Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Entre cielo, mar y tierra: la duna costera en el Caribe mexicano

"Between Sky, Sea, and Land: The Coastal Dune in the Mexican Caribbean"

Gayosso-Soto, E.[1], Cohuo, S.[1]*, Tello-Chan, J.M.[2], Hernández-Hernández, P.[1], Huix, C.M.[1]

[1] Tecnológico Nacional de México/IT de Chetumal, Av. Insurgentes 330, Chetumal 77013, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9836-9110, https://orcid.org/0000-0002-7826-5303*, https://orcid.org/0009-0000-9625-5355, https://orcid.org/0000-0002-5081-2424.

[2] Tecnológico Nacional de México/IT de Cancún, Av. Rodrigo Gómez (Kabah) Km. 3, Centro, Cancún 77515, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9619-7264.

d02390194@chetumal.tecnm.mx; sergio.cd@chetumal.tecnm.mx*; jorge.tc@chetumal.tecnm.mx d12390410@chetumal.tecnm.mx; d12390746@chetumal.tecnm.mx

Innovación Tecnológica: Reconocimiento, monitoreo y evaluación del sistema de duna costera mediante el uso de drones con sensor LiDAR en el Caribe mexicano (CM).

Área de aplicación industrial: Conservación y manejo de ecosistemas con aplicaciones en el sector turismo y desarrollo costero.

Recibido: 30 noviembre 2025
Aceptado: 19 mayo 2026

Abstract

The coastal dune (CD) is a natural sand formation that extends along seas and oceans, generally aligned parallel to the shoreline. Its height can range from a few centimeters to up to 130 meters, forming continuous or interrupted sand ridges that may extend several kilometers inland. The development, morphology, and stabilization of the dune system are determined by wind direction and velocity, sand availability, and the amount and type of vegetation present. The topographic profile of the dune system is composed of an embryonic dune, a primary foredune, and secondary and tertiary foredunes. Its structure and species composition vary from areas near the sea to more protected inland zones, where the accumulation of organic matter, water availability, pH, and salt spray become more stable. The vegetation types and species composition in tropical, subtropical, and temperate regions are typically diverse. Overall, dunes and their associated vegetation provide coastal protection against the erosive effects of storms and hurricanes, reducing impacts by approximately 36% and 64%, respectively. In addition, they provide food and shelter for a wide range of coastal fauna.

In the Mexican Caribbean (MC), a frontal dune ecosystem develops as a sand ridge extending along the coastline, either continuously or discontinuously, with variable width and elevations ranging from 5 m to over 12 m. Approximately 3% of this ecosystem is located in the southern portion of the MC, where the present study area is situated, between El Placer and Pulticub. This study aims to demonstrate the effectiveness of aerial photogrammetry integrated with LiDAR sensors for the rapid and efficient monitoring and analysis of coastal environments. The evaluated area is characterized by a relatively narrow beach associated with an immediate frontal dune exhibiting a gentle slope (0.5 m to 1 m). Its topographic profile lacks clearly distinguishable embryonic and primary dunes. Creeping herbaceous vegetation develops in areas close to the shoreline, extending across the beach and dune slope, transitioning into shrub–herbaceous vegetation from the crest up to approximately 85 m inland, adjacent to the coastal road. The floristic community is in a good state of conservation, with substantial vegetation cover and plant heights ranging from 3 m to 13 m. The establishment of sampling sites, combined with the use of drones and LiDAR sensors for the characterization and analysis of coastal dunes and their associated vegetation, proved to be an efficient technological approach. The implementation of these technologies can support improved decision-making and the development of conservation and monitoring strategies for coastal ecosystems.

Keywords: Coastal dune, Topographic profile, Vegetation, Mexican Caribbean.

Resumen

La duna costera (DC), es una formación natural de arena que se extiende a lo largo de los mares y océanos alineada generalmente paralelo a la costa. Pueden medir desde unos centímetros hasta 130 metros de altura, formando cordones de arena continuos o interrumpidos, llegando a extenderse varios kilómetros tierra adentro. El desarrollo, forma y estabilización de la DC está determinado por la dirección y velocidad del viento, la disponibilidad de arena y la cantidad y tipo de vegetación presente. El perfil topográfico del sistema dunar está constituido por una duna embrionaria, una duna frontal primaria y dunas frontales secundarias y terciarias. Su estructura y composición de especies es variable desde zonas próximas al mar a zonas internas más protegidas dónde la acumulación de materia orgánica, agua, pH y aspersión salina es más estable. El tipo de vegetación por especies en las zonas tropical, subtropical o templada suele ser diversa. En conjunto duna y vegetación protegen a la zona costera contra el efecto erosivo de tormentas y huracanes entre un 36% y 64%, respectivamente. Además, brindan alimento y refugio a una gran cantidad de fauna costera. En el Caribe mexicano (CM), se desarrolla un ecosistema de duna tipo frontal, como cordón de arena acumulada que corre a lo largo de la costa, de forma continua y/o discontinua; con variada amplitud, alcanzando alturas entre 5 m y > 12 m. En la porción sur del CM se encuentra el 3% de este ecosistema, en esta región se concentra el área de estudio, comprendida entre el Placer y Pulticub. Este estudio tiene como objetivo demostrar la efectividad de la fotogrametría aérea integrada con sensores LiDAR para el monitoreo y análisis rápido y eficiente de los ambientes costeros. El área evaluada, presentó una playa poco extensa asociada a una duna frontal inmediata con pendiente suave y poco pronunciada (0.5 m a 1 m). Su perfil topográfico carece de duna

