la figura 2); b) a partir de un video tomado con una cámara subacuática de alta definición se caracterizó la densidad de los pastos de *Zostera marina* y los límites de la porción submareal de cada pradera, y c) se recurrió al uso de imágenes aéreas para sintetizar y plasmar las mediciones realizadas en campo en mapas regionales a gran escala de cada pradera.

En cada una de las tres praderas estudiadas se determinaron, durante la bajamar, la densidad y la biomasa viva en los brotes de *Zostera marina*. Para ello, se levantaron muestras de tres transectos de 50 metros de longitud, cada uno con cuadrículas de 0.25 m², a fin de determinar las propiedades superficiales y subterráneas de los pastos; 24 cuadrículas fueron representativas de pastos intermareales, en tanto que 12 lo fueron de pastos submareales someros. Asimismo, en cada pradera se obtuvieron seis núcleos de sedimentos a la profundidad de rechazo utilizando un método sencillo de perforación empujada (véase la figura 3), y se recolectó un núcleo adicional de un sitio aledaño sin vegetación, a utilizarse de referencia.

Los núcleos se extrajeron en incrementos de un centímetro y luego se analizaron en el laboratorio para determinar la densidad aparente en seco. Además, se llevó a cabo un análisis granulométrico detallado en sedimentos de un núcleo por cada pradera. A fin de estimar el contenido de carbono, se utilizó la pérdida por calcinación como medida sustitutiva que permite conocer el porcentaje de carbono orgánico mediante su equiparación con estimaciones obtenidas a partir del análisis elemental del carbono total y el análisis por coulombimetría del contenido de carbono inorgánico. Con el objeto de obtener fechas radiométricas y determinar la acreción sedimentaria y los índices de acumulación del carbono, se sometieron a análisis de plomo-210 (²¹⁰Pb) submuestras de nueve núcleos, incluidos los tres núcleos de referencia.

Ubicada en la zona más alejada de la parte baja del río Kennedy, la pradera con mayor presencia de *Zostera marina* fue la punta Robert, donde se registró una superficie total estimada de 31,900 m² (3.19 ha) (véase la figura 4). El componente intermareal de esta pradera se estimó

Figura 3. Recolección de núcleos de sedimentos en un sitio intermareal en la punta Robert



en 22,400 m² (2.24 ha, 70%), mientras que la porción submareal fue de 9,470 m² (0.95 ha, 30%). La pradera de *Z. marina* ubicada en el punto medio de la parte baja del río Kennedy, correspondiente a la bahía de Grice, registró una superficie total estimada de 262,000 m² (26.20 ha). El componente intermareal de esta pradera se estimó en 186,000 m² (18.60 ha, 71%), mientras que la porción submareal fue de 75,171 m² (7.51 ha, 29%). En cambio, los pastos de *Z. marina* más cercanos a la parte baja del río Kennedy, en la caleta Kennedy, registraron una superficie total de 5,340 m² (0.53 ha), con un componente intermareal estimado en 1,025 m² (0.10 ha, 19%), en tanto que la porción submareal fue de 4,318 m² (0.43 ha, 81%).

Los datos sobre densidad y biomasa de los brotes de *Z. marina* obtenidos para el presente estudio permitieron, a su vez, generar estimaciones de la biomasa de dicho pasto marino presente tanto en la superficie como subterráneamente. Las estimaciones de la biomasa de *Z. marina* en la superficie en las zonas intermareales y submareales de la punta Robert, la bahía de Grice y la caleta Kennedy coincidieron con los valores encontrados en material publicado, que van de 5 a 96 gramos de peso en seco por metro cuadrado (g-PS m⁻²).

