

La Quinta Evaluación Nacional del Clima

# Enfoque en el carbono azul



# Enfoque en el carbono azul

## Autores y colaboradores

### Autor principal de coordinación federal

**Allison R. Crimmins**, US Global Change Research Program

### Autor principal del capítulo

**Christine L. May**, Pathways Climate Institute

### Contribuyentes técnicos

**Sarah R. Cooley**, Ocean Conservancy

**Erica Fleishman**, Oregon State University

**Eric E. Grossman**, US Geological Survey, Pacific Coastal and Marine Science Center

**Brian Helmuth**, Northeastern University

**Richard A. MacKenzie**, USDA Forest Service, Institute of Pacific Islands Forestry

**Daisy R. Ramirez Lopez**, Pathways Climate Institute

**Emily Wasley**, WSP

### Editor revisor

**Lucila J. Houttuijn Bloemendaal**, Boston University, Department of Earth and Environment

### Arte de apertura de capítulo

**Amalija M.**

### Cita recomendada

May, C.L., A.R. Crimmins, S.R. Cooley, E. Fleishman, E.E. Grossman, B. Helmuth, R.A. MacKenzie, D.R.R. Lopez, and E. Wasley, 2023: Enfoque en el carbono azul. En: *La Quinta Evaluación Nacional del Clima*. Crimmins, A.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, B.C. Stewart, and T.K. Maycock, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.F5.ES>

## Enfoque en el carbono azul

El carbono azul se refiere al carbono capturado por los ecosistemas marinos y costeros, como los manglares, los humedales costeros y las praderas marinas. Los ecosistemas costeros capturan carbono a una tasa mucho más rápida que los terrestres, y el carbono almacenado bajo tierra puede permanecer en su lugar durante décadas o milenios si no es perturbado por los seres humanos o los eventos extremos. La conservación y restauración de los ecosistemas costeros puede contribuir a reducir las acumulaciones de dióxido de carbono en la atmósfera aumentando el secuestro de carbono azul.

### Carbono azul

El carbono azul es el análogo marino del carbono verde, que se refiere al carbono capturado por las plantas terrestres<sup>1</sup>. Los ecosistemas marinos son entornos acuáticos con altos niveles de salinidad, incluidos el océano abierto, el océano profundo y los ecosistemas costeros. Las plantas marinas y terrestres capturan y almacenan carbono mediante la fotosíntesis y la acumulación de materia orgánica, como las raíces, en el suelo<sup>1,2</sup>. Los ecosistemas de carbono azul (Blue Carbon Ecosystem, BCE) son ecosistemas costeros como manglares, humedales y praderas marinas que almacenan la mayor parte de su carbono bajo tierra, en los sedimentos oceánicos. Se estima que, acre por acre, los BCE almacenan aproximadamente el doble de carbono subterráneo que la vegetación terrestre (Figura F5.1)<sup>3,4</sup>.