embrionaria y de duna primaria identificables. La vegetación herbácea-rastrera inicia su desarrollo en zonas cercanas al mar sobre la playa y pendiente de duna, cambiando a vegetación arbustiva-herbácea a partir de la cresta hasta ~85 m colindante con el camino costero. La comunidad florística se encuentra en buen estado de conservación con cobertura relevante, presentando alturas entre 3 m y 13 m, respectivamente. El establecimiento de sitios de muestreo combinado con el uso de drones y sensor LiDAR para la caracterización y análisis de la duna costera y su vegetación asociada resultaron ser herramientas tecnológicas eficientes. La implementación de esta tecnología puede ayudar a tener un mejor panorama en la toma decisiones y en la generación de estrategias de conservación y monitoreo de los ecosistemas costeros.

Palabras clave: duna costera, perfil topográfico, vegetación, Caribe mexicano.

1. Introducción

La duna costera (DC) de tipo frontal es una formación natural de arena que se extiende a lo largo de los mares y océanos alineada generalmente paralela a la costa. Se forma con el paso del tiempo a través de la acción del viento que transporta y acumula arena en zonas costeras [1-2]. Pueden medir desde unos centímetros hasta 130 metros de altura, formando cordones de arena continuos o interrumpidos, que llegan a extenderse varios kilómetros tierra adentro y a lo largo del litoral costero [2-3]. Los diferentes tipos de dunas se clasifican en base en su morfología y dinámica eólica en barjanes, barjanoides, transversales, longitudinales, parabólicas y en estrella [4]. Algunas de las cuales pueden presentar vegetación costera [3-5]. Ley-Vega de Seoane et al. [6], clasifica las dunas frontales en embrionarias, primarias, secundarias y terciarias. Hesp [7], señala que las dunas frontales se forman a partir de dunas incipientes y se distinguen por el desarrollo de especies vegetales intermedias de composición y estructura leñosa (árboles y arbustos). Las dunas costeras no siempre mantienen la misma forma y estructura. Las dunas nacientes se conocen como primarias, porque intercambian activamente sedimentos con la playa. Las dunas secundarias, son generalmente dunas primarias antiguas que ya no forman parte de la zona litoral debido a que han ganado terreno al mar por acumulación excesiva de arena (sedimento). Las dunas terciarias son acumulaciones de arenas que se ubican en la zona más protegida del perfil de la duna, alejada de los factores extremos del mar; aquí la estructura y composición de especies es distinta con mayor cobertura vegetal, además la concentración de materia orgánica es más abundante [8].

Las dunas pueden moverse por la dirección, fuerza e intensidad del viento, por las mareas y oleaje y pueden clasificarse como móviles aquellas dunas que se ven afectadas por el intemperismo y factores ambientales, cambiando de forma y posición constantemente; dunas semimóviles que son dunas más estables que por lo general mantienen cierta vegetación, pero que no dejan de estar expuestas a los factores climáticos y pueden cambiar en un gradiente de altura y extensión; y las dunas estabilizadas, que mantienen vegetación, encontrándose bien definida la altura y extensión y que a diferencia de las anteriores, los factores ambientales no llegan a afectarle considerablemente [2, 5, 9].

Las DC´s son importantes porque proveen servicios ecosistémicos a las personas. Cuando ocurren fenómenos naturales como huracanes, tormentas y oleaje, estos actúan como un escudo natural, que protege playas y

comunidades costeras [9]. También son el hábitat de innumerables especies de plantas y animales. Hay fauna endémica que solo vive en este tipo de ecosistema, por ejemplo, muchos crustáceos, anfípodos o talitridos conocidos como isópodos (*Ligia spp*.), arácnidos, tardígrados y plantas halófitas que se han adaptado a las condiciones extremas (alta salinidad y temperaturas elevadas) de la duna [10-12]. Las aves marinas, son visitantes frecuentes de las dunas, ya que las utilizan para comer, reproducirse, descansar o anidar, ejemplo de ello son el chorlitejo patinegro (*Charadrius alexandrinus*), chorlito nevado (*Charadrius nivosus*), gaviota reidora (*Leucophaeus atricilla*) y la golondrina marina común (*Sterna hirundo*) [10]. Otras especies como las tortugas, depende de ellas para anidar, como la tortuga blanca o verde (*Chelonia mydas*), la tortuga caguama (*Caretta caretta*), la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) y la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) [10, 13, 14]. Algunas especies de lagartijas como la lagartija de arena de Cozumel (*Aspidoscelis cozumela*) y el gecko de las dunas (*Phyllodactylus tuberculosus*), así como muchos crustáceos como el cangrejo fantasma (*Ocypode quadrata*), cangrejo ermitaño (*Coenobita clypeatus*) [10, 15-17]. También podemos encontrar una gran variedad de pequeños mamíferos como el murciélago pescador mayor (*Noctilio leporinus*) y roedores como el ratón de arena de Yucatán (*Peromyscus yucatanicus*) o el ratón de Cozumel (*Peromyscus cozumelae*) que interactúan dentro de esto ecosistemas y pasan una parte significativa de su ciclo de vida [18]. Otras especies de mayor tamaño, como los jaguares (*Panthera onca*) y los tapires (*Tapirus bairdii*) utilizan estas zonas para alimentarse [19]. Incluso en los diminutos espacios entre los granos de arena (intersticios) que parecieran inhabitables por su pequeño tamaño, prosperan bacterias, hongos, nemátodos y pequeños artrópodos (insectos principalmente) [10,11,20].

