

Crecimiento y Biomasa Acumulada en Plantas Estabilizadoras de Duna Costera Biofertilizadas con Fosfonat® Growth and Accumulated Biomass in Coastal Dune Stabilizing Plants Biofertilized with Fosfonat®

Rodrigo Alejandro Borges-Escalante¹ , René Efraín Canché-Solís² ,
Benito Bernardo Dzib-Castillo¹ , Juan Carlos Camacho-Chab³ y
Gustavo Enrique Mendoza-Arroyo¹

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chiná. Departamento de Ciencias Básicas. Calle 11 S/N entre 22 y 28, Colonia Cementerio. 24520 Chiná, Campeche, México; (R.A.B.E.), (G.E.M.A.), (B.B.D.C.).

² Corresponding author: gustavo.ma@china.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Campeche. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Carretera Campeche-Escárcega km 9. Col. Kila. 24500 Lerma, Campeche, México; (R.E.C.S.).

⁴ Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología. Av. Agustín Melgar s/n entre Juan de la Barrera y Calle 20, Col. Buenavista. 24039 San Francisco de Campeche, Campeche, México; (J.C.C.C.).

RESUMEN

Las dunas costeras son ecosistemas dinámicos y vulnerables a la erosión e invasión de especies, para su conservación es necesario implementar estrategias para recuperar la vegetación nativa y rehabilitar el funcionamiento de las áreas degradadas. Se evaluó el crecimiento y acumulación de biomasa en *Scaevola plumieri* y *Sophora tomentosa* especies nativas de la duna costera. Se estableció un experimento en vivero forestal con dos tratamientos (Consortio, microorganismos benéficos Fosfonat® y Control). Durante 90 días, cada 15 días (seis mediciones) se midieron y compararon entre tratamientos la longitud del tallo, número de hojas y al final del experimento, la biomasa aérea y subterránea. El número de hojas fue diferente entre tratamientos a partir de los 45 días de emergencia de las plántulas. Mientras que la longitud del tallo de *S. plumieri* difiere a lo largo del experimento y en *S. tomentosa* difiere significativamente a partir de los 45 días de la duración del experimento. La biomasa acumulada en hojas y raíces fue superior en las plántulas de ambas especies inoculadas con el Consortio. Asimismo, en dicho tratamiento se encontraron diferencias en la longitud de las raíces en ambas especies. Los resultados sugieren que la aplicación de microorganismos benéficos en la producción de plantas estabilizadoras de la duna costera puede contribuir a mejorar el éxito de los programas de revegetación y restauración ecológica en ambientes con condiciones limitantes para el establecimiento de plantas como son los suelos de las dunas costeras.

Palabras clave: consorcio, inóculo, restauración, revegetación.

SUMMARY

Coastal dunes are dynamic ecosystems and vulnerable to erosion and invasion of species. For their conservation, it is necessary to implement strategies to recover native vegetation and rehabilitate the functioning of degraded areas. The growth and accumulation of biomass in *Scaevola plumieri* and *Sophora tomentosa* species native to the coastal dune were evaluated. An experiment was established in a forest nursery with two treatments (Consortium, beneficial microorganisms Fosfonat® and Control). For 90 days, every 15 days (six measurements), stem length, number of leaves, and at the end of the experiment, above-ground and underground biomass



check for
updates

Cita recomendada:

Borges-Escalante, R. A., Canché-Solís, R. E., Dzib-Castillo, B. B., Camacho-Chab, J. C., & Mendoza-Arroyo, G. E. (2025). Crecimiento y Biomasa Acumulada en Plantas Estabilizadoras de Duna Costera Biofertilizadas con Fosfonat®. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-9. e2041. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2041>

Recibido: 13 de agosto de 2024.
Aceptado: 17 de febrero de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Agosto de 2025.

Editor de Sección:
Dra. Circe Aidín Aburto-González

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

were measured and compared between treatments. The number of leaves was different between treatments after 45 days of seedling emergence. While the stem length of *S. plumieri* differs throughout the experiment and in *S. tomentosa* it differs significantly after 45 days of the experiment duration. The biomass accumulated in leaves and roots was higher in the seedlings of both species inoculated with the Consortium. Likewise, in this treatment, differences were found in the length of the roots in both species. The results suggest that the application of beneficial microorganisms in the production of coastal dune stabilizing plants can contribute to improving the success of revegetation and ecological restoration programs in environments with limiting conditions for the establishment of plants such as dune soils coastal.

Index words: consortium, inoculum, restoration, revegetation.

INTRODUCCIÓN

Las dunas costeras se caracterizan por su riqueza de especies y servicios ambientales que proveen (Guadarrama *et al.*, 2014; Jiménez-Orocio, Espejel y Martínez, 2015; Mendoza-González *et al.*, 2021). La dinámica de formación en las dunas se relaciona estrechamente con la erosión eólica y generalmente no presentan evidencias de erosión hídrica (Bolaños-González *et al.*, 2016). Sin embargo, las actividades productivas, recreativas, provisión de servicios y de infraestructura, que ahí se desarrollan, paulatinamente han modificado su estructura y función (Monzón-Bruguera, 2009; Ortega-Rubio, Muñoz, Rivera y Azuz, 2011; García-Dueñas, Castellanos y Miranda, 2023). En México, se carece de una política ambiental de gestión o protección específica, de dicho ambiente lo que ha propiciado la alteración de su capacidad de resiliencia (Quiroz-Villanueva, Cervantes, Olivos y Martínez, 2022; Hernández, Villanueva, Coego, Bao y Sáez, 2023). A su vez, los fenómenos naturales como los ciclones tropicales y el aumento del nivel del mar (Cid-Salinas *et al.*, 2013; Soto, 2018), cambio climático (Ovando-Hidalgo, Tun, Mendoza y Parra, 2020) y la presencia de especies invasoras, como por ejemplo: *Scaevola taccada* (Castillo-Campos *et al.*, 2022) y *Cassitha filiformis* (Parra-Tabla, Tun, García y Martínez, 2024) son elementos que amenazan con desaparecer la vegetación de las dunas costeras.

