

VARIABILIDAD TEMPORAL DEL NITRÓGENO EN HOJAS DE *Thalassia testudinum* EN EL CARIBE MEXICANO

Sánchez-González, Alberto^{1*}, Ma. Concepción Ortiz-Hernández², Dilian Noemi Anguas-Cabrera², Joan Alberto Sánchez-Sánchez²

¹Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B.C.S., México. ²El Colegio de la Frontera Sur – Unidad Chetumal, Chetumal, Quintana Roo, México. *Autor de correspondencia: alsanchezg@ipn.mx

RESUMEN. El nitrógeno es un nutriente esencial y limitante para los productores primarios marinos, bajo un delicado balance en ambientes oligotróficos i.e. Caribe mexicano. El desarrollo turístico y urbano del Caribe mexicano y, ahora, los arribazones masivos de sargazo pelágico, se identifican como fuentes de nitrógeno que pueden alterar las condiciones oligotróficas de las lagunas arrecifales del Caribe mexicano. El objetivo del presente trabajo fue cuantificar el contenido de nitrógeno elemental en las hojas del pasto de tortuga *Thalassia testudinum* bajo un escenario de diversas fuentes de nitrógeno para determinar la posible contribución de estas fuentes al pasto de tortuga en el periodo de 1991 a 2019 en Puerto Morelos, Quintana Roo. El contenido promedio de nitrógeno fue $1.84 \pm 0.22\%$ con mínimo de 1.71% y máximo de 2.20%. Este valor fue muy similar al intervalo establecido para otras lagunas costeras donde está presente este pasto marino. En el periodo de 1991 a 2019, las hojas de *T. testudinum* no mostraron evidencia de enriquecimiento de nitrógeno, excepto para el periodo de 2014 a 2016, bajo un escenario de arribazón de sargazo pelágico o por intenso pastoreo de las tortugas marinas. El contenido de nitrógeno estuvo en el límite de nitrógeno para su crecimiento, durante el arribazón masivo de sargazo del 2018 al 2019, lo cual supone estrés para el pasto marino bajo una mala calidad del ambiente marino.

Palabras claves: Pasto marino, Puerto Morelos, sargazo pelágico, arribazones.

Temporal variability of nitrogen in leaves of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean

ABSTRACT. Nitrogen is an essential and limiting nutrient for marine primary producers under a delicate balance in oligotrophic environments, i.e., the Mexican Caribbean. The tourist and urban development of the Mexican Caribbean and now the massive arrivals of pelagic *Sargassum* are identified as nitrogen sources that can alter the oligotrophic conditions of the reef lagoons of the Mexican Caribbean. The objective of the present work was to quantify the elemental nitrogen content in the leaves of turtle grass *Thalassia testudinum* under a scenario of diverse nitrogen sources to determine the possible contribution of these sources to turtle grass in the period from 1991 to 2019 in Puerto Morelos, Quintana Roo. The average nitrogen content was $1.84 \pm 0.22\%$, with a minimum of 1.71% and a maximum of 2.20%. This value was similar to the range established for other coastal lagoons with this seagrass. From 1991 to 2019, the leaves of *T. testudinum* showed no evidence of nitrogen enrichment, except from 2014 to 2016, under a scenario of pelagic sargassum influx or intense grazing by sea turtles. Nitrogen content was within the nitrogen limit for growth during the massive *Sargassum* influx from 2018 to 2019, implying stress to the seagrass in a poor-quality marine environment.

Keywords: Seagrass, Puerto Morelos, pelagic *Sargassum*, influx.