2. Vegetación asociada al perfil de la duna costera

La vegetación es un elemento muy importante en la duna costera, porque ramas y raíces atrapan y fijan la arena, evitando que el viento y el oleaje la erosionen, y proporcionan refugios y zonas de alimentación, a múltiples especies de animales dando lugar a la aparición de relaciones alimentarias entre los organismos de este sistema natural costero [2,5,9]. A la vegetación de la duna costera se le conoce como halófita, ya que puede soportar altos niveles de salinidad provenientes de su cercanía e interacción con el mar. Contribuye a la protección del litoral, evitando el embate de las olas, reduciendo el efecto erosivo de tormentas y huracanes entre un 36% y 64%, respectivamente, siendo esto de gran importancia en una región en donde cada año se presentan las amenazas por estos fenómenos hidrometeorológicos [22,23]. Además, la vegetación en este ecosistema puede atrapar contaminantes ambientales, como el dióxido de carbono proveniente de la quema de combustibles y eliminar compuestos de las aguas residuales, evitando que éstos lleguen al mar [9, 21].

La comunidad florística de la duna costera se estudia desde aquella que se establece más próxima al mar, hacia tierra dentro [5]. Una característica importante de la vegetación es que varía su arreglo y composición a medida que se aleja del mar. También puede modificarse por su posición latitudinal: como en las zonas tropicales, subtropicales o templada y su capacidad de tolerar las condiciones de cada zona [24,25]. La vegetación contribuye en menor medida a la morfología de la duna, a medida que se extienden las raíces y ramas, sin embargo, el factor más determinante es la dirección del viento, cantidad y acumulación de arena [9]. Generalmente, el arreglo florístico en la duna

embrionaria y primaria inicia con especies pioneras nativas de herbáceas y rastreras escasas [7, 26, 27]. Estas especies colonizadoras crecen después de la línea alcanzada por las olas y son las primeras en abrir camino para que, con el tiempo, otras plantas logren instalarse [2, 4, 9]. En muchas regiones turísticas, este tipo de especies son remplazadas por especies ornamentales no nativas, exóticas o introducidas, que buscan embellecer el paisaje, como la lechuga de mar (*Scaevola taccada*), sin embargo, la sustitución de estas especies rompe con el equilibrio natural y puede causar modificaciones o incluso eliminación de dunas costeras en desarrollo [9, 28].

En las dunas secundarias y terciarias, existe un mosaico de especies de flora de tipo arbustivo y arbóreo tierra adentro, debido a que la duna es más estable, por acumulación de arena y materia orgánica (Figura 1) [24,26,27]. En esta zona pueden encontrarse plantas y árboles que suelen encontrarse más allá de las costas, característicos de selvas tropicales, incluyendo especies de manglares, palmas y plantas epífitas como bromelias y orquídeas (Figura 1) [5,7, 9, 24, 26, 27].