Las especies que conforman la vegetación de dunas costeras son capaces de tolerar condiciones limitantes; ya sea, altos niveles de salinidad y temperatura del suelo, bajas concentraciones de materia orgánica, baja disponibilidad de agua, las cuales limitan su sucesión y disminuyen su diversidad (Mendoza-González *et al.*, 2022). Mientras que las estructuras subterráneas de la vegetación contribuyen a la reducción de la erosión que afecta las dunas (Bryant, Bryant, Sharp, Bell y Moore, 2019; Figlus, Sigren, Feagin y Armitage, 2022). En los suelos de las dunas costeras predomina los hongos formadores de micorrizas principalmente del género *Glomus* (Wang *et al.*, 2021; Hanlon, 2021; Tenzin, Noirungsee, Runsaeng, Noppradit y Klinnawee, 2022; Greipsson, Stover, Whitney y McElroy, 2024).

La vegetación tienen la capacidad de establecer asociaciones con dichos microorganismos, realzando la resistencia al estrés hídrico, mejoran la adquisición de nutrimentos y brindan protección contra enfermedades, lo que incrementa su supervivencia y establecimiento (Guadarrama-Chávez, Sánchez, Álvarez y Ramos, 2004; Carmona-Escalante, Guadarrama, Ramos, Castillo y Montaña, 2013; Ramos-Zapata, Zapata, Ortiz y Guadarrama, 2011; González-González, Torres, Ortega y Gómez, 2016) y la adquisición de biomasa subterránea (Dong, Hu, Alamusa, Ma y Liu, 2023). En este sentido, es reconocido que la biomasa aérea y subterránea (raíces y tallos enterrados) contribuyen a reducir la erosión (Feagin *et al.*, 2019; De Battisti y Griffin, 2020).

Existe evidencia que señalan las ventajas de emplear la interacción micorrizal en planes de recuperación de sistemas dunares costeros, favoreciendo la adquisición de nutrimentos del suelo, optimización de la capacidad de resistencia al estrés y la defensa contra patógenos (Guadarrama y Ramos, 2020; Carrillo-Saucedo, Puente, Montes y Cruz, 2022; Mendoza-González *et al.*, 2022; Farrer, Van Bael, Clay y Smith, 2022). Inclusive el uso de micorrizas comerciales contribuye a elevar la acumulación de biomasa y cantidad de esporas en los suelos (Luecke, Mejia y Crawford, 2021). Es por ello, que la aplicación de hongos formadores de micorrizas y organismos benéficos como estrategia en la revegetación de las dunas costeras podría contribuir a la recuperación de este sistema biológico degradado; por tanto, en el presente estudio-evaluamos la influencia de la aplicación de un consorcio micorrízico comercial (Fosfonat®) sobre el crecimiento y acumulación de biomasa en *Scaevola plumieri* y *Sophora tomentosa*, especies de plantas nativas y estabilizadoras de la duna costera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especies de estudio. *Scaevola plumieri* (L.) Vahl (Goodeniaceae). Arbusto perenne de 0.4 a 2 m de altura. Hojas simples, suculentas, grandes, gruesas y lisas, de 5 a 11 cm de largo y de 2 a 7 cm de ancho, al desprenderse dejan cicatrices en el tallo de color verde amarillento. Flores solitarias zigomórficas, pequeñas y blanquesinas. Fruto carnoso de color azul/morado o negro cuando está maduro de 10 a 15 mm de diámetro (Gutiérrez-Báez, Avendaño y Zamora, 2013). Distribución general: Centroamérica y las Antillas. En México: Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Herbario virtual; CICY, 2024).

Sophora tomentosa L. (Fabaceae). Arbusto de 3 a 4 m de altura. Hojas alternas, compuestas, foliolos de 13 a 21, ovados, raquis pubescente. Inflorescencia terminal, racimo de 10 a 40 cm, corola amarillo brillante con 5 pétalos, pedicelos pubescentes de 8 a 9 mm de largo. Vainas con cáliz persistente de 5 a 13 cm de largo, entre 5 a 10 semillas subglobosas, color café oscuro (Lonard, Judd y Stalter, 2015). Distribución general: Neotrópico. En México: Tamaulipas, Veracruz, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Herbario virtual; CICY, 2024).

Origen de las semillas. Se obtuvieron frutos de diversos individuos de ambas especies localizados en la duna costera que se ubica en las cercanías a la carretera Champotón-Ciudad del Carmen, Campeche. Se recolectaron frutos maduros de color púrpura intenso de *S. plumieri* o bien en proceso de fermentación. Mientras que para *S. tomentosa* se colectaron vainas secas de color castaño, grisáceo. Posteriormente, se seleccionaron semillas que no tuvieran indicios de perturbaciones por pérdida de agua, daños en su cubierta, abertura de micrópilo y de similar tamaño. No se empleó ningún tipo de escarificación química o mecánica.

Diseño del experimento y condiciones experimentales. El experimento tuvo una duración de 197 días (siembra: 16 de noviembre de 2022; cosecha: 1 de junio de 2023) y se desarrolló en un vivero tipo forestal con sombra del 50% (malla de poliestireno), provisto con un sistema de riego por microaspersión. La temperatura promedio al interior del vivero fue de 26.7 °C y humedad relativa de 83.67%, ambas mediciones se realizaron en un termohigrómetro digital Walfront®. Se empleó un diseño experimental completamente al azar, utilizando dos especies nativas de la vegetación de duna costera (*Scaevola plumieri* y *Sophora tomentosa*) y dos tratamientos (Consorcio de microorganismos benéficos, Fosfonat®, y Control). Para evitar afectaciones al desarrollo del experimento, durante los meses de marzo a mayo, se humedeció el suelo con agua corriente para mantener la humedad relativa al interior del vivero. Mientras que para evitar daños a las plántulas por hormigas se aplicó cal hidratada (Ca(OH)) mensualmente en el suelo perímetro del vivero. Asimismo, el perímetro del vivero contó con una protección de malla ciclónica galvanizada de 69 × 69 mm × 2.50 m cal.12.5; para evitar el ingreso de fauna al interior. De igual manera el suelo del vivero contó con malla anti-maleza de polipropileno en color negro (Figura 1).