Sánchez-González, A., Ortiz-Hernández, M. C., Anguas-Cabrera, D. N., Sánchez-Sánchez, J. A. (2023). Variabilidad temporal del nitrógeno en hojas de *Thalassia testudinum* en el Caribe mexicano. *CICIMAR Océánides*, 38 (2): 33-39.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno es considerado un elemento esencial y limitante para los productores primarios en el ambiente marino (Duarte, 1990; Fourqurean *et al.*, 2015). En regiones tropicales, como el Caribe Mexicano, la condición de oligotrofia de la columna de agua ha favorecido el establecimiento de praderas de pastos marinos (van Tussenbroek *et al.*, 2014; Fourqurean *et al.*, 2023). En el Caribe mexicano, el pasto de tortuga *Thalassia testudinum* Bank ex König, 1805, es la especie más abundante y dominante (de Almeida *et al.*, 2022). Las praderas del pasto de tortuga *T. testudinum* incorporan el Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) del agua intersticial a través de sus raíces y de la columna de agua por las hojas (Viana *et al.*, 2019) a una misma tasa (Lee & Dunton, 1999). El NID de las raíces es translocado a las hojas (Viana *et al.*, 2019), por lo que contribuye con nitrógeno, pero en menor medida que la columna de agua a través de las hojas *T. testudinum* (Sánchez *et al.*, 2013).

La naturaleza oligotrófica de un ambiente marino es producto de la baja concentración de NID $< 1 \mu\text{M}$ (Lapointe, 1997). Sin embargo, la condición oligotrófica del Caribe mexicano se ha ido perdiendo en las últimas décadas, debido a la presión antropogénica asociada principalmente con el desarrollo turístico y el crecimiento poblacional de la región que demandan cada vez más bienes y servicios (Guimaraes *et al.*, 2021). En algunas regiones costeras del Caribe mexicano, la concentración del NID es $> 1 \mu\text{M}$, sobrepasando con mucho la naturaleza oligotrófica de las praderas de *T. testudinum* (Camacho-Cruz *et al.*, 2020; Velázquez-Ochoa and Enríquez, 2023). Las únicas fuentes de NID son la fijación de nitrógeno y las descargas de aguas residuales domésticas y turísticas, siendo esta última fuente la responsable del incremento de NID (Sánchez *et al.*, 2020).

A partir de 2014, el arribazón de sargazo pelágico y sus lixiviados al Caribe Mexicano se han convertido en una nueva fuente de nitrógeno disponible para

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2023

Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2023



las praderas de pastos marinos, incluyendo a *T. testudinum* (Sánchez *et al.*, 2023). El pasto de tortuga *T. testudinum* asimila con mayor afinidad el amonio con respecto al nitrato, debido a que, este nutriente se incorpora fácilmente y absorbe pasivamente a los aminoácidos. La reducción y asimilación del nitrato requiere mayor costo energético (Lee & Dunton, 1999; McGlathery, 2008; Viana *et al.*, 2019).

Si bien, la incorporación de nitrógeno por las diversas fuentes (fijación de nitrógeno, descarga de aguas residuales y lixiviados del sargazo pelágico) ha sido evidenciada por el cambio en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en las hojas de *T. testudinum* (Sánchez *et al.*, 2023), aún se desconoce si el contenido de nitrógeno elemental, en las hojas del pasto de tortuga, ha incrementado de manera significativa debido a la disponibilidad de nitrógeno de los lixiviados del sargazo pelágico en el Caribe Mexicano. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es cuantificar el contenido de nitrógeno elemental en hojas de *T. testudinum* bajo un escenario sin y con presencia de sargazo pelágico con la finalidad de determinar la posible contribución de esta fuente de nitrógeno al pasto de tortuga sobre un periodo de tiempo discreto de 1991 a 2019 en la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo.

Área de estudio

La laguna arrecifal de Puerto Morelos es considerada un sitio con bajo desarrollo turístico dentro del Caribe Mexicano (Sánchez *et al.*, 2013). La velocidad de la corriente es $<3 \text{ cm s}^{-1}$ en el interior con una máxima de 20 cm s^{-1} en la boca de la laguna arrecifal. La micromarea de 40 cm dominante es semidiurna con una altura significativa de ola de $0.8 \pm 0.4 \text{ m}$ frente al arrecife. El tiempo de residencia es de 3 h con una drástica reducción a 0.35 h durante el paso de tormentas tropicales (Coronado *et al.*, 2007).

