



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

CARACTERIZACIÓN DEL BOSQUE Y EL GRADIENTE AMBIENTAL EN DOS ÁREAS PROTEGIDAS CON EROSIÓN COSTERA EN EL CARIBE SUR DE COSTA RICA

Forest Characterization and Environmental Gradient in Two Protected Areas with Coastal Erosion, in the Southern Caribbean of Costa Rica

Maikol CASTILLO-CHINCHILLA^{a1*}, Lilliana PIEDRA-CASTRO¹, José PEREIRA CHAVES¹, Luis SIERRA-SIERRA¹, José CARVAJAL-SÁNCHEZ²

^{a*} Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Costa Rica (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

¹ Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

² Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

* For correspondence: maikol.castillo.chinchilla@una.cr

Recibido: 07 de noviembre de 2023. **Revisado:** 29 de febrero de 2024. **Aceptado:** 12 de julio de 2024

Editor asociado: Susana Feldman

Citation/ citar este artículo como: Castillo-Chinchilla, M; Piedra-Castro, L; Pereira-Chaves, J, Sierra-Sierra, L y Carvajal-Sánchez, J (2024). Caracterización del bosque y el gradiente ambiental en dos áreas protegidas con erosión costera en el Caribe sur, Costa Rica. *Acta Biol. Colomb.*, 29(3), 156-165. <https://doi.org/10.15446/abc.v29n3.110919>

RESUMEN

La erosión costera está relacionada directamente con el desbalance sedimentario que afecta las playas a nivel mundial, y tiene el potencial de cambiar las condiciones que requieren las comunidades vegetales. El objetivo de esta investigación es caracterizar la composición del bosque y el gradiente ambiental en dos áreas protegidas con erosión costera en el Caribe Sur de Costa Rica. Se realizaron 70 parcelas circulares de 15 m de diámetro que abarcaron desde los 50 m y hasta los 200 m tierra adentro, ubicados de manera perpendicular a las playas del Parque Nacional Cahuita (PNC) y Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo (REGAMA), que han sido identificadas previamente con tendencia erosiva fuerte entre 1960-2023. En cada parcela, se midieron parámetros fisicoquímicos y ambientales, se identificaron las especies de árboles y se analizaron las texturas del suelo. Se evidenció una zonificación que abarca desde los 50 m y hasta los 200 m respecto al mar, principalmente para los análisis fisicoquímicos y la textura del suelo, que inciden en la composición y estructura del bosque. Tanto en el PNC como en el REGAMA se destaca un ensamble básico de especies que funcionan como estabilizadoras de las reservas de sedimento de playas arenosas, que incluyen a *Prioria copaifera*, *Lonchocarpus heptaphyllus*, *Pterocarpus officinalis*, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Tabernamontana alba*. Se concluye que, en ambas áreas protegidas, la erosión costera tiene efectos sobre la composición del bosque e incide en los gradientes ambientales que se presentan en los primeros metros de la costa.

Palabras clave: Dunas, Mar, Manglares, Vegetación.

ABSTRACT

Coastal erosion is directly related to sediment imbalance that affects beaches worldwide and possesses the potential to alter the conditions requisite for plant communities. This research aimed to characterize the forest composition and environmental gradient in two protected areas with coastal erosion in the Southern Caribbean, Costa Rica. Seventy circular plots of 15 m diameter were located perpendicular to the coastal edge and carried out from 50 m from the coastline to 200 m inland in the Cahuita National Park (PNC) and the Gandoca-Manzanillo National Wildlife Refuge (REGAMA), which have been previously identify as those with the stronger

erosion tendency between 1960-2023. We collected environmental and physicochemical parameters, identified the tree species, and analyzed the soil texture in each plot. Zoning from 50 m to 200 m from the sea was observed, mainly for physicochemical analysis and soil texture, which affect the composition and structure of the forest. In both the PNC and REGAMA, there is a crude assemblage of species that function as stabilizers of the sediment reserves of sandy beaches, including *Prioria copaifera*, *Lonchocarpus heptaphyllus*, *Pterocarpus officinalis*, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Tabernamontana alba*. In conclusion, in both protected areas, coastal erosion affects the forest composition and the environmental gradients that occur in the first meters of the coast.

Keywords: Dunes, Mangrove, Sea, Vegetation

INTRODUCCIÓN

La erosión costera junto con el cambio en el nivel medio del mar son factores que presionan la biodiversidad presente en las playas arenosas (Bazzichetto *et al.*, 2020), lo cual provoca impactos en las comunidades de plantas (Maximiliano-Cordova *et al.*, 2021) presentes en la duna y secciones posteriores a ésta (Yincan *et al.*, 2017).

Uno de estos ecosistemas que se impactan son los bosques costeros, que presentan características particulares, por lo que sustentan una considerable diversidad de nichos ecológicos y hábitats para diferentes especies (Lane *et al.*, 2008; Gedan *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2016). En general, éstos han sido poco estudiados y valorados, por lo que el conocimiento sobre acciones para su conservación es limitado, considerando los impactos como resultado del cambio climático (Gillespie *et al.*, 2000; Odum y Barrett, 2006).

En relación con el cambio climático, se ha documentado que alcanza su mayor impacto en las zonas costeras, donde son evidentes los efectos que tiene el incremento en el nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, y el incremento global de temperatura (Mimura, 2013; Cazenave y Cozannet, 2014). A medida que esto ocurre, se presentan cambios que deterioran el balance sedimentario que nutre las playas, provocando erosión y la consecuente pérdida de funcionalidad del sistema biológico (Griggs y Reguero, 2021).

Al ocurrir erosión costera, se incrementa la vulnerabilidad de los bosques costeros, los cuales pueden experimentar variación en la composición y estructura, como resultado de la intrusión salina (Garner *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2016). Estas variaciones determinan la funcionalidad ecosistémica y ecológica de éstos, que son considerados como componentes vitales (Miller, 2015; Ajedegba *et al.*, 2019).

Miller (2015) menciona que la variación en la cantidad de sedimento de reserva afecta significativamente la estructura y composición de las comunidades vegetales en las zonas tropicales (Frías-Ureña *et al.*, 2022). Estas interacciones entre el mar, la duna y los bosques costeros conllevan a la alteración de la heterogeneidad ambiental y la distribución espacial de las condiciones microambientales (Mendoza *et al.*, 2017), principalmente cuando experimentan procesos erosivos intensos (Kobayashi *et al.*, 2013; Garner *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2016).