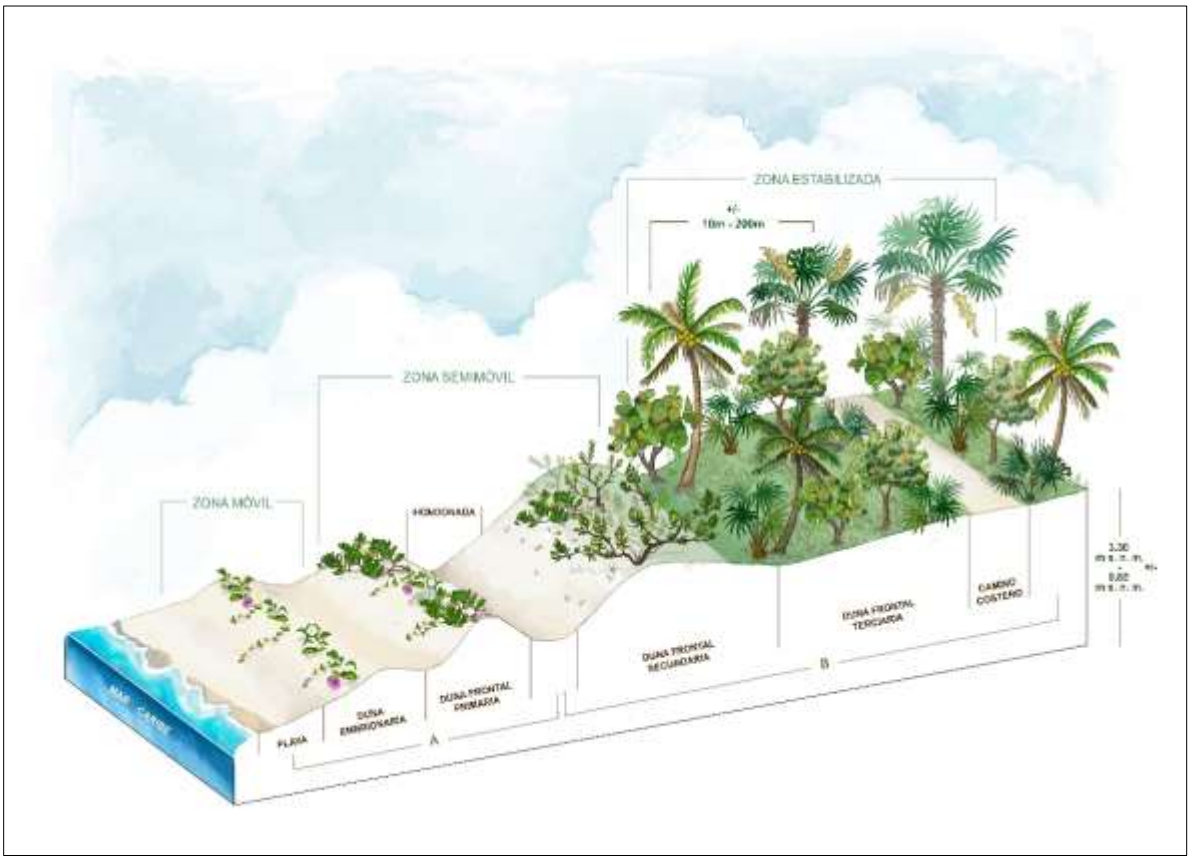


Figura 1. Esquema del perfil topográfico de un sistema de duna frontal en el Caribe mexicano, de acuerdo con criterio topográfico (playa, duna embrionaria, duna frontal primaria, hondonada, duna frontal secundaria y duna frontal terciaria) y de vegetación (zona móvil, zona semimóvil, zona estabilizada). A) Indica la vegetación pionera (herbácea-rastrera); B) Indica la vegetación de matorral (arbustivo-herbáceo y arbustivo-arbóreo; ilustración de Flores-Flores, R).

En México y la Península de Yucatán (PY), podemos encontrar distintas composiciones vegetales asociadas a la duna costera, debido que las condiciones climáticas son muy variadas, desde un clima árido en el norte a más húmedo y tropical en el sur. Por su

posición geográfica la PY se encuentra influenciada por el Golfo de México (Océano Atlántico) y las cálidas aguas del mar Caribe, caracterizados por distintas condiciones ambientales. Por lo cual, la composición de especies vegetales es muy variada e importante, lo que da lugar a ecosistemas únicos que vale la pena estudiar [5, 29].

3. Duna costera en el Caribe mexicano

El tipo de duna que se desarrolla en la PY en la porción oeste, que colinda con el mar Caribe (Caribe mexicano) es de tipo frontal. Está formada por un cordón de arena acumulada que es arrastrada por el viento y que corre a lo largo de la costa, de forma continua y/o discontinua; e inicia cercano al mar hacia tierra adentro con variada amplitud, alcanzando alturas de hasta 5m, aunque dadas las condiciones y en zonas específicas, puede alcanzar >12m [30,31]. El Caribe mexicano ha sido dividido en tres zonas (norte, centro y sur) y señalan que la superficie de dunas costeras es desigual entre ellas [32, 33]. De un total de 5128 hectáreas de dunas costeras, el 91% (4666.4 8 hectáreas) se concentra en la zona norte, entre las ciudades de Tulum y Cancún. El 6% (307.68 hectáreas) se localiza en la zona centro dentro del polígono que delimita la Reserva de la Biosfera de Sian Ka´an (RBSK) y el 3% (153.84 hectáreas) restante se distribuye desde el límite sur de la RBSK hasta la comunidad de Xcalak [32]. En el Caribe mexicano los ecosistemas adyacentes como corales duros, pastos marinos, praderas de algas, y sus características biofísicas como composición, complejidad geomorfológica, profundidad, distancia del litoral, influyen en la forma de la duna y su cobertura vegetal [30,34]. Ambientes con pasto marino y laguna arrecifal poca profunda (<2 metros), con amplitud de ~1000 metros a partir de la costa, presentarán dunas menores a dos metros de altura y una playa-duna angosta (20 metros), pero, zonas con profundidades mayores a dos metros y a más de 1000 metros de la costa permiten el paso de olas más intensas al litoral generado una playa-duna más amplia (~30-40 metros), con dunas de pendiente pronunciada (>4 metros), con un dinamismo más activo entre playa-duna y la zona marina adyacente, que permite la formación y consolidación de la duna frontal costera [30].

Dentro de las especies vegetales para el Caribe mexicano podemos encontrar plantas típicas de Yucatán, con especies de hábitats más secos y caracterizados por el endemismo como ch'iin took' o puut mukuy (maya) (*Enriquebeltrania crenatifolia)*, henequén de playa (*Agave angustifolia*) y halófitas como juluub (maya) (*Bravaisia berlandieriana*), ya'ax k'aax (maya) (*Pithecellobium keyense*) y quelite salado (*Suaeda linearis*); y las plantas típicas de Quintana Roo, con comunidades típicamente caribeñas, con ocotillo (*Erithalis fruticosa*), uva de mar o ni'che' (maya) (*Coccoloba uvifera*), enredadera de haya (*Ernodea littoralis*), y Palma de Guinea (español) o kuka' o ya'ax jalalche' (maya) (*Pseudophoenix sargentii*) y la palma chit (*Thrinax radiata*) [5, 29, 31, 35, 36, 37]. Es importante señalar que las especies vegetales descritas, en muchos casos, no son exclusivas de las dunas costeras, sin embargo, son especies que se han adaptado al medio hóstil que ofrece la duna [2, 5, 9, 24, 30]. A su vez, son las encargadas de mantener la estabilidad de la duna, por lo que es de importancia reconocer cuáles son estas especies vegetales que pueden sobrevivir en estas zonas, su endemismo, si es el caso y su protección para evitar la erosión de la propia duna. Las dunas costeras y su vegetación son afectadas por la acción humana en todas las latitudes del mundo y las costas de México no son ajenas a este problema [38, 39]. En el Caribe mexicano, actividades turísticas como el turismo recreativo, el establecimiento de tiendas, restaurantes, carreteras y otra infraestructura que no contemplan la