La laguna es uno de los sitios que ha sido afectada continuamente por los arribazones masivos de sargazo desde 2014 a 2020 (Uribe-Martínez *et al.*, 2022). La biomasa de sargazo pelágico que arribó a la laguna ha sido muy variable con valores máximos entre julio y octubre de 2018 con respecto a otros años (Chávez *et al.*, 2020). La concentración del nitrato y amonio denotaron valores contrastantes entre el periodo previo al arribazón del sargazo pelágico y durante el máximo arribo en 2018. En febrero y mayo, la concentración de nitrato fue $6.60 \pm 1.06 \mu\text{M}$ y $2.84 \pm 0.21 \mu\text{M}$ y para amonio de $2.27 \pm 0.34 \mu\text{M}$ y $1.05 \pm 0.06 \mu\text{M}$, respectivamente (Pérez-Gómez *et al.*, 2020). Mientras que, la concentración de nitrato y amonio fue $0.54 \pm 0.34 \mu\text{M}$ y $0.61 \pm 0.06 \mu\text{M}$, respectivamente, para septiembre de 2018 (Vázquez-Delfín *et al.*, 2021). Los valores de nitrato y amonio de septiembre de 2018 fueron muy similares a la concentración de NID de $1.61 \pm 0.89 \mu\text{M}$ de 2002 (Carruthers *et al.*, 2005).

MATERIAL Y MÉTODOS

El pasto marino *T. testudinum* fue recolectado en dos localidades de la laguna arrecifal de Puerto Morelos (Fig. 1), sitio considerado como de bajo desarrollo turístico (Sánchez *et al.*, 2013). La recolecta de las hojas de *T. testudinum* se llevó a cabo mediante buceo libre con ayuda de un tubo de PVC en el periodo de 2010 a 2019. Las hojas fueron lavadas con agua dulce para eliminar el exceso de sales y sedimento, así mismo, los elementos epífitos fueron eliminados haciendo uso del tallado con los dedos de la mano, para finalmente enjuagar con agua destilada. Las hojas fueron secadas en un horno a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y se homogeneizaron con un mortero de ágata. De cada muestra se pesaron dos submuestras de 1 mg para su análisis elemental de nitrógeno mediante un analizador elemental COSTECH 4010 del Laboratorio de Espectrometría de Masas (LEsMa) en el Centro Interdisci-

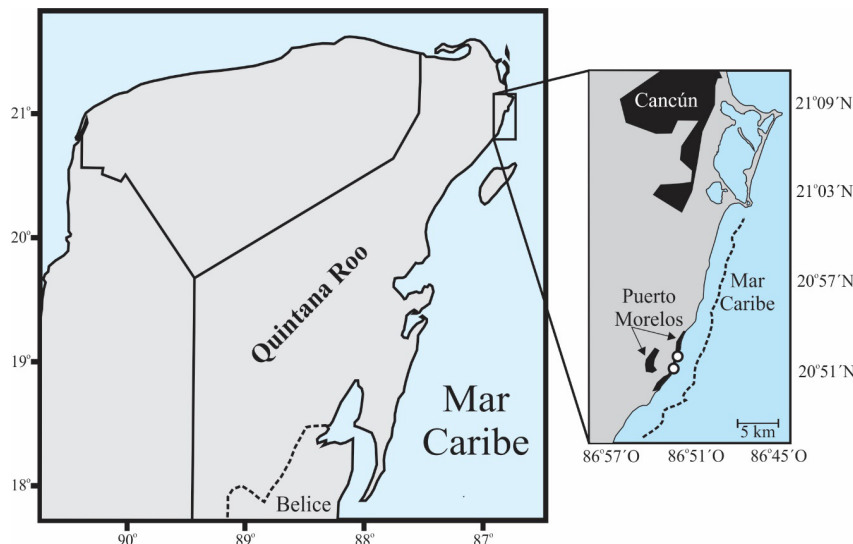


Figura 1. Localización del área de estudio en el Caribe Mexicano. Los círculos blancos denotan la localización de los sitios de recolecta de las hojas del pasto de tortuga *T. testudinum*. Las flechas indican los sitios de población de Puerto Morelos. La línea segmentada representa la posición aproximada de un segmento del arrecife de coral Mesoamericano.

plinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional. El porcentaje de recuperación de nitrógeno elemental fue <99.5%, estimado de 48 réplicas de estándares certificados BBOT-NIST (6.51%) y Urea-NIST (46.62%).