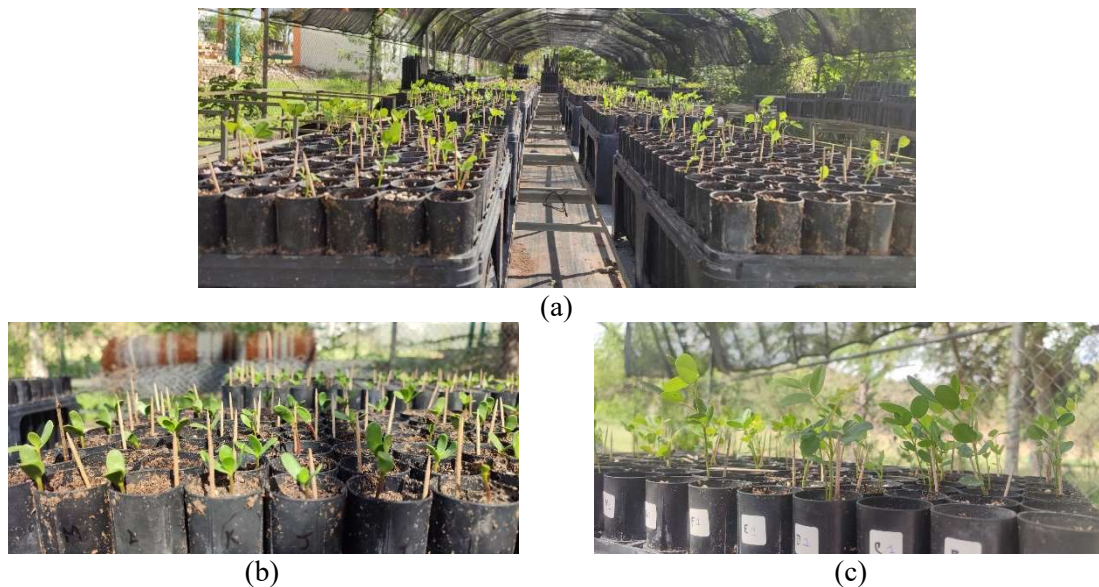


Figura 1. a) Condiciones experimentales en el vivero forestal; b) *Scaevola plumieri* (L.) Vahl (Goodeniaceae); c) *Sophora tomentosa* L. (Fabaceae).

Figure 1. a) Experimental conditions in the forest nursery; b) *Scaevola plumieri* (L.) Vahl (Goodeniaceae); c) *Sophora tomentosa* L. (Fabaceae).

Para la siembra, se emplearon germinadores forestales tipo banca de 98 unidades tubulares (tubetes), con capacidad de 120 mL; previamente desinfectados con hipoclorito de sodio al 4% durante 1 h, los cuales se llenaron con una mezcla 50:50 v/v de perlita (Multiperl®) y peat moss (CosmoPeat®). Se utilizaron cuatro germinadores (392 tubetes por tratamiento) por especie. Para la inoculación del consorcio comercial se aplicó el producto comercial Fosfonat® (Bactiva), compuesto por 132 esporas g⁻¹ de *Glomus intraradices*, *G. mosseae*, *G. etunicatum*, *G. aggregatum* y 2×10^9 UFC de bacterias benéficas de *Azospirillum brasiliense*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas fluorescens*. Durante el desarrollo del experimento, se realizaron tres inoculaciones, previo a la siembra se aplicó inóculo a las semillas de ambas especies del tratamiento Consorcio, sumergiéndolas en una solución al 0.25% (w/v) de inoculante durante 1 h. La segunda aplicación se realizó a los 30 días posteriores a la emergencia, utilizando la misma concentración aplicada en la primera aplicación. Finalmente, a los 60 días después de la siembra, se aplicó la tercera, utilizando una solución al 0.75% (w/v) de inoculante aplicado al sustrato.

Adicionalmente, las plántulas de ambas especies de ambos tratamientos se fertilizaron con el biofertilizante líquido comercial Fertikabil® (Nitrógeno orgánico: 15%, P: 2%, K: 8%, materia orgánica: 32%, pH: 7.5, ácidos fúlmicos: 4%, ácidos húmicos: 8%) en dos concentraciones, la primera fue del 0.5% (v/v) a los 60 días, después de la siembra, aplicándola una vez cada semana durante un mes. Posteriormente, se aplicó el biofertilizante al 11% (v/v), 90 días después de la siembra de las semillas. Este fertilizante se aplicó en forma de nebulización con un aspersor sobre las hojas de las plántulas.

Variables de estudio. Las variables del crecimiento se midieron en intervalos de 15 días (8 de febrero al 20 de mayo de 2023). La altura total, se midió desde el cuello del tallo hasta el ápice utilizando una regla graduada en mm, y por último se realizó el conteo del número de hojas y foliolos (para el caso de *S. tomentosa*). Al final del experimento se tomó una muestra de 20 plántulas del total, a las cuales se les midió la longitud de las raíces y se disectaron separando hojas, tallo y raíces. Los valores de biomasa, se obtuvieron de manera separada las partes de las plántulas mediante su secado en una estufa de convección Wisconsin Memmert® a una temperatura de 60 °C durante 72 horas. Posteriormente, se pesaron en una balanza digital marca AEAdam® modelo HCB602H (0.01 g).