geomorfología de las dunas, las afectan severamente, pudiendo incluso eliminarlas [32, 39]. En este contexto, reconocer la importancia de estas especies vegetales y promover su conservación resulta clave para garantizar la protección de las dunas y su función como barrera natural frente a la erosión costera.

4. Caso de estudio: Zona costera en el sur de Quintana Roo

El área de estudio se encuentra en la zona sur del CM entre el Placer y Pulticub, colindando con la RBSK en su porción sur (Figura 2a-2c). Mediante la combinación de dos enfoques metodológicos: 1. recorridos y muestreo de campo, a través del establecimiento de cuatro sitios de muestreo distribuidos tanto dentro como fuera de la superficie sobrevolada (1.347 ha), y 2. fotogrametría aérea con sensor LiDAR, se describió el perfil de la duna y se caracterizó la composición de especies en la duna frontal costera del área evaluada. Además, se empleó un sistema de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS: *Remotely Piloted Aircraft,* por sus siglas en inglés), modelo DJI Matrice 350, en conjunto con una estación móvil D-RTK2, utilizando cuatro puntos de control terrestre. El sistema integró un sensor Zenmuse L2 con tecnología LiDAR, con precisión vertical y horizontal de 4 cm y 5 cm, respectivamente, así como capacidad de hasta cinco retornos, lo que permite una alta eficiencia y penetración en la vegetación (https://enterprise.dji.com/es/zenmuse-l2).

Con este sistema se escaneó una superficie aproximada de 1.347 ha (Figura 2c), a partir de la cual se generó un ortomosaico 2D y una nube de puntos densa utilizando el software especializado DJI Terra (Figuras 3a-3b). Este estudio tiene como objetivo demostrar la efectividad de la fotogrametría aérea integrada con sensores LiDAR para el monitoreo y análisis rápido y eficiente de los ambientes costeros. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI), en su capa vectorial sobre el tipo de vegetación y el uso del suelo, en esta zona se desarrolla un tipo de vegetación de duna costera (Figura 2b).