Adicionalmente se recabaron datos de los contenidos de nitrógeno elemental de las hojas de *T. testudinum* con la finalidad de contrastar la variabilidad de este elemento entre años (Gallegos *et al.* 1993, Carruthers *et al.* 2005, Molina-Hernández & van Tussenbroek 2014, van Tussenbroek *et al.* 2017, González-de Zayas *et al.* 2020, Pérez-Gómez *et al.* 2020, Velázquez-Ochoa & Enríquez 2023).

Los análisis estadísticos consistieron en estadística básica como el cálculo de valores promedio y desviación estándar de las muestras en el presente estudio y de las recabadas de la literatura. Para ello se usó el programa de cómputo MS Excel®.

RESULTADOS

El contenido de nitrógeno elemental en las hojas de *T. testudinum* tuvo un valor promedio de $1.84 \pm 0.22\%$ con mínimo de 1.71% y máximo de 2.20%. Para los otros estudios de la laguna, el valor promedio fue $1.89 \pm 0.24\%$ con mínimo de 1.55% y máximo de 2.60%. Aunque los datos obtenidos de la literatura no corresponden a la localización geográfica de nuestros datos, si pertenecen a recolectas dentro de el mismo sector de la laguna costera de Puerto Morelos.

De los datos obtenidos de la literatura, en el año de 1991, el contenido de nitrógeno tuvo valor promedio cercano a 2%. El contenido de nitrógeno elemental mostró una gran variabilidad en el contenido de nitrógeno con valores menores o cercanos al 2% para el año de 2002. En el año de 2010, el contenido de nitrógeno fue menor al 2%, lo mismo ocurrió para los años de 2011, 2012 y 2013. En el periodo de 2014 y 2015, los contenidos de nitrógeno estuvieron por

encima del 2%. Mientras que, en el año de 2016 se obtuvo el valor máximo y la mayor variabilidad en el contenido de nitrógeno. En los años de 2018 y 2019, los contenidos de nitrógeno estuvieron por debajo o cercanos al 2% (Fig. 2).

Los valores de nitrógeno promedio para cada año, representado por el símbolo X en la figura 2, denotaron ser cercanos o por debajo de 2% para los años de 1991, 2002, de 2010 a 2013 y de 2018 a 2019. Mientras que, el contenido fue >2% de 2014 a 2016.

DISCUSIÓN

Las praderas de pastos marinos en el Caribe mexicano juegan un rol muy importante en el ecosistema de las lagunas arrecifales. De hecho, *T. testudinum* es conocido como el pasto de tortuga, por ser el alimento principal de las tortugas marinas juveniles que residen en el Caribe mexicano (Guimaraes *et al.*, 2021; Sánchez *et al.*, 2023).

El contenido de nitrógeno global de *T. testudinum* ha sido establecido en $1.92 \pm 0.05\%$, sin influencia de actividad antropogénica (Duarte, 1990). En el presente estudio, el valor promedio fue $1.84 \pm 0.22\%$ y el valor de otros estudios fue $1.89 \pm 0.24\%$. Estos valores son muy cercanos a los establecidos previamente por Duarte (1990). Recientemente, el contenido de nitrógeno elemental para *T. testudinum* varió de 1.21% a 4.36% con un promedio de $2.23 \pm 0.63\%$ para varias localidades del Caribe. En las lagunas costeras de Corpus Christi y Galveston en Estados Unidos y en Bermuda, el valor promedio de nitrógeno excedió el 3% con máximos de 4.36% (Fourqurean *et al.*, 2023).

El nitrógeno, al igual que el fósforo, es un nutriente limitante para muchos productores primarios y en este sentido, las plantas con contenidos <1.8% para nitrógeno y <0.20% para fósforo estarían fuertemente limitadas (Duarte, 1990). De manera general, el pasto de tortuga *T. testudinum* no presentó limitación de nitrógeno, excepto los años 2012 y 2013,