Análisis estadístico. Las comparaciones de las variables del crecimiento (número de hojas, altura de la plántula y longitud de raíces) y la biomasa acumulada en hojas, tallo y raíces entre los tratamientos fueron realizadas con las pruebas t-Student (*t*) y Mann-Whitney (*U*) a un nivel de significancia $P < 0.05$, los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) se verificaron previo a la aplicación de las pruebas estadísticas con el programa Past versión 4.13 (Hammer y Harper, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La emergencia de las plántulas de *S. tomentosa* inició a los 17 días, mientras que para *S. plumieri* inició a los 27 días posteriores a la siembra. En el tratamiento Consorcio registramos el 86% de emergencia para *S. plumieri* y en el Control obtuvimos el 79%. En semillas con tres años de almacenamiento se ha registrado el 65% de emergencia a las 16 semanas posteriores a la siembra (Knevel, Venema y Lubke, 2002). Es posible que las diferencias en los porcentajes de emergencia sean debido a que las semillas utilizadas en el presente experimento se almacenaron por 30 días. Además, cabe señalar que la colecta de frutos se realizó en el mes de octubre del año 2022. Lo cual coincide con los meses (octubre a febrero) de mayor producción de semillas maduras (Knevel y Lubke, 2005).

De manera semejante a la anterior especie, el tratamiento Consorcio la emergencia de *S. tomentosa* fue del 81% y en el Control se obtuvo el 78%. La latencia de *S. tomentosa* está condicionada por la capacidad de protección de la semilla y a la abertura del micrópilo como principal barrera ante la pérdida y absorción de agua (Delgado, Souza, Santos y Silveira, 2015). Aunado, las semillas de la especie son frecuentemente afectadas por hongos e insectos depredadores (Nogueira y Arruda, 2006). De manera que los porcentajes de emergencia que se obtuvieron en el experimento pueden atribuirse al periodo de colecta de frutos y su selección. Para ambas especies se eligieron semillas sin indicios de perturbaciones por pérdida de agua, daños externos visibles en su cubierta y evidencia de apertura en el micrópilo en el caso de *S. tomentosa*. A su vez, el remojo en agua con el inóculo, de las semillas del tratamiento Consorcio, durante 1 h previo a la siembra pudo actuar como una medida de escarificación y promover la pronta germinación y emergencia.

Número de hojas. En ambas especies se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al número de hojas a partir de la tercera medición realizada a los 45 días posteriores a la emergencia (Figura 2a, b). Al final del experimento (90 días) la diferencia promedio entre tratamientos fue de 3.2 hojas para *S. plumieri* y 1.98 hojas para *S. tomentosa*. Al respecto, se ha estudiado en condiciones experimentales que la aplicación de fertilizantes químicos conduce a un aumento en el área foliar de *S. plumieri* (Gilbert, Pammenter y Ripley, 2008). Sin embargo, valores bajos de área foliar pueden ser favorables para mantener el balance hídrico de la especie (Ripley y Pammenter, 2004).

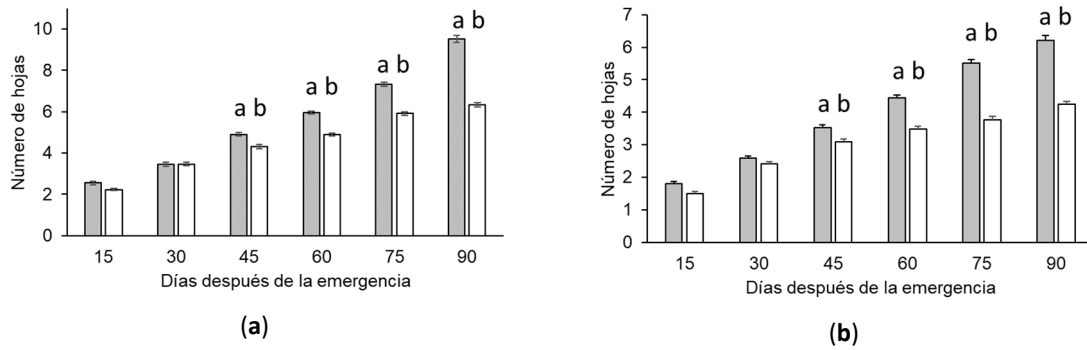


Figura 2. Número de hojas en plántulas de las especies estabilizadoras de duna costera. Los valores indican la media y el error estándar (media $\pm$ E. E.). Las letras minúsculas diferentes denotan diferencia significativa (U Mann Withney; $P < 0.0001$). Las barras grises oscuras representan el tratamiento con fertilización y las barras grises claras el control sin fertilización. Especies: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

Figure 2. Number of leaves in seedlings of coastal dune stabilizing species. Values indicate the mean and standard error (mean $\pm$ S. E.). Different lowercase letters denote significant difference (U Mann Withney; $P < 0.0001$). Dark gray bars represent the fertilized treatment, and light gray bars represent the unfertilized control. Species: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

Altura de la planta. Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para ambas especies a los 90 días post-emergencia. En *S. plumieri* la diferencia entre tratamientos en la media de la altura fue de 13.1 mm en tanto que para *S. tomentosa* fue de 21.11 mm (Figura 3a, b). En condiciones naturales los individuos adultos de *S. tomentosa* muestran dos momentos de máximo desarrollo del tallo (Kuki, Oliva y Pereira, 2008). Asimismo, en condiciones naturales, la aplicación de fertilización química no genera diferencias en la longitud del tallo con respecto a las plantas sin fertilización (Gilbert *et al.*, 2008). Sin embargo, el enterramiento en arena (Gilbert y Ripley, 2008), la orientación de los individuos respecto de la duna (Gilbert, Pammenter y Ripley, 2011) y el desarrollo de la planta en condiciones ambientales con limitaciones en nutrientes (Gilbert *et al.*, 2008), favorecen el constante crecimiento del tallo de *S. plumieri*. En playas del pacífico mexicano la especie tiene afinidad a dunas embrionarias y suelos con alta fertilidad (Frías-Ureña *et al.*, 2022). Las diferencias observadas en el crecimiento en ambas especies contribuyen a entender la capacidad de resiliencia de las dunas costeras y la respuesta de la flora de las dunas ante el cambio climático y las especies invasoras y en consecuencia (McGuirk, Kennedy y Konlechner, 2022).