En el caso de Costa Rica, las playas arenosas del Caribe Sur tienen serios problemas de erosión debido al efecto que tiene el aumento en el nivel del mar, la acción del oleaje durante eventos meteorológicos extremos y la incipiente

reserva de sedimentos que mantienen las dunas en playas arenosas (Piedra-Castro *et al.*, 2021; Castillo-Chinchilla *et al.*, 2023). Tal es el caso del Parque Nacional Cahuita (PNC) y el Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo (REGAMA), que han experimentado desplazamiento de línea costera por erosión que oscila entre -0,65 y -2,07 m/año para el periodo comprendido entre 1960 y 2023 (Castillo-Chinchilla *et al.*, 2023).

La condición descrita anteriormente tiene un efecto sobre los bosques costeros, los cuales cumplen una función importante para la estabilidad sedimentaria de las playas arenosas y su dinámica. El objetivo de la investigación es caracterizar la composición del bosque y el gradiente ambiental en dos áreas protegidas con erosión costera en el Caribe Sur, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó en los bosques costeros de dos áreas protegidas (AP) de la provincia de Limón, específicamente en el PNC (9°43' N y 82°49' W) y el REGAMA (9°35' N y 82°36' W), Caribe, Costa Rica, donde predominan playas de tipo arenoso con erosión en los últimos diez años y que han sido monitoreadas in situ desde el año 2012 (Piedra-Castro *et al.*, 2021). Esta información, junto con las características de las playas que sufren mayor afectación, fue recopilada en campo y procesada mediante un análisis de puntos calientes con el fin de determinar las áreas propensas a sufrir modificaciones en la composición del bosque y el gradiente ambiental (Fig 1).

Composición del bosque costero

Se realizaron 18 transectos perpendiculares a la playa, con 200 m de longitud, que se establecieron basados en la Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre N° 6043, Costa Rica. En el transecto, se instalaron cuatro parcelas circulares de 15 m de diámetro para un total de 70 parcelas. Se seleccionaron sitios en ambas AP que mantienen tendencia erosiva de la playa, tomando como referencia el estudio de Castillo-Chinchilla *et al.* (2023).

En cada parcela, se midieron los árboles con diámetro a la altura de pecho (DAP) mayor a 5 cm y se registró su altura. Además, se identificó cada individuo a nivel taxonómico de especie. Se contabilizaron y se agruparon las especies arbóreas por familia botánica, según la distancia de ocurrencia respecto al mar en las categorías de 50 m, 100 m, 150 m y

200 m. Se realizó un histograma de frecuencias para los árboles registrados según la clase diamétrica correspondiente.

Gradientes ambientales en bosques costeros

En cada parcela, se midió la salinidad, el pH, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y la resistividad en el suelo. A 7,5 m del centro de la parcela, en dirección hacia cada punto cardinal, se realizó una excavación del suelo para realizar la medición de la hojarasca acumulada, utilizando una regla graduada en centímetros y tomando como referencia la parte superficial del horizonte O. También, se colectó en el centro de la parcela una muestra de suelo de 30 g, a profundidades de 0,2 m y 0,7 m, para lo cual se utilizó un barreno para suelo no consolidado. Finalmente, se realizó el análisis de textura y clasificación del suelo utilizando el método descrito por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y FAO 2009.

Análisis estadístico

Se realizó un Escalamiento Multidimensional No Métrico (EMDN) utilizando el paquete vegan y Biodiversity de R (R Core Team, 2014), para valorar la influencia de las variables ambientales y los parámetros físico-químicos sobre la diversidad de especies según la distancia respecto al mar. Además, se realizó un análisis de Bray Curtis para evaluar la similitud florística en cada transecto de 200 m, tanto en el PNC como en el REGAMA. Adicionalmente, se calculó el índice de diversidad de Shannon-Weaver (H) como medida de la heterogeneidad de la comunidad vegetal presente en el bosque costero de ambas AP.

Para la priorización de las parcelas con especies que contribuyen con el efecto barrera y de protección de la playa, se realizó un Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ) siguiendo el procedimiento descrito por Saaty (2001). Las variables seleccionadas consideraron información biológica, ecológica y cualitativa descrita en literatura científica y que potencialmente tiene incidencia en la composición, estructura de la vegetación presente en bosques costeros o bien, aquellas particulares que son afectadas por erosión o intrusión salina

(Del Vecchio *et al.*, 2015; Miller, 2015; Brenes-Chaves *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2020; Frías-Ureña *et al.*, 2022).

Las cuatro variables consideradas para el PAJ fueron: (1) Distancia respecto al mar (ubicación espacial que tienen las especies de árboles a lo largo del transecto de 200 m), siendo definida Prioridad alta aquellas parcelas con dos o más especies distribuidas en la totalidad de los 200 m, Prioridad media: parcelas con dos y Prioridad baja: parcelas con una o más especies distribuidas únicamente en alguna de las franjas entre 50 m y 200 m (Del Vecchio *et al.*, 2015; Miller, 2015; Brenes-Chaves *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2020; Frías-Ureña *et al.*, 2022); (2) Rapidez del crecimiento (velocidad a la que crecen las plántulas en la franja de los 200 m), Prioridad alta: parcelas con más de tres especies de rápido crecimiento a lo largo de los 200 m; Prioridad media: parcelas con más de tres o más especies de crecimiento intermedio a lo largo de los 200 m y Prioridad baja: parcelas con tres o más especies de crecimiento lento con restricción para crecer en alguno de los sitios entre 50 m y 200 m; (3) Índice de valor de importancia por familia (IVF) referido al valor que resulta de la sumatoria de la densidad, dominancia y la diversidad relativa de las especies que componen cada parcela, según los criterios propuestos y descritos por Rangel y Velázquez (1997), Prioridad alta: parcelas con tres o más especies de IVF alto, Prioridad media: parcelas con tres o más especies de IVF medio y Prioridad baja: parcelas con dos especies o más de IVF bajo y (4) Comunidad vegetal: asociaciones vegetales donde se pueden encontrar las especies de árboles identificados en cada parcela clasificados como: tacotales, charrales, bosques secundarios y riberas (Dávila *et al.*, 2005; MINAET, 2011). Las variables comunidad vegetal y rapidez de crecimiento fueron consultados en la Base de Datos TROPiCOS (www.tropicos.org). Además de sitios web con información de Flora de Costa Rica (<http://www.mobot.org/Manual.Plantas/021141/S021213.html>) y el arboreto del Instituto Smithsonian (<https://panamabiota.org/stri/index.php>).