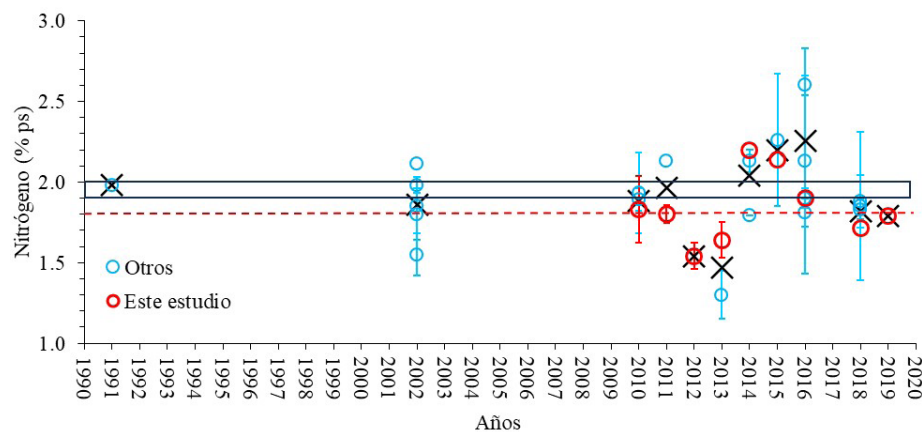


Figura 2. Contenido de nitrógeno elemental (ps, peso seco) en hojas de *T. testudinum*, en el periodo de 1991 a 2019, para la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo. Los círculos rojos son las muestras recolectadas en este estudio ($n = 2$ a 6) y los círculos azules para otros estudios. El símbolo X presenta el promedio de todos los datos de cada año. El rectángulo representa el valor promedio del contenido de nitrógeno para *T. testudinum* a nivel global y la línea segmentada representa el valor limitante del nitrógeno (Duarte, 1990).

en los que se observó el valor de nitrógeno menor al valor limitante. Para entender la dinámica de la incorporación de nitrógeno elemental en *T. testudinum* se han llevado a cabo experimentos de enriquecimiento de nitrógeno (Lee & Dunton, 1999) y de pastoreo por tortugas verdes (Martínez-López *et al.*, 2019).

En el experimento de enriquecimiento de nitrógeno se observó que en las hojas del pasto de tortuga tuvieron mayor contenido de nitrógeno bajo condiciones de escasez de nutrientes nitrogenados, mientras que, aquellas hojas con menor contenido de nitrógeno ocurrieron cuando la concentración de nutrientes fue suficiente o enriquecida para el crecimiento de las hojas de *T. testudinum* (Duarte 1990; Lee & Dunton, 1999). Por lo tanto, el bajo contenido de nitrógeno elemental en *T. testudinum* supondría un fuerte enriquecimiento de nutrientes nitrogenados para el periodo de 2012 y 2013. De hecho, el arribazón masivo de sargazo pelágico ocurrida durante 2018 y la liberación de grandes cantidades de nutrientes derivadas de los lixiviados, pudo contribuir a que el contenido de nitrógeno estuviera muy cercano o por debajo de la concentración limitante (Duarte, 1990). Sin embargo, el contenido de nitrógeno fue mayor en las hojas de *T. testudinum* cuando los lixiviados del sargazo pelágico incrementaron la concentración de nutrientes nitrogenados en el periodo de 2014 a 2016 (van Tussenbroek *et al.*, 2017; Vázquez-Delfín *et al.*, 2021). Bajo el supuesto de que los altos contenidos de nitrógeno en las hojas de *T. testudinum* reflejaron condiciones óptimas de la concentración de nutrientes nitrogenados incorporados en su tejido en el periodo de 2014 a 2016. Mientras que, el exceso de nutrientes condujo a la limitación de nitrógeno y menor incorporación en el tejido de las hojas.