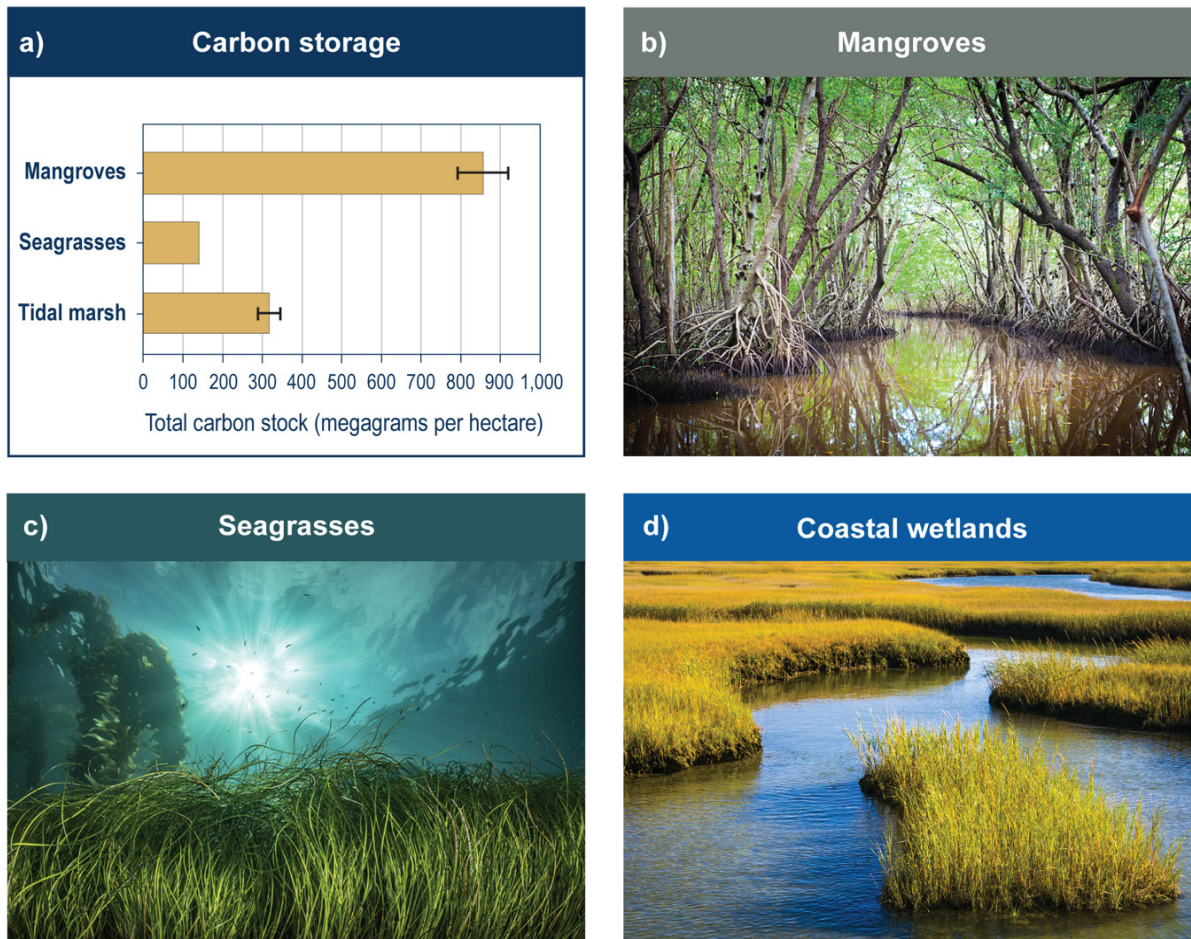
### Los beneficios del carbono

La capacidad de los BCE para capturar y almacenar carbono ha generado numerosos esfuerzos internacionales que apoyan el carbono azul como una opción natural de mitigación del clima a través de una mejor administración, gestión, conservación y restauración de estos ecosistemas y de los servicios medioambientales y beneficios colaterales que brindan (KM 8.3)<sup>2,3,5</sup>. Esta labor incluye la creación y mejora de mecanismos de financiamiento y políticos para la restauración costera que aumente el secuestro de carbono<sup>6,7,8</sup>, así como el desarrollo de métodos para cuantificar mejor el secuestro de carbono<sup>9,10,11</sup>.

La importancia de estimar las emisiones y el secuestro de carbono en los BCE está reconocida en políticas internacionales como las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) para los inventarios de gases de efecto invernadero<sup>12</sup>. Estados Unidos ha incluido los humedales costeros en su inventario nacional anual de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero<sup>13,14</sup>, y el gobierno monitorea los lugares de todo el país con mayor potencial de almacenamiento de carbono azul, como los Everglades de Florida, la Bahía de San Francisco y la Bahía de Chesapeake. A escala mundial, Estados Unidos registra una de las tasas más altas de pérdidas de BCE, debido en gran parte a los huracanes y la erosión costera<sup>15</sup>.

Con la conservación y restauración, los BCE podrían secuestrar suficiente carbono cada año para compensar alrededor del 3 % de las emisiones mundiales (basándose en las emisiones de 2019 y 2020)<sup>3</sup>. Otros ecosistemas o especies costeros y marinos, como los bosques de algas, los humedales de agua dulce, el fitoplancton y las profundidades marinas también pueden capturar carbono; sin embargo, el potencial de secuestro de carbono de estos ecosistemas y especies es probablemente menor que el de los BCE (Figura 8.19)<sup>16,17</sup>.