Para obtener la razón de consistencia del PAJ, se calcularon (1) el índice de consistencia (IC):

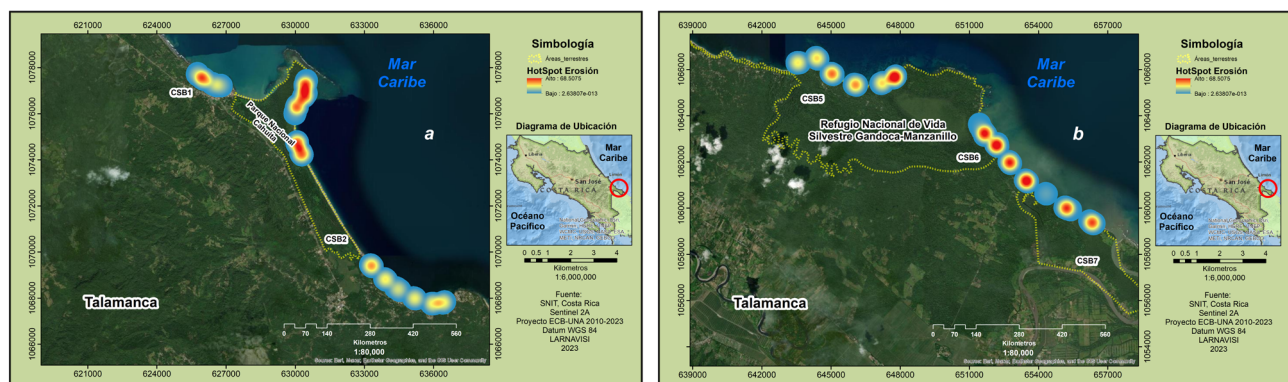


Figura 1. Puntos calientes donde se concentran los procesos erosivos de playas arenosas entre 2012-2022. a) Parque Nacional Cahuita; b) Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón, Costa Rica.

(2) el índice aleatorio (IA),:

y (3) la razón de consistencia del PAJ:

Donde $RC \leq 0,10$: Valor consistente; $RC > 0,10$: Valor inconsistente. Cuando RC supera el 0,10, es necesario reconsiderar los valores asignados a cada variable en las comparaciones pareadas.

Con los resultados del PAJ, se construyeron los ráster empleando la herramienta

superposición ponderada ESRI (2021) este insumo se utilizó para colocar las parcelas donde hay ocurrencia de las especies de árboles con mayor peso ponderado (Prioridad alta y Media), según el análisis mencionado.

RESULTADOS

Composición del bosque costero

En el PNC, se registraron 18 familias con 218 individuos distribuidos en 34 especies a lo largo de los transectos de 200 m. Para el REGAMA, se obtuvieron registros de 21 familias, con 308 individuos distribuidos en 40 especies. Se destaca que, en el REGAMA, *Virola koschnyi*, *V. sebifera*, *Muntingia calabura*, *Nectandra* sp. y *Hura crepitans*, únicamente se registraron en las parcelas ubicadas posterior a los 50 m de distancia respecto al mar.

A nivel de familias, ambas áreas protegidas mantuvieron diferencias en cuanto a la composición de las especies de árboles según la distancia respecto al mar. Para PNC, las de mayor frecuencia fueron Fabaceae (35,3 %), Rubiaceae (12,3 %), Rhizophoraceae (11,1 %), Combretaceae (9,63 %). Mientras que, en el REGAMA, se registraron esas mismas familias junto con Moraceae (5,59 %) y Lecythidaceae (5,27 %). En este mismo lugar, se registraron familias como únicas o exclusivas en las parcelas de 150 m y 200 m, tales como Myristicaceae (2,79 %), Muntingiaceae (3,68 %) y Euphorbiaceae (1,8 %).

La estructura horizontal del bosque costero de ambas áreas protegidas mostró variación de la densidad de individuos por hectárea en las clases diamétricas entre 5 cm-25

cm. En el caso del PNC, se registró aproximadamente 99 Ind/ha en las parcelas que se ubican a los 50 m, mientras que, en el REGAMA se obtuvieron valores 172 Ind/ha en esa misma zona. Para la clase 26 cm-50 cm, en el PNC se obtuvieron registros de presencia en todas las distancias con número de Ind/ha similares. Por el contrario, en el REGAMA se obtuvo un patrón escalonado, siendo mayor la cantidad de individuos en las primeros 50 m y que fueron disminuyendo paulatinamente hacia los 200 m (Fig. 3).

En el resto de las categorías, el PNC evidenció un patrón irregular en las parcelas, siendo la de 200 m, la que mostró mayor homogeneidad en cuanto al número de Ind/ha. Adicionalmente, se destaca que, en el PNC, la clase diamétrica no superó los 125 cm (*Lonchocarpus heptaphyllus*) y en el REGAMA alcanzó hasta los 260 cm (*Ficus insípida*) (Fig. 3).

Gradientes ambientales

El pH evidenció un rango de valores cercanos al neutro hasta los ácidos ($6,63-5,03 \pm 0,02$). Por un lado, las parcelas más cercanas a la costa obtuvieron valores más básicos, mientras que aquellas que se midieron en las zonas más retiradas y en dirección hacia el continente presentaron los valores más ácidos para ambas AP.

La salinidad, por el contrario, disminuyó en esa franja de 200 m, los valores más altos se registraron en la parcela ubicada en la sección cercana al mar ($0,95 \pm 0,01$ PSU), con una disminución paulatina que se extendió hacia la zona más continental. La conductividad del suelo disminuyó desde la costa hacia el interior del continente, los valores más altos los que se registraron en el frente del mar ($1,69915-0,41685 \pm 1$ $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Los suelos del PNC y del REGAMA evidenciaron características similares en cuanto a su textura, entre los 50 m y los 200 m presentaron variación en el porcentaje de arena, limo y arcilla. En la franja entre los 50 m y los 100 m, en el PNC fue franco arenoso (F.A) y en el REGAMA fue franco limoso (F.L). Los suelos predominantes del PNC fueron los Entisoles, mientras que en el REGAMA los Inceptisoles.

Según el EMDN, las variables ambientales que tienen mayor peso en la distribución espacial de la vegetación a lo largo de los transectos fueron la altura de la capa de hojarasca, la cobertura del dosel y la intensidad de la luz para las especies que se ubicaron a los 200 m. Así mismo, se determinó que la distribución espacial de la riqueza con respecto a la distancia del mar respondió positivamente a las variables salinidad, pH y la temperatura que se ubicaron en las parcelas de los 50 m (Fig. 4).

El análisis Bray Curtis evidenció que en términos generales ambas áreas protegidas mantienen un ensamble de especies arbóreas similar en la zona posterior a los primeros 50 m de distancia respecto al mar. La composición vegetal del PNC, a los 50 m respecto a la costa, es diferente a todas las demás, mientras que las parcelas que se ubican a 100 m del mar en ambas localidades mantienen únicamente 50 % de

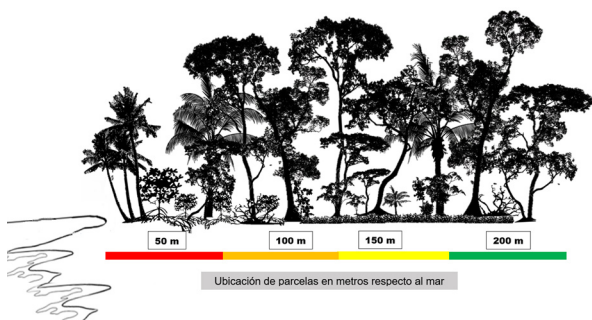


Figura 2. Distribución de parcelas perpendiculares al mar y distancias de separación para bosques costeros del Parque Nacional Cahuita y el Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón Costa Rica.