En la zona intermareal, la punta Robert y la bahía de Grice compartieron las mismas estimaciones para la biomasa subterránea promedio (20 ± 6 g-PS m⁻²), valor que duplica el de la estimación correspondiente a la caleta Kennedy. Los niveles de biomasa subterránea en zonas submareales también fueron más elevados en la punta Robert (26 ± 20 g-PS m⁻²): 1.5 veces mayores que los de la bahía de Grice (15 ± 8 g-PS m⁻²) y cinco veces mayores que los de la caleta Kennedy (5 ± 4 g-PS m⁻²). En términos generales, sin embargo, las estimaciones de biomasa subterránea para el estrecho de Clayoquot —tanto en las porciones intermareales como en las submareales de cada pradera— registraron valores considerablemente inferiores a los encontrados en material publicado, mismos que suelen oscilar entre 49 y 244 g-PS m⁻².

El cociente entre la biomasa superficial y la subterránea (AGB:BGB, por sus siglas en inglés) calculado para las porciones intermareales y submareales de las praderas

estudiadas fue, en promedio, 3.1 (los valores se ubicaron entre 1.7 y 4.3): cerca de un orden de magnitud mayor que los índices registrados en los trabajos publicados. Se especula que las bajas estimaciones para la biomasa subterránea de *Zostera marina* en el estrecho de Clayoquot probablemente obedecen a condiciones ambientales, como la reducida disponibilidad de luz y el estado relativamente pobre de los sedimentos subterráneos.

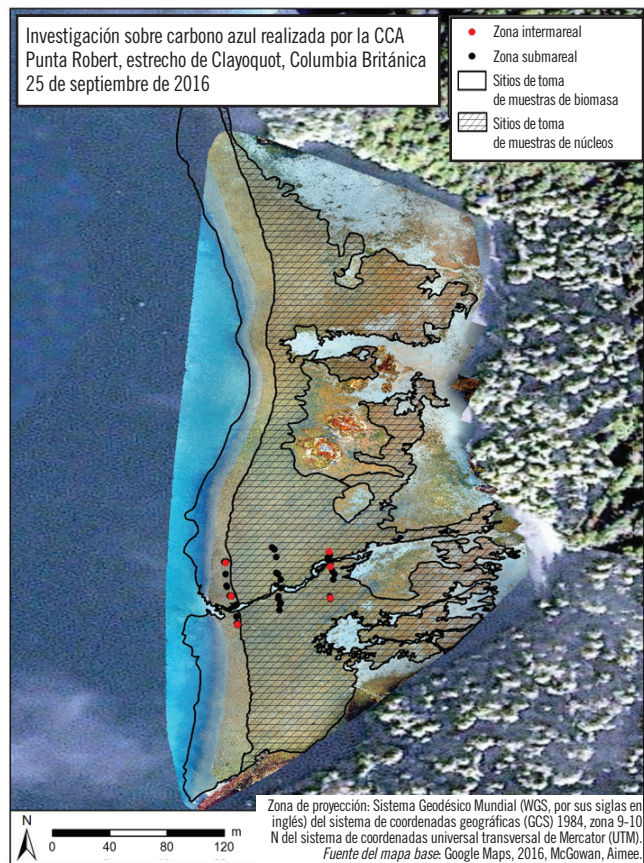
Los resultados del análisis de laboratorio de los núcleos sedimentarios indican que el contenido porcentual de carbono en los sedimentos (C_{org}) fue de $<1.30\%$ en todas las praderas estudiadas, además de ser moderadamente variable. Específicamente, el C_{org} porcentual fue de $<1\%$ en la punta Robert, con un valor promedio de $0.22 \pm 0.13\%$ de C_{org} . No se observó una diferencia significativa entre la porción submareal y la intermareal en la pradera de la punta Robert ($p=0.055$). Asimismo, el núcleo de referencia sin vegetación registró un contenido porcentual de C_{org} considerablemente menor que el de la pradera de la punta Robert ($p<0.001$).

Para la bahía de Grice fue de $<1\%$, con un valor promedio de $0.30 \pm 0.12\%$ de C_{org} . Los valores porcentuales de C_{org} en los pastos intermareales ($0.24 \pm 0.04\%$ de C_{org}) fueron considerablemente menores que aquellos en las praderas submareales ($p<0.001$). Por su parte, en comparación con los pastos en la bahía de Grice, el núcleo de referencia sin vegetación registró valores porcentuales de contenido de C_{org} muy inferiores ($p<0.001$).