## Potencial de retención del carbono azul en los ecosistemas



**Los ecosistemas costeros de carbono azul desempeñan un papel importante en el secuestro de carbono, pero son vulnerables al cambio climático.**

**Figura F5.1.** Los ecosistemas costeros de carbono azul: manglares (b), praderas marinas (c) y humedales costeros (d) almacenan más carbono subterráneo en suelos y sistemas radiculares (por hectárea) que la vegetación terrestre, siendo los manglares los que más carbono almacenan por hectárea (a). También aportan otros beneficios, como reducción del riesgo de inundaciones, apoyo a los medios de subsistencia y oferta de oportunidades recreativas. Sin embargo, los ecosistemas de carbono azul son vulnerables al aumento del nivel del mar, los huracanes y otros eventos extremos. En (a), las barras negras indican el intervalo de confianza del 95 % (que no estaba disponible para las praderas marinas). Créditos de la figura: (a) Pathways Climate Institute. Créditos de las fotografías: (b) YinYang, iStock/Getty Images Plus a través de Getty Images; (c) tswinner, iStock/Getty Images Plus a través de Getty Images; (d) Ken Wiedemann, iStock/Getty Images Plus a través de Getty Images.

## **Beneficios adicionales**

Los BCE se encuentran en las interfaces entre los medios terrestre, marino y de agua dulce. Ofrecen hábitat a las especies, filtran el agua dulce, reciclan nutrientes y otros materiales (KM 8.3) y ayudan a sostener a las comunidades humanas aportando otros beneficios, como disipación de las olas, reducción del riesgo de inundaciones y apoyo a los medios de subsistencia costeros, seguridad alimentaria, actividades culturales y turismo (KM 23.2, 30.4; Recuadro 30.5)<sup>18,19</sup>. Las praderas marinas y los humedales costeros ofrecen un hábitat de cría para crustáceos y peces jóvenes de valor económico y cultural<sup>20</sup>, y apoyan el estado y la función de los ecosistemas adyacentes. Además, las praderas marinas pueden mitigar localmente la acidificación marina, reduciendo así algunos factores de estrés provocados por el clima en mariscos y crustáceos<sup>21,22</sup>.

## **Efectos del cambio climático en el carbono azul**

El aumento del nivel del mar (sea level rise, SLR) y los eventos extremos son las mayores amenazas del cambio climático para los BCE<sup>23</sup>. En el pasado, muchos BCE se adaptaron al SLR mediante el crecimiento de las raíces subterráneas, la sedimentación y la migración hacia el interior, que en conjunto aumentaron la elevación de los BCE. A medida que se acelera el SLR, la capacidad de los BCE para seguir adaptándose es incierta<sup>24,25</sup>. Si los BCE no pueden adaptarse a la aceleración del SLR, su extensión geográfica disminuirá y su composición de especies cambiará<sup>26</sup>. Actualmente, entre el 43 % y el 48 % de los humedales de la Costa Atlántica y de la Costa del Golfo son vulnerables al SLR, estando los humedales del norte limitados por la capacidad de migración hacia el interior y los del sur limitados por el hundimiento local, lo que aumenta la tasa relativa de aumento local del nivel del mar (KM 9.2)<sup>27</sup>.

El crecimiento de algunas especies de plantas puede aumentar en respuesta al calentamiento del clima y al aumento de las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono. Este aumento del crecimiento vegetal podría compensar localmente la aceleración del SLR y permitir que algunas especies del BCE siguieran adaptándose. Sin embargo, un experimento realizado durante 33 años en un humedal costero sugiere que cuando el SLR alcance una determinada tasa, el crecimiento de las plantas se verá obstaculizado, lo que limitará estos beneficios<sup>28</sup>. Esto sugiere que la mejora del crecimiento de las plantas por sí sola puede no permitir que todas las especies de humedales costeros se adapten a la aceleración del SLR.