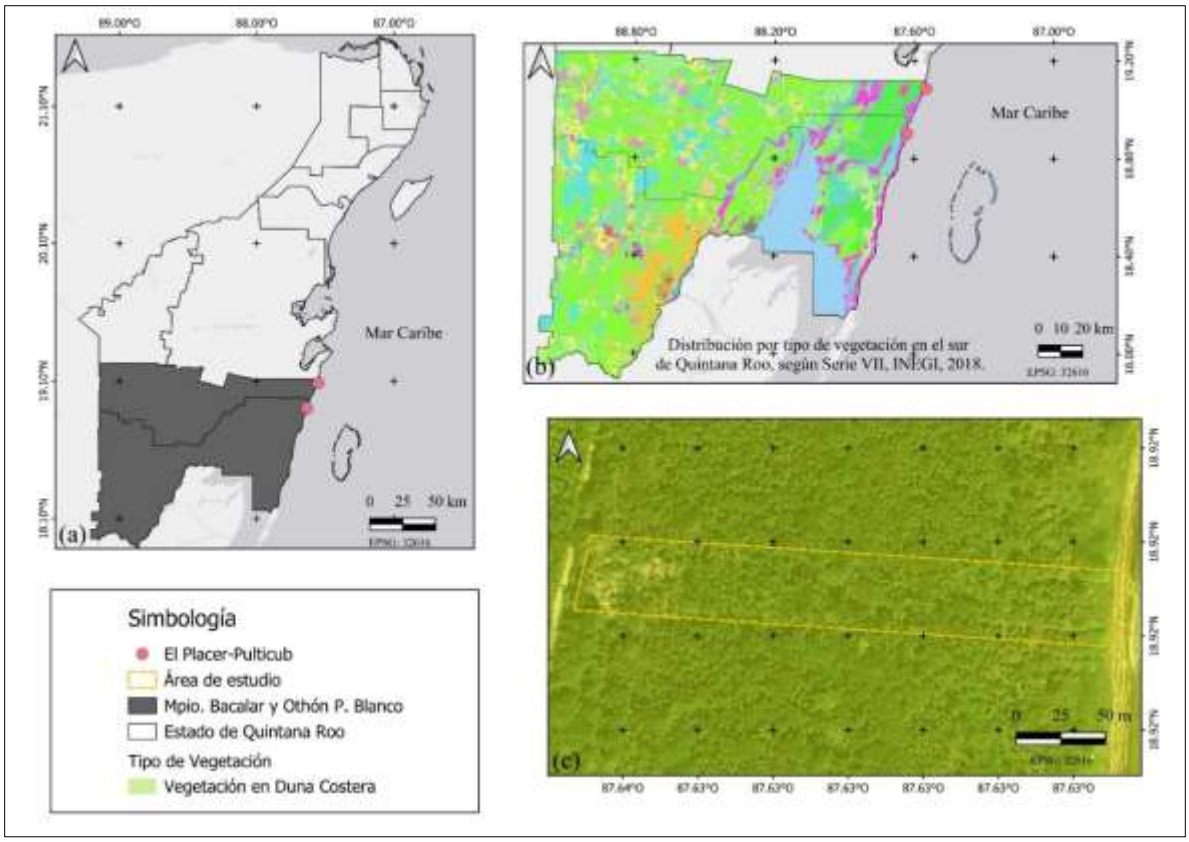


Figura 2. Ubicación geográfica del proyecto en la zona costera del municipio de Bacalar y Othón P. Blanco, estado de Quintana Roo (2a). Zona donde se distribuyen diferentes tipos de vegetación, según serie VII del INEGI (2b), incluida la vegetación del predio (2c). Se puede acceder a los datos del tipo de vegetación en: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781.

La zona evaluada exhibió una playa poco extensa asociada a una duna frontal inmediata con pendiente suave y poco pronunciada (0.5m a 1m) pero que se distinguía a simple vista como una elevación del terreno. Es decir, su perfil topográfico carece de duna embrionaria y primaria identificable en campo como se muestra en la Figura 1. Los resultados obtenidos con la tecnología propuesta ayudo a identificar una vegetación en duna costera y una duna frontal similares a lo reportado por Gayosso-Soto [35] y Elizondo et al. [36], para las dunas costeras de la zona sur de la RBSK, las cuáles exhiben amplitud variable con pendiente poco pronunciada o incipiente, siendo en algunas zonas apenas perceptible en campo o ausentes.

En esta área la duna frontal secundaria costera se encuentra paralela a la costa y se prolonga tierra adentro desde su cara posterior hasta el camino costero adyacente, estabilizando la zona mediante una duna terciaria (Figura 4). Aquí, el tipo de vegetación herbácea-rastrera inicia su desarrollo en zonas cercanas al mar sobre la playa y pendiente de duna (Figura 5a), cambiando a vegetación arbustiva-herbácea a partir de la cresta hasta ~85m dentro de la zona estudiada (Figura 5b-c). Además, de observarse dentro de esta área hasta el camino costero adyacente una vegetación arbórea-arbustiva con parches herbáceos (Figura 5d), características que coinciden con algunas zonas de la porción sur de la RBSK [35, 36].

La composición y estructura de la vegetación estuvo conformada por 12 especies distribuidas en 10 familias, siendo Arecaceae y Sapotaceae las más representativas con 2 especies, respectivamente; y está compuesta por; chunup (*Scaevola plumieri),* riñonina *(Ipomoea pes-capre),* palma chit *(Thrinax radiata),* akitz *(Cascabela gaumeri),* palma de coco *(Cocos nucifera),* kaniste *(Pouteria campechiana),* chechem *(Metopium brownei),* zapote *(Manilkara zapota),* sikmay *(Tournefortia gnaphalodes)*, yaxnic (*Vitex gaumeri*), higuerilla (*Ficus obtusifolia*) y chaca (*Bursera simaruba*). Santiago-Contreras et al. [40] encontraron 10 especies en la región comprendida entre Mahahual-Xcalak al sur del Caribe mexicano, similar a lo obtenido en este estudio. A pesar de observarse la presencia de infraestructura turística que ha modificado el paisaje costero, se observó que la comunidad florística se encuentra en buen estado de conservación y presentó alturas que oscilaron entre 3 m y 13 m, respectivamente. La palma chit (*Thrinax radiata*), fue la única especie en categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010 [41].