Longitud de las raíces. Se encontraron diferencias significativas en la longitud de las raíces de ambas especies (Figura 4). La presencia de un extenso sistema de raíces y tallos subterráneos en adición con bajas áreas foliares en

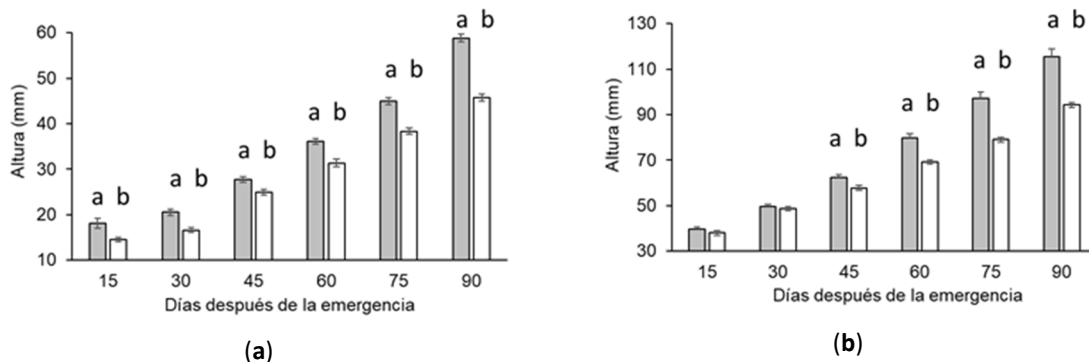


Figura 3. Altura (mm) de las plántulas de especies estabilizadoras de duna costera. Los valores indican la media y el error estándar (media $\pm$ E. E.). Las letras minúsculas diferentes denotan diferencia significativa (t-Student; $P < 0.0001$). Las barras grises oscuras representan el tratamiento con fertilización y las barras grises claras el control sin fertilización. Especies: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

Figure 3. Height (mm) of coastal dune stabilizing species seedlings. Values indicate the mean and standard error (mean $\pm$ S. E.). Different lowercase letters denote significant difference (t-Student; $P < 0.0001$). Dark gray bars represent the fertilized treatment, and light gray bars represent the unfertilized control. Species: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

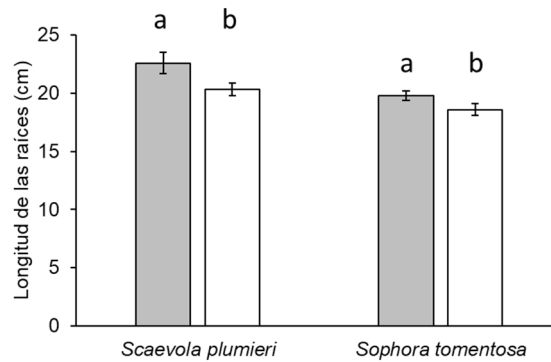


Figura 4. Longitud de las raíces (cm) de las plántulas de especies estabilizadoras de duna costera. Las barras indican la media y el error estándar (media $\pm$ E. E.). Las letras minúsculas diferentes denotan diferencia significativa (t-Student; $P < 0.05$). Las barras grises representan el tratamiento con fertilización y las barras blancas el control sin fertilización.

Figure 4. Root length (cm) of coastal dune stabilizing species seedlings. Values indicate the mean and standard error (mean $\pm$ S. E.). Different lowercase letters denote significant difference (t-Student; $P < 0.05$). Gray bars represent the fertilized treatment, and white bars represent the unfertilized control.

S. plumieri le confieren una baja transpiración y demanda de agua (Ripley y Pammenter, 2004). En los nódulos de las raíces de *S. tomentosa* se han registrado diversas especies de bacterias de los géneros: *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Paenibacillus*, *Rhizobium* y *Sinorhizobium*; de manera que la especie posee la capacidad de establecer estrechas relaciones simbióticas con microorganismos fijadores de nitrógeno (Toma *et al.*, 2017). La longitud de las raíces pudo estar limitada por el tubete forestal empleado en el experimento. Por lo que, además, de la longitud y biomasa de las raíces es necesario incorporar los rasgos funcionales, p. ej.: densidad del tejido radicular, longitud específica de la raíz, diámetro promedio de la raíz y diámetro de la raíz; a fin de comprender las posibles interacciones entre la vegetación y la dinámica de la duna costera (Walker y Zinnert, 2022).

Biomasa aérea y subterránea. Los tratamientos difieren significativamente en la comparación de la biomasa seca acumulada en hojas, tallo y raíz para *S. plumieri* y para *S. tomentosa* en hojas y raíz (Figura 5a, b). Los efectos de la adición de P, sobre la morfología y biomasa de *Scaevola aemula* son positivos a niveles por debajo de 20 mg L⁻¹ de P (Burnett, Zhang, Stack y He, 2008). No se conducen a diferencias en el crecimiento del tallo en plantas enterradas en la arena respecto de plantas no cubiertas con arena (Gilbert y Ripley, 2008).

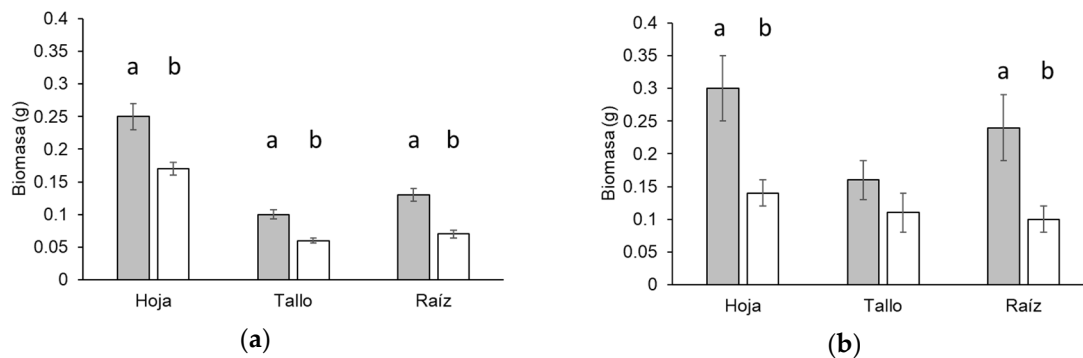


Figura 5. Acumulación de biomasa (g) en las plántulas. Las barras indican la media y el error estándar (media $\pm$ E. E.). Tratamientos: Consorcio, barras en color gris y Control, barras en color blanco. Las letras minúsculas diferentes denotan diferencia significativa (t-Student; $P < 0.0001$). Las barras grises oscuras representan el tratamiento con fertilización y las barras grises claras el control sin fertilización. Especies: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

Figure 5. Accumulation of biomass (g) in the seedlings. The bars indicate the mean and standard error (mean $\pm$ S. E.). Treatments: Consortium, gray bars and Control, white bars. Lowercase letters denote significant difference (t-Student test $P < 0.0001$). Dark gray bars represent the fertilized treatment, and light gray bars represent the unfertilized control. Species: (a) *Scaevola plumieri*; (b) *Sophora tomentosa*.