Las perturbaciones humanas, el SLR y los eventos extremos pueden erosionar y degradar los BCE, lo que reduce el almacenamiento de carbono y liberando potencialmente carbono y metano previamente almacenado<sup>29,30,31</sup>. Si no se adoptan medidas de conservación, esta liberación de carbono almacenado podría ocasionar retroalimentaciones perjudiciales para el cambio climático<sup>32,33</sup>. Por ejemplo, la aceleración del aumento del nivel del mar degradaría aún más los ecosistemas de carbono azul, reduciría el secuestro de carbono y liberaría el carbono almacenado, lo que aumentaría aún más la tasa de degradación de los ecosistemas. Proteger y minimizar la degradación de las áreas costeras para favorecer el secuestro de carbono puede tener beneficios ecológicos y sociales en cascada<sup>3</sup>.

## **Investigación emergente**

A pesar de que la conservación y restauración de los BCE tiene amplios beneficios, sigue habiendo incertidumbres en cuanto a las tasas de secuestro de carbono en los distintos ecosistemas y regiones<sup>34</sup>. Se están realizando esfuerzos de investigación para mejorar los métodos, las mediciones y la modelación con el fin de subsanar brechas en el conocimiento relacionadas con los presupuestos de carbono costero<sup>35,36,37</sup>.

Las praderas marinas pueden mitigar las tasas locales o regionales de acidificación marina al absorber dióxido de carbono y aumentar el pH del agua de mar<sup>22</sup>. Sin embargo, las condiciones marinas están cambiando rápidamente y se necesita más investigación para evaluar este potencial de mitigación con altas tasas de acidificación marina y calentamiento de las temperaturas marinas (KM 10.1)<sup>38</sup>. Se prevé que el efecto

de la acidificación marina en los ecosistemas marinos varíe según la influencia combinada de múltiples factores climáticos y de otro tipo<sup>39</sup>.

Los medios más efectivos para mejorar los BCE y el secuestro de carbono son aumentar los suministros locales de sedimentos, permitir la expansión de los humedales, incluida la capacidad de migración hacia el interior, y restaurar las condiciones naturales de las mareas<sup>40</sup>. Los mecanismos de apoyo a estas mejoras dependen de la ubicación, el ecosistema y los factores de estrés, y su éxito se verá afectado por acciones pasadas como el represamiento de ríos, la deforestación, la construcción de diques y otras estructuras y el desarrollo invasivo<sup>41</sup>.

## Cuentas trazables

### *Descripción de la base de evidencia y brechas en la investigación*

Aunque es mucho lo que se sabe sobre el ciclo del carbono en los ecosistemas costeros, existen importantes desafíos e incertidumbres al cuantificar el almacenamiento de carbono, el potencial de almacenamiento de carbono y las tasas de secuestro de carbono en diferentes ecosistemas, tipos de vegetación y ubicaciones. Los sistemas costeros también se ven impactados por la variabilidad natural de las costas y el clima (p. ej., erosión, tormentas extremas, aumento del nivel del mar) y otros usos históricos y contemporáneos de la tierra que afectan el ciclo del carbono<sup>3,26</sup>. El grado en que estos factores de estrés pueden afectar el almacenamiento o a las emisiones de carbono es incierto, pero es importante cuantificarlo para mejorar las evaluaciones del secuestro.

Encontrar datos consistentes y comparables para comparar el almacenamiento de carbono subterráneo y aéreo en los ecosistemas costeros y terrestres es todo un desafío. Cooley *et al.* (2022)<sup>18</sup> presentó la compilación de datos más reciente de varias investigaciones; sin embargo, estas comparaciones entre ecosistemas utilizaron diferentes profundidades bajo el suelo para medir las reservas de carbono, y algunas mediciones no separaron el almacenamiento de carbono por encima y por debajo del suelo ni separaron el almacenamiento de carbono en la biomasa del almacenamiento de carbono en el suelo. El almacenamiento de carbono en el suelo, y la relación entre el carbono del suelo y el almacenamiento de biomasa, pueden indicar el potencial de los BCE para el almacenamiento de carbono.