El pastoreo de las tortugas marinas sobre las hojas de *T. testudinum* es otro factor que modifica su contenido del nitrógeno (Molina-Hernández & van Tussenbroek, 2014; Martínez-López *et al.*, 2019). Las praderas de *T. testudinum* que han sido expuestas al pastoreo por parte de las tortugas marinas tienen mayor contenido de nitrógeno con respecto a las parcelas no pastoreadas (Molina-Hernández & van Tussenbroek, 2014). En este sentido, el pastoreo continuo favorece que las hojas recientes incorporen más eficientemente el nitrógeno y el fósforo que las hojas maduras, y no la limitación de nutrientes disueltos como se ha sugerido en la literatura (Fourqurean *et al.*, 2010). De esta forma, el pastoreo aumenta la calidad nutricional de las hojas de *T. testudinum* (Martínez-López *et al.*, 2019). Si este fuese el caso, el incremento en el contenido de nitrógeno en el periodo de 2014 a 2016 puede sugerir que las praderas del pasto de tortuga estuvieron siendo eficientemente pastoreadas. De hecho, el pastoreo de las tortugas sobre los pastos marinos de Puerto Morelos ha sido demostrado para el periodo de 2015 a 2016 por Martínez-López *et al.* (2019), lo que sería una explicación adicional al enriquecimiento de nitrógeno. En este sentido, ambos procesos: a) la concentración de nutrientes en la columna de agua y su

limitación, y b) el pastoreo por parte de las tortugas marinas, son responsables del enriquecimiento observado en el pasto de tortuga.

Finalmente, el contenido de nitrógeno de las hojas de *T. testudinum* estuvo muy cercano al límite de nitrógeno para su crecimiento (Duarte, 1990) durante el arribazón masivo de sargazo pelágico de 2018. Es probable que el bajo contenido de nitrógeno pueda ser explicado por la presencia de hojas seniles (Fourqurean *et al.*, 2010). La masa de sargazo pelágico alcanzó su pico máximo de $\sim 15000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el 2018 y 2019 (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2022), lo que contrasta con el máximo de $2500 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el 2015 (van Tussenbroek *et al.*, 2017). El exceso de nutrientes, la reducida transparencia del agua y el decaimiento de oxígeno disuelto pudo ocasionar que las hojas de *T. testudinum* no incorporaran más nitrógeno por estrés ambiental. El decaimiento de oxígeno disuelto puede ocasionar la pérdida de amonio y nitrato de la columna de agua por procesos de desnitrificación (Sigman *et al.*, 2005). Por lo tanto, la menor disponibilidad de estos nutrientes limitaría la fijación y el contenido de nitrógeno en las hojas del pasto marino. Mientras que, la reducción de transparencia de la columna de agua i.e. turbidez ocasionó un incremento el contenido de nitrógeno en las hojas de *T. testudinum* en la Bahía de Florida (su Fig. 4 en Krause *et al.*, 2022). Este proceso puede ser aplicado para el periodo de 2014 a 2016. Lo que contrasta con el año de 2018 y 2019, el contenido de nitrógeno presupone una limitación de este elemento. Por lo que es necesario realizar estudios sobre esta temática. Por lo tanto, no hay evidencia que demuestre que el pasto de tortuga incorpore el exceso de nutrientes nitrogenados de los lixiviados del sargazo pelágico.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional a través de los proyectos SIP20210421 y SIP20220735. Se agradece a los revisores anónimos por los comentarios y sugerencias al presente trabajo.

REFERENCIAS

- Camacho-Cruz, K. A., Ortiz-Hernández, M. C., Sánchez, A., Carrillo, L., & De Jesús Navarrete, A. (2020). Water quality in the eastern karst region of the Yucatan Peninsula: nutrients and stable nitrogen isotopes in turtle grass, *Thalassia testudinum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 15967-15983. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04757-3>.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L.B., Monroy-Velázquez, L.V., Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic *Sargassum* spp. on the coasts of the Mexican Caribbean.