En el caso de *S. tomentosa* su crecimiento en ambientes degradados y con altas concentraciones de sal promueve la ganancia de peso en las raíces de las plántulas (Santos, Goi y Neto, 2001). Además, *S. tomentosa* puede ser considerada como especie biomarcadora *in situ* de la calidad ambiental (Kuki *et al.*, 2008). El presente experimento se desarrolló en un vivero forestal y se aplicó un biofertilizante líquido lo que pudo favorecer la adquisición de nutrimentos por el consorcio de microorganismos favoreciendo el crecimiento y la acumulación de biomasa. La adición de nutrimentos potencia la acumulación de biomasa aérea inclusive en condiciones de alta densidad de plantas (Morton *et al.*, 2025). Además, es posible que la acumulación de biomasa observada haya sido debido a la inoculación con el consorcio de microorganismos comercial (Luecke *et al.*, 2021). Sin embargo, la acumulación de biomasa puede ser limitada bajo condiciones de estrés salino (Clark, Busch y Crawford, 2021). Lo anterior, trae consigo la necesidad de implementar experimentos en los cuales el estrés salino sea un factor a evaluar.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se encontró que el uso de consorcios de microorganismos (hongos formadores de micorrizas y bacterias benéficas) promueven el crecimiento y acumulación de biomasa en dos especies arbustivas estabilizadoras de la duna costera. La aplicación de microorganismos benéficos durante la etapa de producción de plantas en vivero puede potenciar el éxito de las estrategias de revegetación en ambientes cuyos suelos presentan condiciones limitantes y estresantes como es el caso de las dunas costeras. Los resultados del estudio empleando el Fosfonat® como consorcio micorrízico comercial pueden contribuir como estrategia de restauración y recuperación de la vegetación costera, a fin de aliviar los efectos adversos de la erosión y mitigar los efectos del cambio climático en las zonas costeras del Golfo de México. Los resultados del experimento muestran un incremento de las diferencias entre los tratamientos en cuanto al número de hojas y altura en ambas especies. En futuras investigaciones es necesario incluir otras especies nativas p. ej.: especies pioneras de hábitos rastreros, evaluar rasgos funcionales de las plantas y ampliar el tiempo de los ensayos para alcanzar un mayor desarrollo de las plántulas y evaluar su establecimiento en los sitios potenciales de revegetación. Además, en el diseño de políticas públicas del sector ambiental, programas de recuperación de ecosistemas costeros degradados, se debe considerar el uso de microorganismos benéficos nativos; por un lado, para contribuir al éxito en el establecimiento de las plantas y por otro lado para aliviar la competencia frente a las especies invasoras. Lo anterior, también puede ser aplicado en otros ecosistemas degradados con suelos que presenten condiciones salinas que limitan el crecimiento de las plantas nativas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R.A.B.E. y G.E.M.A. Metodología: R.A.B.E., J.C.C.C. y G.E.M.A. Validación: R.E.C.S., J.C.C.C., G.E.M.A. y B.B.D.C. Análisis formal: J.C.C.C. y G.E.M.A. Investigación: R.E.C.S., J.C.C.C. y G.E.M.A. Preparación de borrador original: R.E.C.S., J.C.C.C., G.E.M.A. y B.B.D.C. Escritura, revisión y edición: R.A.B.E., R.E.C.S., J.C.C.C., G.E.M.A. y B.B.D.C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades brindadas por el Tecnológico Nacional de México a través del Instituto Tecnológico de Chiná y del Instituto Tecnológico de Campeche. De igual manera agradecemos al NODESS (N0422000006), Secretaría de Medio Ambiente, Cambio Climático y Energía del Estado de Campeche y al Grupo Ecologista Quelonios A.C (Campamento tortuguero Punta Xen). El presente trabajo fue parte de la tesis de Licenciatura en Biología del primer autor.