## Referencias

1. Nellemann, C., E. Corcoran, C.M. Duarte, L. Valdés, C. De Young, L. Fonseca, and G. Grimsditch, Eds., 2009: *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. <https://www.grida.no/publications/145>
2. Macreadie, P.I., A. Anton, J.A. Raven, N. Beaumont, R.M. Connolly, D.A. Friess, J.J. Kelleway, H. Kennedy, T. Kuwae, P.S. Lavery, C.E. Lovelock, D.A. Smale, E.T. Apostolaki, T.B. Atwood, J. Baldock, T.S. Bianchi, G.L. Chmura, B.D. Eyre, J.W. Fourqurean, J.M. Hall-Spencer, M. Huxham, I.E. Hendriks, D. Krause-Jensen, D. Laffoley, T. Luisetti, N. Marbà, P. Masque, K.J. McGlathery, J.P. Megonigal, D. Murdiyarsa, B.D. Russell, R. Santos, O. Serrano, B.R. Silliman, K. Watanabe, and C.M. Duarte, 2019: The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, **10** (1), 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
3. Macreadie, P.I., M.D.P. Costa, T.B. Atwood, D.A. Friess, J.J. Kelleway, H. Kennedy, C.E. Lovelock, O. Serrano, and C.M. Duarte, 2021: Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, **2** (12), 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
4. Song, S., Y. Ding, W. Li, Y. Meng, J. Zhou, R. Gou, C. Zhang, S. Ye, N. Saintilan, K.W. Krauss, S. Crooks, S. Lv, and G. Lin, 2023: Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change. *Nature Communications*, **14** (1), 756. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36477-1>
5. Macreadie, P.I., A.I. Robertson, B. Spinks, M.P. Adams, J.M. Atchison, J. Bell-James, B.A. Bryan, L. Chu, K. Filbee-Dexter, L. Drake, C.M. Duarte, D.A. Friess, F. Gonzalez, R.Q. Grafton, K.J. Helmstedt, M. Kaebnick, J. Kelleway, G.A. Kendrick, H. Kennedy, C.E. Lovelock, J.P. Megonigal, D.T. Maher, E. Pidgeon, A.A. Rogers, R. Sturgiss, S.M. Trevathan-Tackett, M. Wartman, K.A. Wilson, and K. Rogers, 2022: Operationalizing marketable blue carbon. *One Earth*, **5** (5), 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.005>
6. Donofrio, S., P. Maguire, W. Merry, and S. Zwick, 2019: Financing Emissions Reductions for the Future: State of the Voluntary Carbon Markets 2019. Forest Trends' Ecosystem Marketplace, Washington, DC. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2019/12/SOVCM2019.pdf>
7. Friess, D.A., J. Howard, M. Huxham, P.I. Macreadie, and F. Ross, 2022: Capitalizing on the global financial interest in blue carbon. *PLoS Climate*, **1** (8), e0000061. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000061>
8. Zeng, Y., D.A. Friess, T.V. Sarira, K. Siman, and L.P. Koh, 2021: Global potential and limits of mangrove blue carbon for climate change mitigation. *Current Biology*, **31** (8), 1737–1743. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.01.070>
9. Blume, A., A.P. Pertiwi, C.B. Lee, and D. Traganos, 2023: Bahamian seagrass extent and blue carbon accounting using Earth observation. *Frontiers in Marine Science*, **10**, 1058460. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1058460>
10. Failler, P., J. Liu, P. Lallemand, and A. March, 2023: Blue accounting approaches in the emerging African blue economy context. *Journal of Sustainability Research*, **5** (1), e230002. <https://doi.org/10.20900/jsr20230002>
11. Krause, J.R., A. Hinojosa-Corona, A.B. Gray, J.C. Herguera, J. McDonnell, M.V. Schaefer, S.C. Ying, and E.B. Watson, 2022: Beyond habitat boundaries: Organic matter cycling requires a system-wide approach for accurate blue carbon accounting. *Limnology and Oceanography*, **67** (S2), S6–S18. <https://doi.org/10.1002/lno.12071>
12. IPCC, 2014: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T., T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, B. Jamsranjav, M. Fukuda, and T. Troxler, Eds. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/>
13. Crooks, S., A.E. Sutton-Grier, T.G. Troxler, N. Herold, B. Bernal, L. Schile-Beers, and T. Wirth, 2018: Coastal wetland management as a contribution to the US National Greenhouse Gas Inventory. *Nature Climate Change*, **8** (12), 1109–1112. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0345-0>
14. Holmquist, J.R., L. Windham-Myers, B. Bernal, K.B. Byrd, S. Crooks, M.E. Gonnea, N. Herold, S.H. Knox, K.D. Kroeger, J. McCombs, J.P. Megonigal, M. Lu, J.T. Morris, A.E. Sutton-Grier, T.G. Troxler, and D.E. Weller, 2018: Uncertainty in United States coastal wetland greenhouse gas inventorying. *Environmental Research Letters*, **13** (11), 115005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae157>
15. Campbell, A.D., L. Fatoyinbo, L. Goldberg, and D. Lagomasino, 2022: Global hotspots of salt marsh change and carbon emissions. *Nature*, **612** (7941), 701–706. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05355-z>