- bean 2014–2020: Challenges and opportunities. *Water*, 12(10), 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>.
- Carruthers, T. J. B., Van Tussenbroek, B. I., & Dennison, W. C. (2005). Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2-3), 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.01.015>.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M., & Ocampo-Torres, F. J. (2007). On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26, 149-163. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0175-9>.
- de Almeida, L. R., Ávila-Mosqueda, S. V., Silva, R., Mendoza, E., & van Tussenbroek, B. I. (2022). Mapping the structure of mixed seagrass meadows in the Mexican Caribbean. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1063007. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1063007>
- Duarte, C. M. (1990). Seagrass nutrient content. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 6(2), 201-207. <https://doi.org/10.3354/meps067201>
- Fourqurean, J. W., Manuel, S., Coates, K. A., Kenworthy, W. J., & Smith, S. R. (2010). Effects of excluding sea turtle herbivores from a seagrass bed: overgrazing may have led to loss of seagrass meadows in Bermuda. *Marine Ecology Progress Series*, 419, 223-232. <https://doi.org/10.3354/meps08853>
- Fourqurean, J. W., Manuel, S. A., Coates, K. A., Kenworthy, W. J., & Boyer, J. N. (2015). Water quality, isoscapes and stoichioscapes of seagrasses indicate general P limitation and unique N cycling in shallow water benthos of Bermuda. *Biogeosciences*, 12(20), 6235-6249. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6235-2015>
- Fourqurean, J. W., Campbell, J. E., Rhoades, O. K., Munson, C. J., Krause, J. R., Altieri, A. H., Douglass, J.G., Heck Jr., K.L., Paul, V.J., Armitage, A.R., Barry, S.C., Bethel, E., Christ, L., Christianen, M.J.A., Dodillet, G., Dutton, K., Frazer, T.K., Gaffey, B.M., Glazner, R., Goeke, J.A., Grana-Valdes, R., Kramer, O.A.A., Linhardt, S.T., Martin, C.W., Martínez- López, G.I., McDonald, A.M., Main, V.A., Manuel, S.A., Marco-Méndez, C., O'Brien, D.A., O'Shea, O., Patrick, C.J., Peabody, C., Reynolds, L.K., Rodriguez, A., Rodriguez-Bravo, L.M., Sang, A., Sawall, Y., Smulders, F.O.H., Thompson, J.E., van Tussenbroek, B., Wied, W.L., & Wilson, S. S. (2023). Seagrass Abundance Predicts Surficial Soil Organic Carbon Stocks Across the Range of *Thalassia testudinum* in the Western North Atlantic. *Estuaries and Coasts*, 46, 1280–1301. <https://doi.org/10.1007/s12237-023-01210-0>
- Gallegos, M. E., Merino, M., Marbá, N., & Duarte, C. M. (1993). Biomass and dynamics of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: elucidating rhizome growth. *Marine Ecology Progress Series*, 185-192. <https://doi.org/10.3354/meps095185>
- González-De Zayas, R., Rossi, S., Hernández-Fernández, L., Velázquez-Ochoa, R., Soares, M., Merino-Ibarra, M., Castillo-Sandoval, F.S., & Soto-Jiménez, M. F. (2020). Stable isotopes used to assess pollution impacts on coastal and marine ecosystems of Cuba and México. *Regional Studies in Marine Science*, 39, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101413>
- Guimaraes, M., Zúñiga-Ríos, A., Cruz-Ramírez, C. J., Chávez, V., Odériz, I., van Tussenbroek, B. I., & Silva, R. (2021). The conservational state of coastal ecosystems on the Mexican Caribbean coast: Environmental guidelines for their management. *Sustainability*, 13(5), 2738. <https://doi.org/10.3390/su13052738>
- Krause, J. R., Lopes, C. C., Wilson, S. S., Boyer, J. N., Briceno, H. O., Fourqurean, J. W. (2023). Status and trajectories of soft-bottom benthic communities of the South Florida seascape revealed by 25 years of seagrass and water quality monitoring. *Estuaries and Coasts*, 46(2), 477-493. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01158-7>
- Lapointe, B. E. (1997). Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnology and Oceanography*, 42(5part2), 1119-1131. https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1119
- Lee, K. S., & Dunton, K. H. (1999). Inorganic nitrogen acquisition in the seagrass *Thalassia testudinum*: Development of a whole-plant nitrogen budget. *Limnology and Oceanography*, 44(5), 1204-1215. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.5.1204>
- Martínez-López, I. G., van Den Akker, M., Walk, L., van Katwijk, M. M., van Der Heide, T., & van Tussenbroek, B. I. (2019). Nutrient availability induces community shifts in seagrass meadows grazed by turtles. *PeerJ*, 7, e7570. <https://doi.org/10.7717/peerj.7570>
- McGlathery, K.J. (2008). Nitrogen cycling in seagrass meadows. In: *Nitrogen Cycling in the Marine Environment*, 2nd ed. Elsevier Inc., Burlington, pp. 1037–1060.
- Molina-Hernández, A. L., & van Tussenbroek, B. I. (2014). Patch dynamics and species shifts in seagrass communities under moderate and high grazing pressure by green sea turtles. *Marine Ecology*