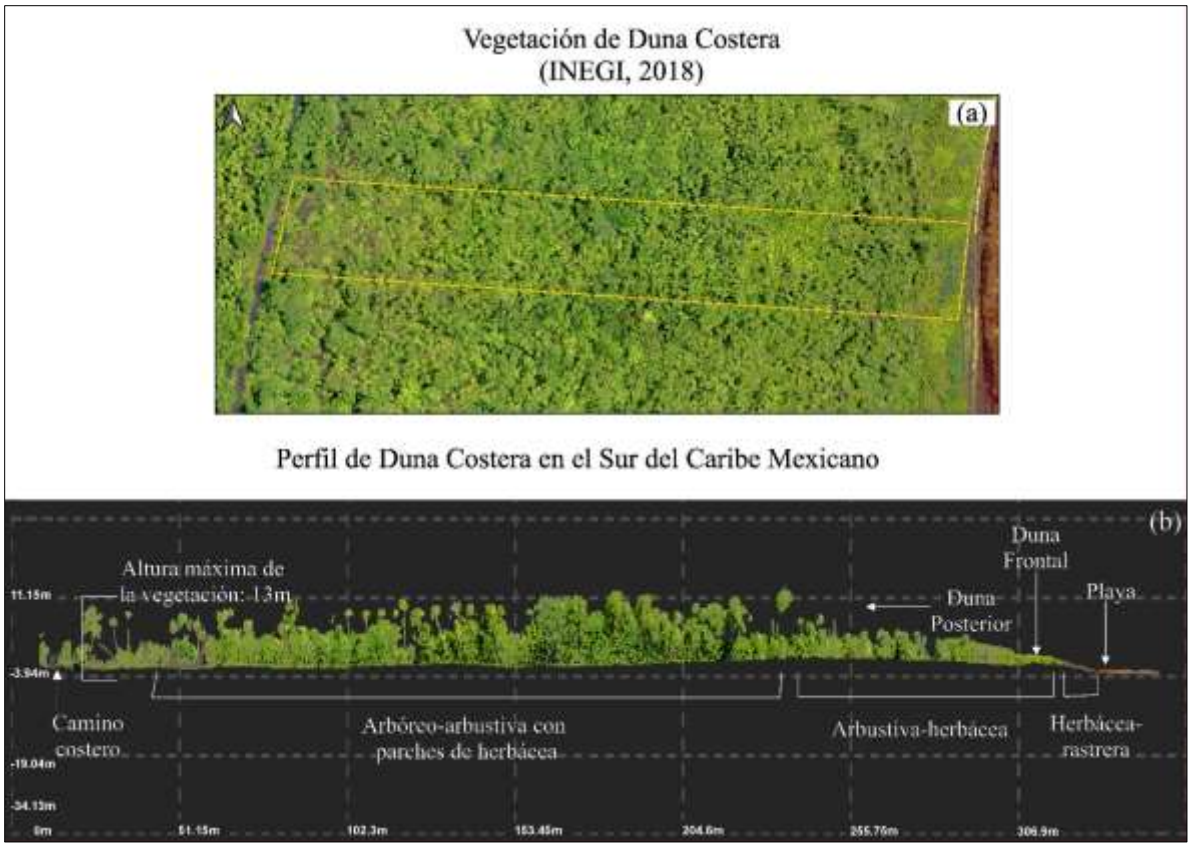


Figura 3. Representación del área de estudio exhibiendo el tipo de vegetación que se desarrolla en la duna costera (a), y esquematización mediante nubes de punto LiDAR del perfil de la duna costera que exhibe la zona sur del Caribe mexicano entre el Placer y Pulticub (Quintana Roo) (b).

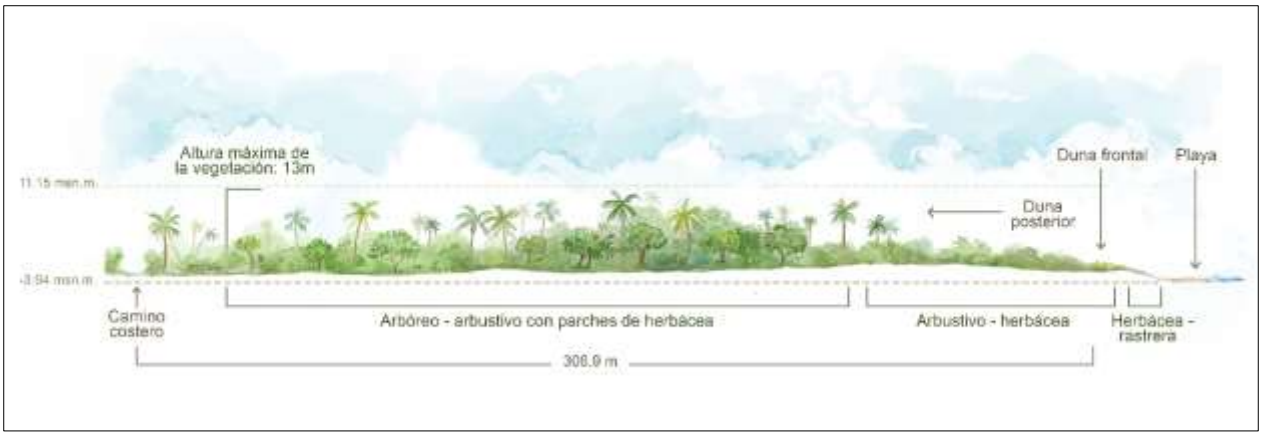


Figura 4. Esquematización general del perfil y gradiente ecológico que exhibe la duna costera en el sur del Caribe mexicano (ilustración de Flores-Flores, R.).