16. Lovelock, C.E. and C.M. Duarte, 2019: Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters*, **15** (3), 20180781. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
17. Teng, Y. and D. Zhang, 2018: Long-term viability of carbon sequestration in deep-sea sediments. *Science Advances*, **4** (7), 6588. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6588>
18. Cooley, S., D. Schoeman, L. Bopp, P. Boyd, S. Donner, D.Y. Ghebrehiwet, S.-I. Ito, W. Kiessling, P. Martinetto, E. Ojea, M.-F. Racault, B. Rost, and M. Skern-Mauritzen, 2022: Ch. 3. Oceans and coastal ecosystems and their services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 379–550. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.005>
19. Quiros, T.E.A.L., K. Sudo, R.V. Ramilo, H.G. Garay, M.P.G. Soniega, A. Baloloy, A. Blanco, A. Tamondong, K. Nadaoka, and M. Nakaoka, 2021: Blue carbon ecosystem services through a vulnerability lens: Opportunities to reduce social vulnerability in fishing communities. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 671753. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671753>
20. Lefcheck, J.S., B.B. Hughes, A.J. Johnson, B.W. Pfirrmann, D.B. Rasher, A.R. Smyth, B.L. Williams, M.W. Beck, and R.J. Orth, 2019: Are coastal habitats important nurseries? A meta-analysis. *Conservation Letters*, **12** (4), e12645. <https://doi.org/10.1111/conl.12645>
21. Dickinson, G.H., S. Bejerano, T. Salvador, C. Makdisi, S. Patel, W.C. Long, K.M. Swiney, R.J. Foy, B.V. Steffel, K.E. Smith, and R.B. Aronson, 2021: Ocean acidification alters properties of the exoskeleton in adult Tanner crabs, *Chionoecetes bairdi*. *Journal of Experimental Biology*, **224** (3), 232819. <https://doi.org/10.1242/jeb.232819>
22. Ricart, A.M., M. Ward, T.M. Hill, E. Sanford, K.J. Kroeker, Y. Takeshita, S. Merolla, P. Shukla, A.T. Ninokawa, K. Elsmore, and B. Gaylord, 2021: Coast-wide evidence of low pH amelioration by seagrass ecosystems. *Global Change Biology*, **27** (11), 2580–2591. <https://doi.org/10.1111/gcb.15594>
23. Osland, M.J., B. Chivoiu, N.M. Enwright, K.M. Thorne, G.R. Guntenspergen, J.B. Grace, L.L. Dale, W. Brooks, N. Herold, J.W. Day, F.H. Sklar, and C.M. Swarzenski, 2022: Migration and transformation of coastal wetlands in response to rising seas. *Science Advances*, **8** (26), 5174. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo5174>
24. van Dobben, H.F., A.V. de Groot, and J.P. Bakker, 2022: Salt marsh accretion with and without deep soil subsidence as a proxy for sea-level rise. *Estuaries and Coasts*, **45** (6), 1562–1582. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-01034-w>
25. Wang, F., X. Lu, C.J. Sanders, and J. Tang, 2019: Tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States. *Nature Communications*, **10** (1), 5434. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13294-z>
26. Warnell, K., L. Olander, and C. Currin, 2022: Sea level rise drives carbon and habitat loss in the U.S. mid-Atlantic coastal zone. *PLOS Climate*, **1** (6), e0000044. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000044>
27. Holmquist, J.R., L.N. Brown, and G.M. MacDonald, 2021: Localized scenarios and latitudinal patterns of vertical and lateral resilience of tidal marshes to sea-level rise in the contiguous United States. *Earth's Future*, **9** (6), e2020EF001804. <https://doi.org/10.1029/2020ef001804>
28. Zhu, C., J.A. Langley, L.H. Ziska, D.R. Cahoon, and J.P. Megonigal, 2022: Accelerated sea-level rise is suppressing CO<sub>2</sub> stimulation of tidal marsh productivity: A 33-year study. *Science Advances*, **8** (20), 0054. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn0054>
29. Lovelock, C.E. and R. Reef, 2020: Variable impacts of climate change on blue carbon. *One Earth*, **3** (2), 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010>
30. Rosentreter, J.A., A.V. Borges, B.R. Deemer, M.A. Holgerson, S. Liu, C. Song, J. Melack, P.A. Raymond, C.M. Duarte, G.H. Allen, D. Olefeldt, B. Poulter, T.I. Battin, and B.D. Eyre, 2021: Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, **14** (4), 225–230. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>
31. Zou, J., A.D. Ziegler, D. Chen, G. McNicol, P. Ciais, X. Jiang, C. Zheng, J. Wu, J. Wu, Z. Lin, X. He, L.E. Brown, J. Holden, Z. Zhang, S.J. Ramchunder, A. Chen, and Z. Zeng, 2022: Rewetting global wetlands effectively reduces major greenhouse gas emissions. *Nature Geoscience*, **15** (8), 627–632. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0>