Finalmente, la caleta Kennedy registró el contenido porcentual de C_{org} más alto entre los tres sitios de praderas objeto del presente estudio, al observarse un valor promedio de $0.47 \pm 0.26\%$ de C_{org} . No se registró una diferencia significativa en dicho contenido entre las porciones intermareales y submareales ($p=0.532$). El núcleo de referencia sin vegetación registró, a su vez, un contenido porcentual de C_{org} considerablemente menor que las porciones intermareales ($p=0.002$) y submareales ($p<0.001$) de los pastos estudiados en la caleta Kennedy.

A fin de calcular los índices de acumulación (secuestro) de carbono, se procedió a efectuar un análisis de plomo-210 (^{210}Pb), que arrojó índices de secuestro menores cada año, observándose el mayor descenso debajo de los primeros ~ 10 a ~ 20 cm de profundidad en todos los pastos marinos estudiados. En la pradera de la punta Robert, los índices de acreción sedimentaria oscilaron entre 10.36 y $36.74 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y los índices de acumulación de carbono, entre 0.03 y $0.16 \text{ g-C}_{org} \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. En cuanto a la pradera de la bahía de Grice, los índices de acreción sedimentaria presentaron una variabilidad de entre 25.53 y 49.08

Figura 4. Mapa de la pradera de *Zostera marina* en la punta Robert en forma de polígono sombreado (intermareal) y polígono transparente (submareal)



Los puntos negros indican las cuadrículas de recolección de biomasa (tres transectos cruzados) y los rojos corresponden a los seis sitios de recolección de núcleos de sedimentos.

$\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y los índices de acumulación de carbono se ubicaron entre 0.06 y $0.15 \text{ g-C}_{org} \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, con un índice promedio de $0.12 \pm 0.02 \text{ g-C}_{org} \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. En la pradera de la caleta Kennedy, por su parte, los índices de acreción sedimentaria fueron de entre 8.41 y $40.74 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y los índices de acumulación de carbono oscilaron entre 0.03 y $0.47 \text{ g-C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

Al combinar las estimaciones de biomasa de *Zostera marina* viva con las estimaciones aéreas obtenidas para cada una de las praderas objeto de estudio, se observó que la bahía de Grice había registrado la mayor biomasa total de *Z. marina*, seguida por la punta Robert y la caleta Kennedy. Para la bahía de Grice se registró una biomasa superficial total de 15.80 ± 10.27 megatoneladas de peso en seco por metro cuadrado (Mt-PS m^{-2}) y una biomasa subterránea total de $6.06 \pm 3.77 \text{ Mt PS m}^{-2}$; en la punta Robert la biomasa superficial total fue de $2.06 \pm 1.04 \text{ Mt PS m}^{-2}$ y la subterránea se ubicó en $0.69 \pm 0.50 \text{ Mt PS m}^{-2}$, mientras que en la caleta

Figura 5. Reservas de carbono en las praderas intermareales en la punta Robert, la bahía de Grice y la Caleta Kennedy ($\text{g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$)