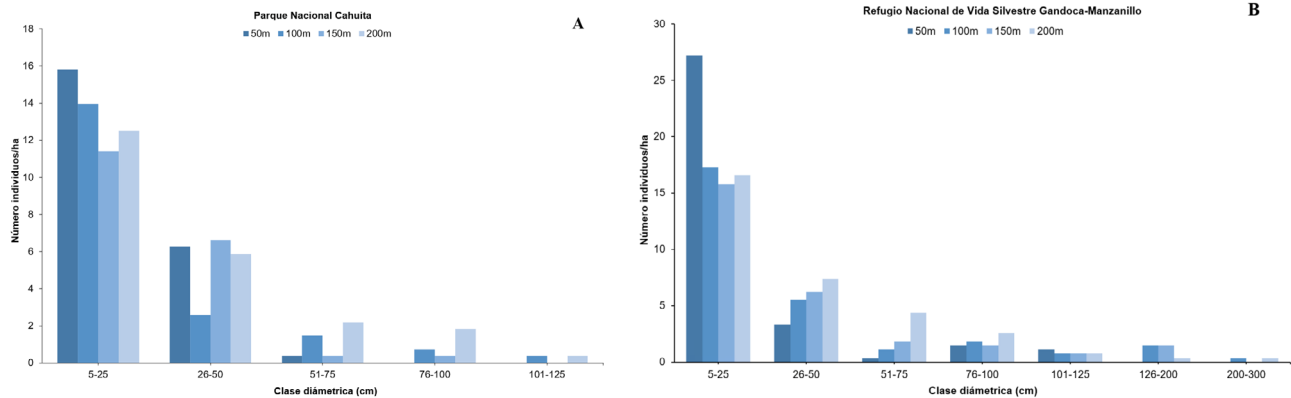


Figura 3. Distribución de la densidad de individuos vegetales (Ind/ha) según la clase diamétrica en bosques costeros según la distancia respecto al mar. a) Parque Nacional Cahuita; b) Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón, Costa Rica.

similitud. Los valores más altos para este análisis se ubicaron en las parcelas del PNC entre los 150 m y 200 m (54 %) y en el REGAMA entre 50 m y 150 m (55 %). De igual forma, el índice de diversidad de Shannon-Weaver (H) mostró que la heterogeneidad del bosque del REGAMA es ligeramente más alta (3.223), mientras que la del PNC es menos heterogénea (2.795).

Proceso Analítico Jerarquizado para el bosque costero del PNC y del REGAMA

Se determinó que seis familias con diez especies mostraron aportes a la ponderación obtenida del PAJ que superaron el 50 %, por lo que fueron catalogadas como prioridad alta. En el caso del REGAMA, este ensamble fue de cinco familias y cinco especies con esa misma prioridad.

Se destacan la presencia de *Prioria copaifera* (Cativo), *Lonchocarpus heptaphyllus* (Chaperno), *Pterocarpus officinalis* (Sangrillo), *Rhizophora mangle* (Mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (Mangle botón) y *Tabernamontana alba* (Huevos de toro), como las especies que tienen mayor frecuencia en la zona que se distribuye a lo largo de la franja de 200 m, por lo cual puedan ser plantas con alto poder de regeneración ante los efectos de la intrusión salina y de la erosión costera.

Las familias Fabaceae y Rhizophoraceae denotaron los mayores valores en cuanto a las especies que evidenciaron mayor peso en el Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ). Este aspecto coincide con lo detectado en las familias botánicas de mayor representación por especie según la distancia respecto al mar.

Para el PNC, se detectaron aproximadamente el 25 % de las parcelas con prioridad alta y media, en donde se destaca la frecuencia de registro de *P. copaifera*, *L. heptaphyllus*, *Pt. officinalis* y *Cassipourea elliptica* (Limocillo), como árboles que pueden permanecer tanto en la duna de las playas arenosas, como hacia el interior de los bosques en la totalidad de la franja de 200 m (Fig. 5).

Por otro lado, en el REGAMA se observó la separación de 13 parcelas con prioridad alta. En contraste con el PNC,

la especie de mayor frecuencia corresponde a *R. mangle*, que no muestra algún tipo de zonificación en la franja de 200 m respecto a la costa. La composición de especies difiere únicamente en el 25 % con la detectada en el PNC, siendo de menor diversidad en los primeros metros, pero siempre con árboles que pueden ubicarse desde los 50 m hacia el interior del continente (Fig. 5).

DISCUSIÓN

Los procesos de erosión que han afectado en la última década al PNC y al REGAMA, superan los cambios a nivel del paisaje y de morfología de las playas. El ingreso del mar hacia el continente en ambos lugares tiene un efecto que incide en el deterioro de la barrera natural (Piedra-Castro *et al.*, 2021), dando paso a cambios en las condiciones físico-químicas del suelo y por consiguiente, en la composición y estructura de los bosques costeros.

Este comportamiento que degrada la salud ecosistémica de los bosques costeros del PNC y REGAMA ocurre al producirse ingreso de grandes volúmenes de agua salada, que provoca problemas para la absorción de fosfatos, nitratos y variación en la capacidad de asimilación de la sal (Kooijman *et al.*, 2020), reducción en la productividad y diversidad de las plantas (Megonigal y Neubauer, 2019), lo cual se traduce en cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales asociadas a la duna y hacia lo interno del continente (Paul y Rashid, 2017), con la consecuente reducción de la función barrera que ejercen (Lovelock *et al.*, 2015; Xie *et al.*, 2022) y la pérdida generalizada de la redundancia funcional del ecosistema (Capolupo *et al.*, 2020).