32. Nisbet, E.G., 2023: Climate feedback on methane from wetlands. *Nature Climate Change*, **13** (5), 421–422. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01634-3>
33. Zwerschke, N., C.J. Sands, A. Roman-Gonzalez, D.K.A. Barnes, A. Guzzi, S. Jenkins, C. Muñoz-Ramírez, and J. Scourse, 2022: Quantification of blue carbon pathways contributing to negative feedback on climate change following glacier retreat in West Antarctic fjords. *Global Change Biology*, **28** (1), 8–20. <https://doi.org/10.1111/gcb.15898>
34. Williamson, P. and J.-P. Gattuso, 2022: Carbon removal using coastal blue carbon ecosystems is uncertain and unreliable, with questionable climatic cost-effectiveness. *Frontiers in Climate*, **4**, 853666. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.853666>
35. Bogard, M.J., B.A. Bergamaschi, D.E. Butman, F. Anderson, S.H. Knox, and L. Windham-Myers, 2020: Hydrologic export is a major component of coastal wetland carbon budgets. *Global Biogeochemical Cycles*, **34** (8), e2019GB006430. <https://doi.org/10.1029/2019gb006430>
36. Marchand, C., F. David, A. Jacotot, A. Leopold, and X. Ouyang, 2022: Ch. 3. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from coastal wetland soils. In: *Carbon Mineralization in Coastal Wetlands*. Ouyang, X., S.Y. Lee, D.Y.F. Lai, and C. Marchand, Eds. Elsevier, 55–91. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819220-7.00006-6>
37. Ouyang, X. and S.Y. Lee, 2020: Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands. *Nature Communications*, **11** (1), 317. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14120-2>
38. Bergstrom, E., J. Silva, C. Martins, and P. Horta, 2019: Seagrass can mitigate negative ocean acidification effects on calcifying algae. *Scientific Reports*, **9** (1), 1932. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35670-3>
39. Gao, K., J. Beardall, D.-P. Häder, J.M. Hall-Spencer, G. Gao, and D.A. Hutchins, 2019: Effects of ocean acidification on marine photosynthetic organisms under the concurrent influences of warming, UV radiation, and deoxygenation. *Frontiers in Marine Science*, **6**, 322. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00322>
40. Moritsch, M.M., K.B. Byrd, M. Davis, A. Good, J.Z. Drexler, J.T. Morris, I. Woo, L. Windham-Myers, E. Grossman, G. Nakai, K.L. Poppe, and J.M. Rybczyk, 2022: Can coastal habitats rise to the challenge? Resilience of estuarine habitats, carbon accumulation, and economic value to sea-level rise in a Puget Sound estuary. *Estuaries and Coasts*, **45** (8), 2293–2309. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01087-5>
41. Morton, R.A., 2003: An Overview of Coastal Land Loss: With Emphasis on the Southeastern United States. USGS Open-File Report 03-337. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-337/>