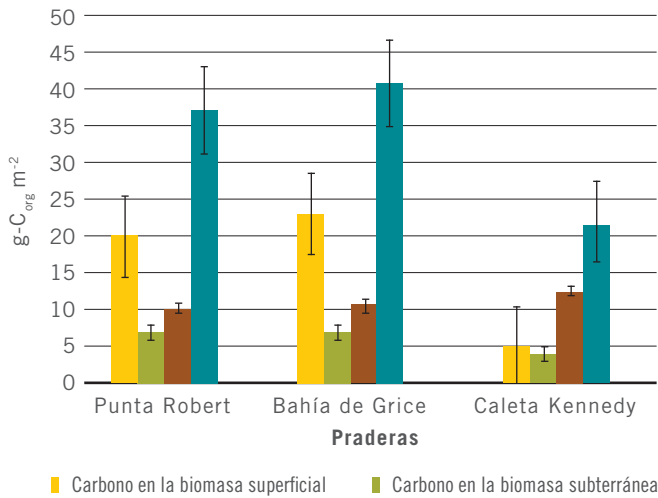
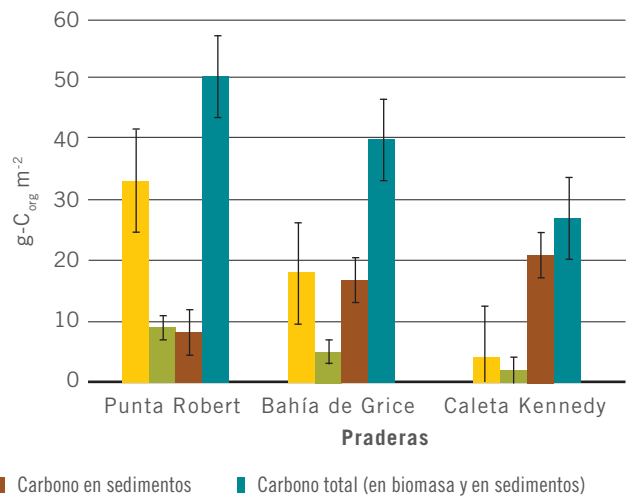


Figura 6. Reservas de carbono en las praderas submareales en la punta Robert, la bahía de Grice y la Caleta Kennedy ($\text{g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$)



Kennedy se obtuvieron las menores biomazas totales: superficial de $0.06 \pm 0.03 \text{ Mt PS m}^{-2}$ y subterránea de $0.03 \pm 0.02 \text{ Mt PS m}^{-2}$.

Los valores correspondientes a las estimaciones para la biomasa tanto superficial como subterránea se convirtieron a contenido de carbono orgánico (C_{org}) utilizando un factor de conversión estándar de 36 por ciento. Así, por cuanto a la biomasa intermareal superficial, la bahía de Grice presentó los niveles de almacenamiento de C_{org} más altos, con un valor medio estimado de $23 \pm 17 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$, en tanto que el nivel más bajo de reservas de C_{org} se registró en la caleta Kennedy, con un valor promedio de $5 \pm 3 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$. En las praderas submareales, la reserva de carbono más elevada en biomasa superficial se observó en la punta Robert ($33 \pm 18 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$), y la caleta Kennedy registró los valores más bajos ($4 \pm 1 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$). Para la biomasa subterránea, el promedio más alto de reservas de carbono en la zona intermareal se registró en la punta Robert ($7 \pm 5 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$) y la bahía de Grice ($7 \pm 6 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$), mientras que el valor más bajo correspondió nuevamente a la caleta Kennedy ($4 \pm 3 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$); de manera similar, en los pastos marinos submareales, la reserva más alta de C_{org} se registró en la punta Robert ($9 \pm 7 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$) y los valores más bajos fueron una vez más para la caleta Kennedy ($2 \pm 1 \text{ g-C}_{\text{org}} \text{m}^{-2}$).

Reserva de carbono orgánico total

El carbono orgánico total es la suma del carbón “vivo” en los pastos de *Zostera marina*, tanto superficiales como subterráneos, y del carbón almacenado en los sedimentos. En

el presente estudio, los reservorios de carbono en sedimentos intermareales y los depositados subterráneamente (en la biomasa viva) resultaron similares entre una pradera y otra. Se estimó que la cantidad de carbono presente en los sedimentos fue más alta en la caleta Kennedy por metro cuadrado, pero al escalar los valores a las superficies totales de las praderas, la de bahía de Grice presentó el contenido en sedimentos más alto dada su gran extensión (26.10 ha, en comparación con 3.19 ha de la pradera de punta Robert y 0.53 ha de la de caleta Kennedy). En términos generales, el carbono total —en biomasa viva y en sedimentos— registró los niveles más altos en la bahía de Grice —seguida muy de cerca por la punta Robert—, con casi 50% más que el contenido de carbono en la pradera de la caleta Kennedy. Estos resultados se representan gráficamente en la figura 5. Desde una perspectiva aérea, la pradera intermareal de la bahía de Grice registró una capacidad de almacenamiento de carbono entre diez y veinte veces mayor que las de la caleta Kennedy o la punta Robert, en virtud de su extensión.