En este sentido, los bosques costeros del PNC y REGAMA mostraron variación en la composición de familias botánicas respecto a la distancia del mar, siendo Fabaceae, Rubiaceae y Rhizophoraceae las que registraron mayor cantidad de especies en las distintas parcelas ubicadas entre 50 m y 200 m. Según Miller (2015), factores como la brisa salina, la humedad del suelo y el desplazamiento de la arena son parte de los agentes responsables de la zonificación de

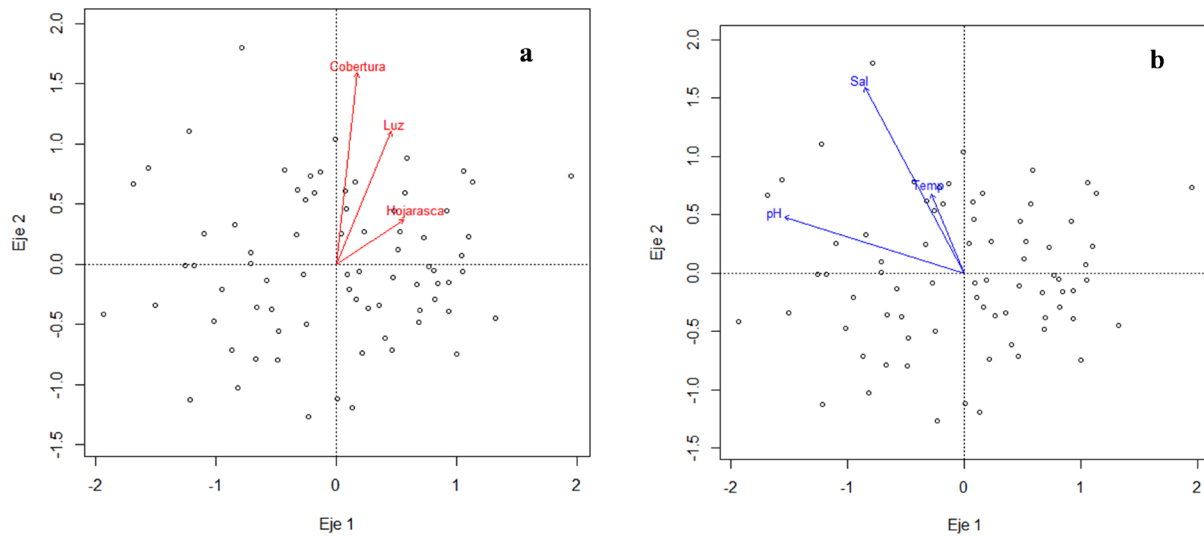


Figura 4. Escalamiento multidimensional no métrico (EMDN) para a) variables ambientales (intensidad de la luz, cobertura del dosel) y b) variables químicas (salinidad, pH) evaluadas en el bosque costero del Parque Nacional Cahuita y Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón, Costa Rica.

la vegetación costera. Esto explica por qué dichas familias son las que tienen mayor frecuencia en las parcelas, debido a las características biológicas que mantienen y que las hacen tolerantes a las condiciones extremas que provoca la intrusión salina y la erosión de la costa (Collantes-Chávez *et al.*, 2019; Capolupo *et al.*, 2020).

Se destaca que, en ambas AP, el 70 % o más de las especies de árboles pueden crecer bajo condiciones complejas como las que ocasiona la intrusión salina, no solo en los primeros metros de la playa, sino en los pantanos y bosques inundados que conforman los ecosistemas continentales. Una comunidad vegetal diversa como ésta actúa como barrera natural protegiendo los hábitats intermareales y continentales (Agir *et al.*, 2017) al tiempo que reduce la afectación de otras asociaciones vegetales que podrían ser impactadas por los embates del mar (Ryan *et al.*, 2023).

En ambas AP, se destaca la presencia *P. officinalis* (Sangrillo), *P. copaifera* (Cativo), *L. heptaphyllus* (Chaperno blanco), *Posoqueria latifolia* (Guayaba de mono), *C. elliptica* (Limoncillo), *R. mangle* (Mangle rojo) y *Talipariti tiliaceum* (Algodoncillo), que no mostraron zonificación a lo largo de los 200 m, siendo parte de las heliófitas durables (crecimiento rápido e ingreso de alta cantidad de luz) y halófitas (tolerantes al ingreso de agua salada) presentes en los bosques costeros de las zonas bajas de Costa Rica (Brenes, 2013). Este grupo de especies pueden ser consideradas como estabilizadoras del sedimento que ingresa a las playas arenosas, dado que tienen la capacidad de soportar la intrusión salina y el enterramiento (Miller *et al.*, 2010; Feagin *et al.*, 2019) contribuyendo a la disminución del impacto que ocasiona la erosión costera.

A nivel estructural, los bosques costeros del PNC y REGAMA se comportaron de manera similar tomando como referencia las clases diamétricas pequeñas, sin embargo, se destaca que esta tendencia a la disminución en el tamaño del DAP en valores por debajo de 25 cm, es un indicador de la etapa de desarrollo en la que se encuentran estos ecosistemas (Imaña *et al.*, 2011), comportamiento que es propio de sistemas boscosos jóvenes o en regeneración (Brenes *et al.*, 2019), el cual se espera aparezca en una etapa posterior a un evento de disturbio como el provocado por la erosión costera en la última década en el Caribe Sur, Costa Rica.

Por otro lado, la caracterización de los gradientes ambientales mostró la presencia de diferencias en la salinidad del suelo, el pH y la acumulación de materia orgánica. Estas condiciones afectan principalmente a las zonas que experimentan procesos erosivos intensos, lo cual incide en la pérdida de nutrientes y en la variación de textura del suelo, ambas características tienen el potencial para propiciar cambios en el sustrato disponible, provocando afectación en la riqueza y diversidad funcional de los ecosistemas (Collantes-Chávez *et al.*, 2019).

Esta conformación de gradientes ambientales en los bosques costeros del PNC y del REGAMA sugiere incidencia del mar en los parámetros físico-químicos que determinan la distribución espacial de las especies que se ubican en zonas con procesos erosivos críticos, lo cual incrementa el estrés, la vulnerabilidad y la amenaza sobre las comunidades de plantas (Frías-Ureña *et al.*, 2022). Esta alteración de la dinámica costera afecta los espacios posteriores a la duna, lo que ocasiona cambios en las comunidades vegetales debido