LITERATURA CITADA

- Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F., Cruz-Gaistardo, C. O., Argumedo-Espinoza, J. A., Romero-Benítez, V. M., & de la Cruz-Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288.
- Bryant, D. B., Bryant, M. A., Sharp, J. A., Bell, G. L., & Moore, C. (2019). The response of vegetated dunes to wave attack. *Coastal Engineering*, 152, 103506. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103506>
- Burnett, S. E., Zhang, D., Stack, L. B., & He, Z. (2008). Effects of phosphorus on morphology and foliar nutrient concentrations of hydroponically grown *Scaevola aemula* L. Br. 'Whirlwind Blue'. *HortScience*, 43(3), 902-905. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.902>
- Carmona-Escalante, A., Guadarrama, P., Ramos-Zapata, J., Castillo-Argüero, S., & Montaña, N. (2013). Hongos micorrizicos arbusculares asociados a la vegetación costera en Chuburna, Yucatan, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(3), 431-443.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana*, 129, e1932. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Castillo-Campos, G., Martínez, M. L., García-Franco, J. G., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., & Pale-Pale, J. (2022). Assessing the impact of an invasive plant in a Protected Natural Area: Island of Cozumel, Mexico. *Biological Invasions*, 24(5), 1511-1526. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02738-1>
- Cid-Salinas, A., Pedroza-Páez, D., Mendoza, E., Espejel-Carbajal, M. I., Delgadillo-Calzadilla, M. A., Villatoro-Lacouture, M. M., ... & Silva-Casarín, R. (2013). *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras: Criterios ecológicos y estrategias* (1ª ed.). Tlalpan, Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-8246-59-5
- CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.). (2024). Quiénes somos. En CICY.mx. Consultado el 8 de noviembre, 2024, desde: <https://www.cicy.mx/quienes-somos>
- Clark, G. S., Busch, M. H., & Crawford, K. M. (2021). Effect of salt, nutrients, and native microbe additions on common dune restoration grasses. *Journal of Coastal Research*, 37(5), 1025-1034. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00078.1>
- De Battisti, D., & Griffin, J. N. (2020). Belowground biomass of plants, with a key contribution of buried shoots, increases foredune resistance to wave swash. *Annals of Botany*, 125(2), 325-334. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz125>
- Delgado, C. M. L., Souza de Paula, A., Santos, M., & Silveira Paulilo, M. T. (2015). Dormancy-breaking requirements of *Sophora tomentosa* and *Erythrina speciosa* (Fabaceae) seeds. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 285-294. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.13903>
- Dong, S., Hu, F., Alamusa, Ma, Q., & Liu, Z. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance the drought resistance more significantly of the late-successional psammophytes than that of the early ones. *Restoration Ecology*, 31, e13832. <https://doi.org/10.1111/rec.13832>
- Farrer, E. C., Van Bael, S. A., Clay, K., & Smith, M. K. (2022). Plant-microbial symbioses in coastal systems: their ecological importance and role in coastal restoration. *Estuaries and Coasts*, 45(7), 1805-1822.
- Feagin, R. A., Furman, M., Salgado, K., Martinez, M. L., Innocenti, R. A., Eubanks, K., ... & Silva, R. (2019). The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.01.018>
- Figlus, J., Sigren, J. M., Feagin, R. A., & Armitage, A. R. (2022). The unique ability of fine roots to reduce vegetated coastal dune erosion during wave collision. *Frontiers in Built Environment*, 8, 904837. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.904837>
- Frías-Ureña, H. G., Ruiz-Corral, J. A., Macías-Rodríguez, M. Á., Durán, N., González, D., De Albuquerque, F., & Torres-Morán, J. P. (2022). Relationship between the distribution of vegetation and the environment in the coastal embryo dunes of Jalisco, México. *PeerJ*, 10, e13015. <https://doi.org/10.7717/peerj.13015>
- García-Dueñas, R. Y., Castellanos-González, M. E., & Miranda-Vera, C. E. (2023). Cambio climático, manejo integrado de zonas costeras y educación ambiental: imperativos para el desarrollo sostenible de las áreas costeras. *Universidad y Sociedad*, 15(S1), 68-79.
- Gilbert, M. E., & Ripley, B. S. (2008). Biomass reallocation and the mobilization of leaf resources support dune plant growth after sand burial. *Physiologia Plantarum*, 134(3), 464-472. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01153.x>
- Gilbert, M., Pammenter, N., & Ripley, B. (2008). The growth responses of coastal dune species are determined by nutrient limitation and sand burial. *Oecologia*, 156(1), 169-178. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0968-3>
- Gilbert, M. E., Pammenter, N. W., & Ripley, B. S. (2011). Do partially buried dune plants grow in optimal trajectories?. *Plant Ecology*, 212, 1263-1274. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9903-5>
- González-González, S., Torres-Arias, Y., Ortega-Fors, R., & Gómez, E. F. (2016). Hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) de la playa Santa María del Mar, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 37, 81-84.
- Guadarrama-Chávez, M. P., & Ramos-Zapata, J. A. (2020). Importancia de las micorrizas como estrategia de restauración en la duna costera de Yucatán. *Bioagrobiocencias*, 13(2), 38-47. <http://dx.doi.org/10.56369/BAC.3528>
- Guadarrama, P., Salinas-Peba, L., García-Bielma, M., Endañú-Huerta, E., Hernández-Cortés, J., & Ramos-Zapata, J. A. (2014). Nota sobre la florística y estado de conservación de remanentes de vegetación pionera de duna costera de Isla del Carmen, Campeche, México. *Botanical Sciences*, 92(3), 453-456. <https://doi.org/10.17129/botsci.115>
- Guadarrama-Chávez, P., Sánchez-Gallén, I., Álvarez-Sánchez, J., & Ramos-Zapata, J. (2004). Hongos y plantas: beneficios a diferentes escalas en micorrizas arbusculares. *Ciencias*, 73, 38-45.
- Gutiérrez-Báez, C., Avendaño-Reyes, S., & Zamora-Crescencio, P. (2013). La familia Goodeniaceae en México. *Foresta Veracruzana*, 15(2), 1-6.
- Greipsson, S., Stover, K., Whitney, S., & McElroy, T. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi and soil fungi associated with *Uniola paniculata* L. (sea oats) on restored and natural sand dunes on the Georgia Coast, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 40(5), 875-886. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-23-00072.1>