En la porción submareal de las praderas estudiadas, la cantidad de C_{org} en sedimentos disminuyó a alrededor de la mitad, con un aumento en la salinidad de 23 partes por millar y una disminución de la temperatura de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ al avanzar mar adentro. Más aún, el contenido de C_{org} en la biomasa viva superficial y subterránea fue alrededor de ocho y dos veces mayor, respectivamente, en la punta Robert en comparación con las praderas de la caleta Kennedy, donde se observa la presencia de agua más cálida y más dulce. Si bien las reservas de C_{org} en sedimentos más elevadas se registraron en la pradera de la caleta Kennedy —de agua más dulce— sobre una base por

metro cuadrado, las estimaciones al considerar las superficies totales indican que la pradera en la bahía de Grice registró entre seis y diez veces más carbono almacenado en su porción submareal. (Véase la gráfica en la figura 6.) En términos generales, los resultados del presente estudio

apuntan, pues, hacia una clara relación a la inversa entre la cantidad de carbono presente en la biomasa viva de *Zostera marina* y aquella contenida en reservas sedimentarias a lo largo de las gradientes de salinidad y temperatura observadas en el estrecho de Clayoquot.

Principales hallazgos

Los hallazgos a destacar del presente estudio son los siguientes:

- La densidad en los brotes de *Zostera marina* resultó más elevada en las porciones intermareales más bajas de las praderas en el estrecho de Clayoquot.
- La variabilidad en la densidad de los brotes en la porción intermareal más alta de cada una de las praderas estudiadas fue casi el doble de la observada en las porciones intermareal inferior y submareal somera.
- La biomasa en las raíces subterráneas de *Zostera marina* no presentó variaciones perceptibles entre las porciones intermareal y submareal de cada una de las praderas objeto de análisis, aunque las estimaciones resultaron entre 2.5 y diez veces más bajas que los valores contenidos en material publicado para otro tipo de pastos marinos. El cociente entre la biomasa superficial y la subterránea estimado para los componentes intermareales y submareales de las tres praderas objeto de estudio fue en promedio de 3.1; es decir, un orden de magnitud mayor que los registrados para otras regiones de pastos marinos.
- Los índices acumulación (secuestro) de carbono en el presente estudio promediaron entre 0.1 y 0.3 g-C m⁻² año⁻¹, valores muy bajos en comparación con los publicados en otros estudios.
- El contenido porcentual estimado de C_{org} almacenado en los sedimentos de las tres praderas analizadas se ubicó por debajo de 1.30%, lo que resulta considerablemente inferior que las estimaciones para otros pastos marinos y otras regiones.
- El contenido de C_{org} en sedimentos de las porciones intermareales y submareales varió muy poco entre una pradera y otra del estrecho de Clayoquot. Se encontró que entre 50 y 70 por ciento de los sedimentos debajo de cada pradera de *Zostera marina* consistía en arena de grano fino a mediano, poco favorable para la adsorción de carbono.
- En las franjas intermareales, los reservorios de carbono en sedimentos y los niveles de carbono en biomasa viva subterránea resultaron similares entre las tres praderas estudiadas; el nivel de carbono superficial se multiplicó de dos a tres veces al aumentar la salinidad y bajar la temperatura del agua.
- En las porciones submareales de las praderas objeto de estudio, el carbono depositado en sedimentos se redujo a casi la mitad al avanzar mar adentro, a medida que la salinidad aumentó (23 partes por millar) y la temperatura del agua disminuyó (5 °C); el carbono en la biomasa subterránea, por su parte, se mantuvo relativamente estable, en tanto que el carbono superficial disminuyó casi siete veces al aumentar las temperaturas y disminuir la salinidad.
- En términos generales, se estimó que, de las tres praderas estudiadas, la de la bahía de Grice registró las mayores reservas de C_{org} total (en biomasa y en sedimentos): con un nivel aproximadamente diez veces mayor que el de la punta Robert y 77 veces mayor que el de la caleta Kennedy. La pradera de la bahía de Grice tiene una superficie ocho y 49 veces mayor que los otros dos sitios, respectivamente.
- Los perfiles obtenidos con el análisis de plomo-210 indican que la mezcla superficial en los sedimentos debajo de cada una de las praderas se llevó a cabo a una profundidad de entre 10 y 15 centímetros.