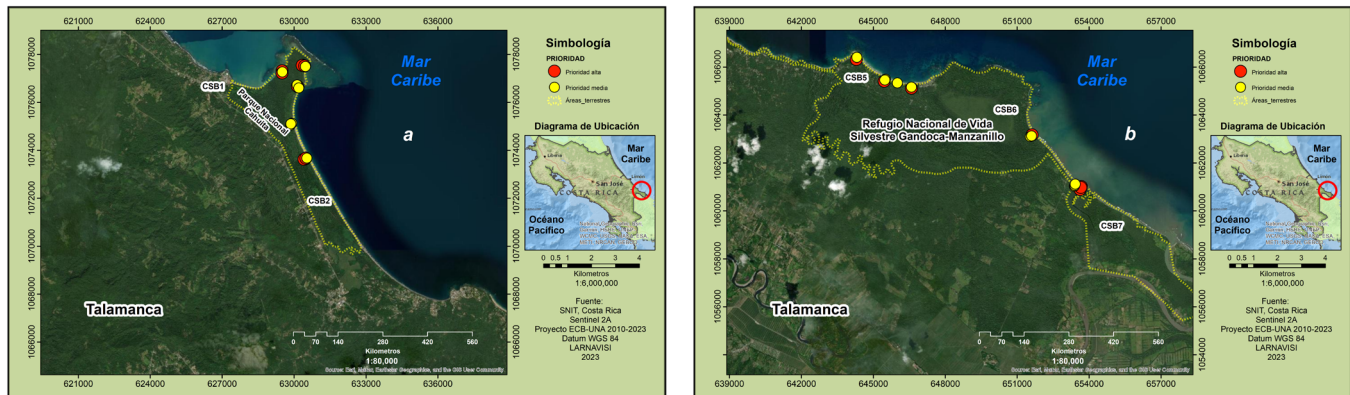


Figura 5. Priorización alta y media basada en el Proceso Analítico Jerarquizado de las parcelas ubicadas en el bosque costero a) Parque Nacional Cahuita; b) Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón, Costa Rica.

a la caída en la disponibilidad de los recursos, alta exposición al ingreso de agua de mar y deterioro de la costa.

El suelo de ambas AP mostró variación con relación a la distancia respecto al mar, las parcelas ubicadas en los primeros 50 m contenían proporcionalmente mayor cantidad de arena, misma que se redujo paulatinamente conforme se aleja hacia el continente, dando paso a un mayor porcentaje de limo y arcilla. Del Vecchio *et al.*, (2015), concluye que las comunidades vegetales presentan respuestas fisiológicas directas cuando ocurren cambios en la disponibilidad de los nutrientes, lo cual también incide en los patrones espaciales o de distribución de las especies.

La condición edafológica de ambas AP actúa de forma sinérgica con los parámetros físico-químicos, propiciando la conformación de comunidades vegetales que resisten el proceso erosivo, siendo las plantas que se ubican en los primeros metros del bosque costero, las que experimentan variación en las condiciones ecológicas y biológicas producto de la presión del disturbio. Estos factores evidenciaron su impacto al provocar zonificación de la vegetación en los primeros metros de la franja costera, lo cual posiblemente se relaciona con la tolerancia ante la salinidad y caída en la disponibilidad de materia orgánica en los primeros 50 m.

El análisis de Bray Curtis, evidencio que en el PNC y el REGAMA, 38 % de similitud entre las especies de árboles que se encuentran en las parcelas de los primeros 50 m, las cuales son poco diversas y homogéneas, mientras que el 62 % restante evidenció diferencias en cuanto a la composición. Los que se ubicaron entre 100 m y 200 m son particularmente importantes para la conformación de estructuras ecológicas complejas, ya que pueden ubicarse espacialmente en cualquier lugar, desde la costa hasta el interior del bosque, de ahí que son las que aportan mayor integridad ecológica y por lo tanto, ser las que ofrezcan mayor resistencia a la tendencia erosiva de las playas arenosas.

En relación con lo anterior, Lindquist (2003); Hwang *et al.*, (2016); Rincón *et al.* (2020), señalan que la densidad de especies vegetales en franjas costeras puede variar conforme

se experimenta una separación de éstas respecto a la costa, y su presencia está determinada por la influencia del clima, la pendiente, la conductividad eléctrica, el porcentaje arcilla-limo, patrón del viento y la salinidad del suelo, siendo estos considerados los principales factores que determinan la composición, estructura y diversidad de la vegetación (Brenes, 2013).

Este conjunto de factores ambientales y edafológicos son los que podrían condicionar no solo la estructura del bosque costero de ambas AP, sino la distribución espacio temporal de ésta, principalmente por los efectos que supone el incremento de los eventos erosivos de las playas arenosas como resultado del cambio climático y el incremento del nivel medio del mar.

Proceso Analítico Jerarquizado para el bosque costero del PNC y del REGAMA

El ensamblaje vegetal obtenido mostró características como la rapidez del crecimiento, la ubicación espacial respecto al mar y las asociaciones vegetales que pueden colonizar. Las cuales contribuyen a mantener la redundancia funcional de los bosques costeros. Estas características que afectan la permanencia de este tipo de ecosistemas barrera ayudan de manera efectiva en el equilibrio del sistema sedimentario de la costa y a la respuesta que se presenta ante la presión que ocasiona la erosión de las playas arenosas de estas áreas protegidas.

Los bosques costeros del PNC y del REGAMA pueden responder ante los disturbios que ocasiona la erosión, sin embargo, es importante destacar que la tendencia del desplazamiento de la línea costera puede en el mediano plazo limitar no solo la riqueza con la que cuentan, sino simplificar las comunidades asociadas, al darse una pérdida de servicios ecológicos y ambientales, principalmente de aquellas áreas expuestas en los primeros 50 m perpendiculares a la costa. La desaparición de especies y homogenización de los hábitats del bosque costero de ambas AP puede afectar en

el mediano plazo las funciones ecosistémicas fundamentales con repercusiones directas en los servicios ecológicos que ofrecen (Del Vecchio *et al.*, 2016).

En términos generales, la composición de especies de árboles que se ubican entre los 100 m y los 200 m de la costa del PNC y del REGAMA son comunes, con crecimientos rápidos y con facilidad para establecerse en distintos tipos de asociaciones vegetales, lo que los convierte en individuos con gran potencial para ser utilizados en proyectos de restauración de dunas o para crear barreras naturales que mitiguen el efecto de la erosión, tal es el caso de *P. officinalis*, *P. copaifera* y *L. heptaphyllus*, las cuales son comunes en las zonas pantanosas de ambos lugares.

Sin embargo, los hallazgos obtenidos en esta investigación abren un espacio para la generación de información a diferentes escalas y en distintos tipos de hábitats costeros, que permitan comprender la dinámica de la sucesión de estas especies y su estrecha relación con la estabilidad del sistema sedimentario de las playas arenosas. Entre mayor sea la diversidad de plantas que soportan la erosión costera mayor será la resistencia y tolerancia a los eventos climáticos, lo cual contribuye a disminuir la vulnerabilidad de las playas arenosas, facilitando la reducción de los impactos posterior a eventos meteorológicos extremos (Miller, 2015; Maximiliano-Cordova *et al.*, 2021).

Si bien es cierto, estos bosques costeros del PNC y del REGAMA parecen ofrecer una alternativa ante los disturbios que ocasiona la erosión de la costa, su integridad ecológica se reduce cada vez que varían por largos periodos las condiciones ambientales y edafológicas, ya que se ven afectados por el ingreso continuo y constante de agua salada, lo que reduce la capacidad de soportar las perturbaciones (Del Vecchio *et al.*, 2016; Ryan *et al.*, 2023). La información que se desprende de esta investigación es importante para la formulación de indicadores orientados a la estructura comunitaria, la diversidad de especies clave y la alteración de procesos ecológicos en zonas con presión por erosión costera en AP.