- logy Progress Series, 517, 143-157. <https://doi.org/10.3354/meps11068>
- Pérez-Gómez, J. A., García-Mendoza, E., Olivos-Ortiz, A., Paytan, A., Rebolledo-Vieyra, M., Delgado-Pech, B., & Almazán-Becerril, A. (2020). Indicators of nutrient enrichment in coastal ecosystems of the northern Mexican Caribbean. *Ecological Indicators*, 118, 106756. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106756>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Dahlgren, E., & Hu, C. (2022). Spatio-temporal variability of pelagic *Sargassum* landings on the northern Mexican Caribbean. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>
- Sánchez, A., Ortiz-Hernández, M. C., Talavera-Sáenz, A., & Aguiñiga-García, S. (2013). Stable nitrogen isotopes in the turtle grass *Thalassia testudinum* from the Mexican Caribbean: Implications of anthropogenic development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 135, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.01.021>
- Sánchez, A., Anguas-Cabrera, D., Camacho-Cruz, K., Ortiz-Hernández, M. C., & Aguiñiga-García, S. (2020). Spatial and temporal variation of the $\delta^{15}\text{N}$ in *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean (2009–2017). *Marine and Freshwater Research*, 71(8), 905-912. <https://doi.org/10.1071/mf19105>
- Sánchez, A., Gonzalez-Jones, P., Camacho-Cruz, K. A., Anguas-Cabrera, D., Ortiz-Hernández, M. C., & Rey-Villiers, N. (2023). Influence of pelagic *Sargassum* influxes on the $\delta^{15}\text{N}$ in *Thalassia testudinum* of the Mexican Caribbean coastal ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115091. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115091>
- Sigman, D. M., Granger, J., DiFiore, P. J., Lehmann, M. M., Ho, R., Cane, G., van Geen, A. (2005). Coupled nitrogen and oxygen isotope measurements of nitrate along the eastern North Pacific margin. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4). <https://doi.org/10.1029/2005GB002458>
- Uribe-Martínez, A., Berriel-Bueno, D., Chávez, V., Cuevas, E., Almeida, K. L., Fontes, J. V., van Tussenbroek, B.I., Mariño-Tapia, I., Liceaga-Correa, M.A., Ojeda, E., Castañeda-Ramírez, D.J., & Silva, R. (2022). Multiscale distribution patterns of pelagic rafts of sargasso (*Sargassum* spp.) in the Mexican Caribbean (2014–2020). *Frontiers in Marine Science*, 9, 920339. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920339>
- van Tussenbroek, B. I., Cortés, J., Collin, R., Fonseca, A. C., Gayle, P. M., Guzmán, H. M., Jácome, G.E., Juman, R., Koltés, K.H., Oxenford, H.A., Rodríguez-Ramírez, A., Samper-Villarreal, J., Smith, S.R., Tschirky, J.J., & Weil, E. (2014). Caribbean-wide, long-term study of seagrass beds reveals local variations, shifts in community structure and occasional collapse. *PloS one*, 9(3), e90600. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090600>
- van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M.G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Salazar-Garibay, A., Serviere-Zaragoza, E., Méndez-Rodríguez, L. C., & Robledo, D. (2021). Species composition and chemical characterization of *Sargassum* influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *Science of the Total Environment*, 795, 148852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148852>
- Velázquez-Ochoa, R., & Enríquez, S. (2023). Environmental degradation of the Mexican Caribbean reef lagoons. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114947. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114947>
- Viana, I. G., Saavedra-Hortúa, D. A., Mtolera, M., & Teichberg, M. (2019). Different strategies of nitrogen acquisition in two tropical seagrasses under nitrogen enrichment. *New Phytologist*, 223(3), 1217-1229. <https://doi.org/10.1111/nph.15885>

Copyright (c) 2023 Alberto Sánchez-González, Ma. Concepción Ortiz-Hernández, Dilian Noemi Anguas-Cabrera,
Joan Alberto Sánchez-Sánchez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato- y Adaptar el documento- remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)