Pastos marinos, Tofino, Columbia Británica.

Conclusión

Aunque al parecer las praderas de *Zostera marina* en el estrecho de Clayoquot registran valores reducidos de C_{org} , sus reservas de carbono resultan considerablemente mayores, en comparación con los sitios de referencia carentes de vegetación. Ello indica que los pastos de *Z. marina* sí contribuyen al almacenamiento de carbono en el estrecho de Clayoquot, pero no en los niveles tan elevados que se observan en pastos marinos más tropicales. Más aún, si bien en la mayoría de los estudios publicados no se distingue entre las franjas intermareales y submareales de praderas de esta especie (por falta de amplitud de las mareas), los resultados de la presente investigación permiten observar importantes diferencias en las propiedades de almacenamiento de carbono entre una franja y otra. Las vastas llanuras mareales (de marea alta o fangosas) en la ensenada de Tofino albergan extensas superficies de *Z. marina* intermareal de densidad relativamente alta (por ejemplo, en la bahía de Grice), cuya contribución al almacenamiento de carbono supera por mucho la de las porciones submareales de las praderas o la de las praderas marginales normalmente más reducidas en la ensenada de Tofino (y otras partes de la costa de Columbia Británica). El tamaño reducido de la mayoría de las praderas submareales de *Z. marina* de en esta ensenada obedece probablemente a las limitaciones en cuanto a luz o nutrientes, o a la falta de sedimentos subsuperficiales adecuados para la adsorción de carbono. La presente investigación pone énfasis, asimismo, en que aun cuando la capacidad de almacenamiento de carbono en los sedimentos no varía en forma apreciable entre las porciones intermareales y submareales al interior de las praderas o entre una pradera y otra, sí parece estar relacionada con cambios en la salinidad y la temperatura de la superficie. Por ello podría esperarse que las llanuras intermareales de *Zostera marina*, más extensas y localizadas hacia el extremo más salino y frío del espectro medioambiental, sean los hábitats que más contribuyen al almacenamiento de carbono superficial en la ensenada de Tofino, de suerte que deben convertirse en objetivos claros y específicamente definidos en las iniciativas de conservación.

Agradecimientos

Los autores extienden su profundo agradecimiento al doctor M. Pellatt, del Departamento de Parques de Canadá (*Parks Canada*), quien, además de facilitar el acceso a los sitios para llevar a cabo el trabajo de campo, apoyó con la obtención de núcleos y proporcionó la infraestructura de laboratorio para los análisis de sedimentos. Deseamos agradecer los invaluable apoyo en campo y orientación prestados por S. Chastain y C. Barlow, de la Universidad Simon Fraser. El trabajo de campo no habría podido completarse sin la asistencia de D. Harrison, de la Sociedad Educativa Raincoast (*Raincoast Education Society*), quien fungió como guía y asistente de campo. Vaya nuestro reconocimiento a M. Soon, de la Universidad de Columbia Británica, por su apoyo en la ejecución del análisis elemental, así como a H. Jensen, quien colaboró en el trabajo de laboratorio. Por último, queremos expresar nuestro agradecimiento a la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), por los recursos aportados para la realización de este importante estudio, y en especial, a la doctora K. Richardson por su valioso asesoramiento.