El bosque costero del PNC y REGAMA sufre impactos que se vinculan con la erosión costera, incluyendo la caída continua de árboles y la pérdida de terreno continental, lo cual afecta la función barrera y la disipación de la energía del oleaje que ingresa en ellos. Silva *et al.* (2016) y Bryant *et al.* (2019) concluyen que existe un rol importante de la vegetación emergente principalmente al favorecer la estabilización de la morfología de las costas y en particular de las dunas, las cuales responden de manera asertiva en presencia de plantas que logren minimizar el impacto del oleaje de alta intensidad. De ahí que los bosques costeros del PNC y el REGAMA ofrecen un servicio biológico poco investigado, y con afectación directa por los procesos de erosión que atraviesan estas AP del Caribe Sur de Costa Rica (Castillo-Chinchilla *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

La erosión de la costa tiene influencia sobre la composición del bosque costero y en los gradientes ambientales tanto en el PNC y como en el REGAMA, cuyas consecuencias directas afectan principalmente la comunidad de árboles de los primeros 50 m de las playas arenosas, sin embargo, existen especies que logran establecerse a lo largo de la franja de 200 m aún con la presión que ocasiona dicha pérdida de funcionalidad.

La presión que ocasiona la erosión costera en el PNC y el REGAMA contribuye a que se establezca un ensamble básico de especies de árboles que funcionan como estabilizadores de la línea costera y que se distribuyen a lo largo de la costa, lo que es importante con miras a la implementación de barreras naturales que mitiguen el efecto de dicho disturbio.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

MCCH: Diseño del estudio, recolección de datos y especímenes de campo, identificación de especies de árboles, análisis espacial y redacción del manuscrito. LPC: Participación del diseño, búsqueda de financiamiento, revisión del contenido y correcciones del manuscrito. JPCH: Revisión del contenido y aportes en la interpretación de los resultados. LSS: Revisión del contenido y aportes en la interpretación de los resultados. JCS: Análisis estadísticos e interpretación de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación de Estados del Caribe (AEC) por su apoyo durante el desarrollo de la investigación, en el marco del proyecto 0242-18 Evaluación del impacto del Cambio climático en las costas arenosas del Caribe: alternativas para su control y resiliencia. Y a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Costa Rica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses que puedan influir en los resultados o interpretaciones presentadas en este artículo.

REFERENCIAS

- Agir, S. U., Kutbay, H. G., Surmen, B. and Elmas, E. (2017). The effects of erosion and accretion on plant communities in coastal dunes in north of Turkey. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 28(1), 203-224. <https://doi.org/10.1007/s12210-017-0599-x>
- Ajedegba, J. O., Choi, J. W. and Jones, K. D. (2019). Analytical modeling of coastal dune erosion at South Padre Island: A consideration of the effects of vegetation

- roots and shear strength. *Ecological engineering*, 127, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.020>
- Bazzichetto, M., Sperandii, M. G., Malavasi, M., Carranza, M. L. and Acosta, A. T. R. (2020). Disentangling the effect of coastal erosion and accretion on plant communities of Mediterranean dune ecosystems. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 241, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106758>
- Brenes, P. (2013). *Composición y estructura de la vegetación de la línea de costa de un bosque tropical seco, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de maestría]. Universidad Estatal a Distancia. UNED. <https://www.uned.ac.cr/ecologiaurbana/images/pdf/Paola-Brenes.pdf>
- Brenes-Chaves, L., Méndez-Cartín, A. L., Sánchez-Toruno, H., Montero-Flores, W., Barquero-Elizondo, A. S. y Hernández-Sánchez, L. G. (2019). Análisis de la composición y estructura del bosque secundario en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional, Guanacaste, con miras a su restauración. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 33-42. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4417>
- Bryant, D. B., Anderson, M. A., Sharp, J. A., Bell, G. L. and Moore, C. (2019). The response of vegetated dunes to wave attack. *Coastal Engineering*, 152, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103506>
- Castillo-Chinchilla, M. A., Piedra-Castro, L., Pereira Chaves, J. M., Sierra Sierra, L. y Carvajal Sánchez, J. P. (2023). Variación espacial y multitemporal de la línea de costa en playas arenosas del Caribe Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, 111, 1-20. <https://doi.org/10.14350/rig.60726>
- Collantes-Chávez, A., Alanis-Rodríguez, E., Yam-Uicab, O., López-Contreras, C., Sarmiento-Muñoz, T. and Tapia-Muñoz, J. L. (2019). Composition, structure, and diversity of coastal vegetation in the northeastern of Cozumel, Mexico. *Botanical Sciences*, 97(2), 135-147. <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.2044>
- Capolupo, A., Saponaro, M., Fratino, U. and Tarantino, E. (2020). Detection of spatio-temporal changes of vegetation in coastal areas subjected to soil erosion issue. *Aquatic Ecosystem Health y Management*, 23(4), 491-499. <https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1802983>
- Cazenave, A. and Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15-34. <https://doi.org/10.1002/2013EF000188>
- Dávila, O., Ramírez, E. y Barbosa, T. (2005). *El manejo de un tacotal*. Editorial Pascal Chaput. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/10641/A0897e.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20tacotal%3F,casi%20nada%20de%20plantas%20espinosas>
- Del Vecchio, S., Prisco, I., Acosta, A. T. R. and Stanisci, A. (2015). Changes in plant species composition of coastal dune habitats over a 20-year period. *AoB PLANTS*, 7, 1-10. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv018>
- Del Vecchio S, Slaviero A, Fantinato E. and Buffa G. (2016). The use of plant community attributes to detect habitat quality in coastal environments. *AoB PLANTS*, 8, 1-14. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plw040>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2021). ArcGIS Release 10.8. Redlands, CA.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Roma, Italia. <http://www.fao.org/publications/card/en/c/0f070cdd-1b6d-53fa-add15c972fb299d2/>
- Feagin, R. A., Furman, M., Salgado, K., Martínez, M. L., Innocenti, R. A., Eubanks, K., Figlus, J., Huff, T. P., Sigren, J. and 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>
- Frías-Ureña, H. G., Ruiz-Corral, J. A., Macías-Rodríguez, M. Á., Durán, N., González, D., De Albuquerque, F. and Torres, J. P. (2022). Relationship between the distribution of vegetation and the environment in the coastal embryodunes of Jalisco, México. *PeerJ*, 10, e13015. <https://doi.org/10.7717/peerj.13015>
- Garner, K. L., Chang, M. Y., Fulda, M. T., Berlin, J. A., Freed, R. E., Soo-Hoo, M. M., Revell, D. L., Ikegami, M., Flint, L. E., Flint, A. L. and Kendall, B. E. (2015). Impacts of sea level rise and climate change on coastal plant species in the central California coast. *PeerJ*, 3, 1-23 <https://doi.org/10.7717/peerj.958>
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B. and Silliman, R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7-29 <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>
- Gillespie, T. W., Grijalva, A. and Farris, C. N. (2000). Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant Ecology*, 147(1), 37-47. <https://doi.org/10.1023/A:1009848525399>
- Griggs, G. and Reguero, B. (2021). Coastal adaptation to climate change and Sea-Level rise. *Water*, 13(16), 2151. <https://doi.org/10.3390/w13162151>
- Hwang, J. S., Choi, D. G., Choi, S. C., Park, H. S., Park, Y. M., Bae, J. J. and Choo, Y. S. (2016). Relationship between the spatial distribution of coastal sand dune plants and edaphic factors in a coastal sand dune system in Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 39(1), 17-29. <http://dx.doi.org/10.5141/ecoenv.2016.003>
- Imaña, J., Antunes Santana, O. y Rainier Imaña, C. (2011). Estructura diamétrica de un fragmento del bosque tropical seco de la región del eco-museo del cerrado, Brasil. *Colombia Forestal*, 14(1), 23-30. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a02>