- Hammer, Ø., & Harper, D. A. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1), 1.
- Hanlon, L. M. (2021). First recorded account of arbuscular mycorrhizal fungi in sand dunes in south eastern Australia: Biogeography and species richness. *Journal of Coastal Research*, 37(2), 280-290. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00057.1>
- Hernández, A., Villanueva, R. G., Coego, R. C., Bao, R., & Sáez, A. (2023). Dinámica de los sistemas dunares costeros ante el Cambio Global: La necesidad de una gestión sostenible. *Cuaternario y Geomorfología*, 37(1), 33-50. <https://doi.org/10.17735/cyg.v37i1-2.95891>
- Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., & Martínez, M. L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), 486-507. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.022>
- Knevel, I. C., Venema, H. G., & Lubke, R. A. (2002). The search for indigenous dune stabilizers: Germination requirements of selected South African species. *Journal of Coastal Conservation*, 8, 169-178. [https://doi.org/10.1652/1400-0350\(2002\)008\[0169:TSFIDS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1652/1400-0350(2002)008[0169:TSFIDS]2.0.CO;2)
- Knevel, I. C., & Lubke, R. A. (2005). Reproductive phenology of *Scaevola plumieri*; a key coloniser of the coastal foredunes of South Africa. *Plant Ecology*, 175, 137-145. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-3369-7>
- Kuki, K. N., Oliva, M. A., & Pereira, E. G. (2008). Iron ore industry emissions as a potential ecological risk factor for tropical coastal vegetation. *Environmental Management*, 42, 111-121. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9093-7>
- Lonard, R. I., Judd, F., & Stalter, R. (2015). The biology of the Subtropical and Pantropic shrub, *Sophora tomentosa* L. (Fabaceae), in coastal dune environments. *International Biology Review*, 2, 1-9. <https://doi.org/10.18103/ibr.v0i2.234>
- Luecke, N. C., Mejia, A. J., & Crawford, K. M. (2021). Native soil amendments combined with commercial arbuscular mycorrhizal fungi increase biomass of *Panicum amarum*. *Scientific Reports*, 11, 17865. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97307-2>
- McGuirk, M. T., Kennedy, D. M., & Konlechner, T. (2022). The role of vegetation in incipient dune and foredune development and morphology: A review. *Journal of Coastal Research*, 38(2), 414-428. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-21-00021.1>
- Mendoza-González G., Zepeda-Centeno C., Francisco, V., Hernández-Mendoza V., Hoil, D., Secaira, F., ... & Rioja-Nieto R. (2022). Manual para la restauración de dunas costeras de la Península de Yucatán. Mérida, Yucatán: LANRESC.
- Mendoza-González, G., Paredes-Chi, A., Méndez-Funes, D., Giraldo, M., Torres-Irineo, E., Arancibia, E., & Rioja-Nieto, R. (2021). Perceptions and social values regarding the ecosystem services of beaches and coastal dunes in Yucatán, Mexico. *Sustainability*, 13(7), 3592. <https://doi.org/10.3390/su13073592>
- Monzón-Bruguera, Y. (2009). Derecho y Manejo Integrado de las Zonas Costeras. Una Aproximación Teórica. *Ciencia y Sociedad*, 34(4), 597-617. <https://doi.org/10.22206/CYS.2009.V34I4.PP597-617>
- Morton, J. P., Fischman, H. S., Cordero, O., Crabill, J. T., Anthony, M. R., Schneider, M. A., ... & Angelini, C. (2025). Strategic planting and nutrient amendments to accelerate the revegetation of rapidly retreating coastal dunes. *Journal of Applied Ecology*, 62(2), 267-279. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14859>
- Nogueira, E. M. L., & Arruda, V. L. V. (2006). Fructification and damage to fruits and seeds of *Sophora tomentosa* L. on a sandbank of Joaquina beach, Florianópolis, SC. *Biotemas*, 19(4), 41-48.
- Ortega-Rubio, A., Muñoz, P., Rivera-Arriaga, E., & Azuz, I. (2011). Política nacional para el desarrollo sustentable de océanos y costas en México: génesis y gestión. *Región y Sociedad*, 23(50), 279-289. <https://doi.org/10.22198/rys2011/23/32>
- Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., & Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e912883. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883>
- Parra-Tabla, V., Tun-Garrido, J., García-Franco, J., & Martínez, M. L. (2024). The recent expansion of the invasive hemiparasitic plant *Cassytha filiformis* and the reciprocal effect with its main hosts. *Biological Invasions*, 26, 535-547. <https://doi.org/10.1007/s10530-023-03192-3>
- Quiroz-Villanueva, E., Cervantes, O., Olivios-Ortiz, A., & Martínez-Díaz, T. (2022). Assessment of the vulnerability of the coastal dunes on the Colima, Mexico coast. *Costas*, 4(2), 53-76. <https://doi.org/10.25267/Costas.2023.v4.i2.0304>
- Ramos-Zapata, J. A., Zapata-Trujillo R., Ortiz-Díaz, J. J., & Guadarrama, P. (2011). Arbuscular mycorrhizas in a tropical coastal dune system in Yucatan, Mexico. *Fungal Ecology*, 4(4), 256-261. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2010.12.002>
- Ripley, B. S., & Pammenter, N. W. (2004). Do low standing biomass and leaf area index of sub-tropical coastal dunes ensure that plants have an adequate supply of water? *Oecologia*, 139(4), 535-544. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1535-1>
- Santos, E. C., Goi, S. R., & Jacob-Neto, J. (2001). Proposta de utilização de *Sophora tomentosa* L. sub espécie littoralis (Schrad) Yakove para recuperação de áreas com resíduo industrial salino. *Floresta e Ambiente*, 8(1), 216-218.
- Soto, R. G. (2018). Dunas y procesos costeros en una isla tropical caribeña amenazada por erosión, actividades humanas y aumento del nivel del mar. *Caribbean Studies*, 46(2), 57-77.
- Tenzin, U. W., Noirungsee, N., Runsaeng, P., Noppradit, P., & Klinnawee, L. (2022). Dry-season soil and co-cultivated host plants enhanced propagation of arbuscular mycorrhizal fungal spores from sand dune vegetation in trap culture. *Journal of Fungi*, 8(10), 1061. <https://doi.org/10.3390/jof8101061>
- Toma, M. A., Carvalho, T. S. D., Guimarães, A. A., Costa, E. M. D., Silva, J. S. D., & Moreira, F. M. D. S. (2017). Tripartite symbiosis of *Sophora tomentosa*, rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(4), 680-688. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.03.007>
- Walker, S. L., & Zinnert, J. (2022). Whole plant traits of coastal dune vegetation and implications for interactions with dune dynamics. *Ecosphere*, 13(5), e4065. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4065>
- Wang, J., Ma, S., Wang, G. G., Xu, L., Fu, Z., Song, J., & Zhang, J. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi communities associated with wild plants in a coastal ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 32(2), 683-695. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01127-5>