Referencias

- Campbell, C. R. (2010), *Blue Carbon-British Columbia: The case for the conservation and enhancement of estuarine processes and sediments in B.C.*, Sierra Club, Columbia Británica, Canadá; disponible en: <<http://sierraclub.bc.ca/wp-content/uploads/2015/08/Blue-Carbon-British-Columbia-Report.pdf>>.
- 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*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá; disponible en: <www.cca.org/islandora/es/item/11664-north-america-s-blue-carbon-assessing-seagrass-salt-marsh-and-mangrove>.
- Duarte, C. M. (2002), "The future of seagrass meadows", *Environmental Conservation*, núm. 29(2), pp. 192-206.
- Duarte, C. M., N. Marbà, E. Gacia, J. W. Fourqurean, J. Begins, C. Barron y E. T. Apostolaki (2010), "Seagrass community metabolism: assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows", *Global Biogeochemical Cycles*, núm. 24.
- Duarte, C. M., H. Kennedy, N. Marbà e I. Hendriks (2013), "Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: current limitations and future strategies", *Ocean and Coastal Management*, núm. 83, pp. 32-38.
- Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. A. Mateo y O. Serrano (2012), "Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock", *Nature Geoscience*, núm. 5, pp. 505-509.
- Greiner, J. T., K. J. McGlathery, J. Gunnell y B. A. McKee (2013), "Seagrass restoration enhances blue carbon sequestration in coastal waters", *PLOS ONE*, núm. 8(8).
- Lavery, P. S., M. A. Mateo, O. Serrano y M. Rozaimi (2013), "Variability in the carbon storage of seagrass habitats and its implications for global estimates of blue carbon ecosystem service", *PLOS ONE*, núm. 8(9).
- McLeod, E., G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte 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. 10, pp. 552-560.
- Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdes, C. DeYoung, L. Fonseca y G. Grimsditch (2009), *Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon*, BirkelandTrykkeri AS, Noruega, disponible en: <www.grida.no/files/publications/blue-carbon/BlueCarbon_screen.pdf>.
- Orth, R. J., T. J. B. Carruthers, W. C. Dennison, C. M. Duarte, J. W. Fourqurean, K. L. Heck Jr., A. Randall Hughes, G. A. Kendrick, W. Judson Kenworthy, S. Olyarnik, F. T. Short, M. Waycott y S. L. Williams (2006), "A global crisis for seagrass ecosystems", *BioScience*, núm. 56(12), pp. 987-996.
- Pendleton, L., D. C. Donato, B. C. Murray, S. Crooks, W. A. Jenkins, S. Sifleet y A. Baldera (2012), "Estimating global 'blue carbon' emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems", *PLOS ONE*, núm. 7(9).
- Raposa, K. y M. Bradley (2009), *Methods and protocols for eelgrass mapping in Rhode Island: Recommendations from the Rhode Island eelgrass mapping task force*, Reserva de Investigación de la Bahía de Narragansett, Rhode Island, Estados Unidos; disponible en: <www.nbnerr.org/Content/Series/TechSeries_2009_5_EelgrassMapping_report.pdf>.
- Robinson, C. L. K. y J. Yakimishyn (2008), *Monitoring for the ecological integrity of eelgrass beds (Zostera marina) in Canada's coastal National Parks of British Columbia*, Western and Northern Service Centre, Parks Canada [Centro de Servicios del Oeste y el Norte, Departamento de Parques de Canadá], Columbia Británica, Canadá, pp. 1-119.
- Sutton Grier, A. y A. Moore (2016), "Leveraging carbon services of coastal ecosystems for habitat protection and restoration", *Coastal Management*, núm. 44(3); disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1080/08920753.2016.1160206>>.
- Waycott, M., C. M. Duarte, T. J. B. Carruthers, R. J. Orth, W. C. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine, J. W. Fourqurean, K. L. Heck Jr., A. R. Hughes, G. A. Kendrick, W. J. Kenworthy, F. T. Short y S. L. Williams (2009), "Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems", *Proceedings of the National Academy of Sciences in the United States of America* [memorias de la Academia Nacional de Ciencia de Estados Unidos], núm. 106(30), pp. 12377-12381.