- Kooijman, A., Morriën, E., Akkerhuis, G. J., Missong, A., Bol, R., Klumpp, E., Van Hall, R., Van Til, M., Kalbitz, K. and Bloem, J. (2020). Resilience in coastal dune grasslands: pH and soil organic matter effects on P nutrition, plant strategies, and soil communities. *Ecosphere*, 11(5), 1-43. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3112>
- Kobayashi, N., Gralher, C. and Do, K., (2013). Effects of woody plants on dune erosion and overwash. *J. Waterw. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(6), 466-472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000200)
- Lane, C., Wright, S. J., Roncal, J. and Maschinski, J. (2008). Characterizing environmental gradients and their influence on vegetation zonation in a subtropical coastal sand dune system. *Journal of Coastal Research*, 24(3), 213-224. <https://doi.org/10.2112/07-0853.1>
- Lindquist, E. S. (2003). *Patterns of coastal composition, structure and recruitment, Costa Rica: Functions of an environmental gradient, seed rain distribution and crab predation pressure*. http://getd.libs.uga.edu/pdfs/lindquist_erin_s_200308_phd.pdf
- Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Friess, D. A., Guntenspergen, G. R., Krauss, K. W., Reef, R., Rogers, K., Saunders, M. L., Sidik, F., Swales, A., Saintilan, N., Thuyên, L. X. and Tran, T. (2015). The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature*, 526(7574), 559-563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- Maximiliano-Cordova, C., Martínez, M. L., Silva, R., Hesp, P. A., Guevara, R. and Landgrave, R. (2021). Assessing the impact of a winter storm on the beach and dune systems and erosion mitigation by plants. *Frontiers in Marine Science*. 8(1), 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.734036>
- Mendoza, E., Odériz, I., Martínez, M. L. and Silva, R. (2017). Measurements and modelling of small scale processes of vegetation preventing dune erosion. *Journal of Coastal Research*, 77(1), 19-27. <https://doi.org/10.2112/SI77-003.1>
- Megonigal, J y Neubauer, C. (2019). Biogeochemistry of tidal freshwater wetlands. En G. Perillo, E. Wolanski, D. R. Cahoon, y C. S. Hopkinson (Eds.), *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach* (pp 641-683). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63893-9.00019-8>
- MINAET. (2011) *Manual para la clasificación de tierras dedicadas a la conservación de los recursos naturales dentro de la zona marítimo terrestre en Costa Rica*. <https://www.snitcr.go.cr/pdfs/leyes/DE-36786-MINAET.pdf>
- Miller, T. E., Gornish, E. S. and Buckley, F. L. (2010). Climate and coastal dune vegetation: disturbance, recovery, and succession. *Plant Ecology*, 206(1), 97-104. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9626-z>
- Miller, T. E. (2015). Effects of disturbance on vegetation by sand accretion and erosion across coastal dune habitats on a barrier island. *AoB PLANTS*, 7, 1-10. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv003>
- Mimura, N. (2013). Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 89(7), 281-301. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.281>
- Odum, E y Barrett, G. (2006). *Fundamentos de Ecología*. México, D. F: Thomson.
- Paul, B. K. and Rashid, H. (2017). Salinity intrusion and impacts. In B. K. Paul, and H. Rashid (Eds.), *Climatic Hazards in Coastal Bangladesh, Non-Structural and Structural Solutions* (pp. 153-182). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805276-1.00005-3>
- Piedra-Castro, L; Castillo-Chinchilla, M. and Morales-Cerdas, V. (2021). Characterization of sandy beaches of the southern Caribbean of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 34(3),120-133. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5197>
- Rangel, J. y Velázquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En J. Rangel-Ch., P.D. Lowy-C., y M. Aguilar-P. (Eds.), *Diversidad Biótica II. Tipos de Vegetación en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rincón, M., Infante-Mata, D., Moreno-Casasola, P., Hernández, M. E., Macías, E y García-Alfaro, J. R. (2020). Patrones de distribución y estructura de la vegetación en el gradiente de humedales costeros El Castaño, Chiapas, México. *Revista De Biología Tropical*, 68(1), 242-259. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.37616>
- Ryan, C., Case, B. S., Bishop, C. D. and Buckley, H. L. (2023). Ecosystem integrity of active sand dunes: A case study to implement and test the SEEA-EA global standard, from Aotearoa New Zealand. *Ecological Indicators*, 149, 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110172>
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical. Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Saaty, T. (2001). Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Schmoldt DL, Kangas J, Mendoza G, Pesonen M, (Eds). The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2
- Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E. and Feagin, R. A. (2016). Response of vegetated dune-beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering*, 109, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.12.007>
- Xie, D., Schwarz, C., Kleinhans, M. G., Zhou, Z. and Van Maanen, B. (2022). Implications of coastal conditions and Sea-Level rise on mangrove vulnerability: A Bio-Morphodynamic Modeling study. *Journal of Geophysical Research*, 127(3), 1-28. <https://doi.org/10.1029/2021jf00630>
- Yincan, Y., Xianghua, L., Guofu, P., Qitong, L., Zhenye, Z., Dujuan, L., Xiaoling, C., Yanji, W., Junren, C., Taojun, H., Chen, X., Taoju, H., Xitu, C., Wenhuan, Z., Quanxing, Li., Shuangfeng, T., Dong, L. and Xin, H. (2017). Coastal erosion. En Y. Yincan, (Ed.), *Marine Geo-Hazards in China* (pp. 269-296), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812726-1.00007-3>