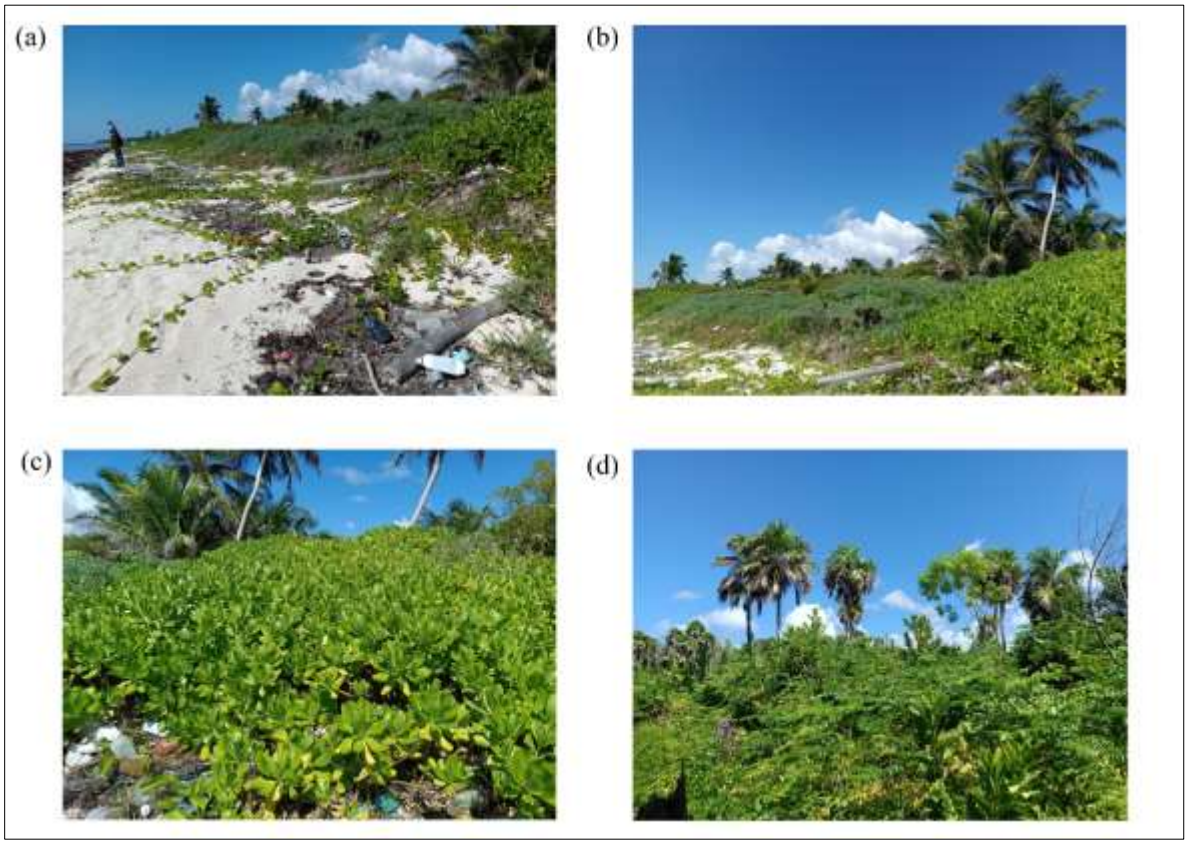


Figura 5. Vegetación herbácea-rastrera (a), arbustivo-herbácea (b-c) y arbórea-arbustiva con parches de herbácea (d) en el área de estudio (fotos: Estrella-Cach, J. A.).

Por otra parte, Gayosso-Soto [35], Collantes-Chávez-Costa et al. [42] y Gutiérrez-Báez et al. [43] encontraron 32, 37 y 36 especies de flora en la duna costera de la RBSK y en Cozumel. De acuerdo a estos autores algunas de las especies que han sido registradas en el CM son frijol de playa (*Canavalia rosea*), riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), campanita de playa (*Ipomoea imperati*), verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*), ch'ilibil su'uk (*Sporobolus virginicus*), margarita de mar (*Ambrosia hispida*), Pats'il (*Suriana*

marítima), Sikmay (*Tournefortia gnaphalodes*), ernodea de playa (*Ernodea littoralis*), icaco (*Chrysobalanus icaco*), palma chit (*Thrinax radiata*), chechem (*Metopium brownei*), uva de mar (*Coccoloba uvifera*), chunup (*Scaevola plumieri*), siricote de playa (*Cordia sebestena*), orégano silvestre (*Lantana involucrata*), zacate salado (*Distichlis spicata*), ya'ax su'uk (*Eragostris prolifera*) entre otras; algunas especies coinciden con las observadas en este trabajo (Figura 5).

5. Conclusión

Las dunas costeras son mucho más que espacios o montículos de arena a la orilla del mar. Constituyen ecosistemas complejos, dinámicos y frágiles que albergan una riqueza natural sorprendente: desde diminutos organismos que viven entre los granos de arena, hasta aves marinas, tortugas y mamíferos que dependen de ellas para sobrevivir. La vegetación cumple un papel central en su formación y estabilidad, con especies pioneras que inician el proceso en las dunas embrionarias y con comunidades más densas que consolidan las dunas secundarias y terciarias tierra adentro. Por sus particularidades, las dunas presentan comunidades vegetales bien diferenciadas de otros ecosistemas, por lo que es necesario su estudio individual para comprender sus procesos, y su interacción con otras zonas naturales, como las selvas, o inclusive los sistemas arrecifales. Sin embargo, la presión humana, especialmente el turismo y el desarrollo urbano en las zonas costeras amenaza su equilibrio. La sustitución de especies nativas por plantas ornamentales, la construcción de infraestructura y el crecimiento de poblaciones en estas áreas transforman profundamente su estructura y ponen en riesgo los servicios ambientales que nos brindan. Conservar y estudiar las dunas es, por lo tanto, una tarea urgente. Comprender su perfil florístico y los procesos que las sostienen nos permite no solo valorar su extraordinaria riqueza ecológica, sino también reconocer el papel vital que cumplen en nuestra propia seguridad y bienestar. Su estudio y preservación es una inversión para el futuro de nuestras costas y playas caribeñas. Por último, el establecimiento de sitios de muestreo combinado con el uso de drones y sensor LiDAR para la caracterización y análisis de la duna costera y su vegetación asociada resultaron ser herramientas eficientes para el estudio del paisaje costero. La implementación de esta tecnología puede ayudar a tener un mejor panorama en la toma decisiones y en la generación de estrategias de conservación y monitoreo de los ecosistemas costeros.

6. Agradecimientos

Agradecemos profundamente a Flores-Flores, Renata por las ilustraciones desarrolladas a mano y posteriormente digitalizadas en el software Photoshop para este trabajo (https://www.instagram.com/chiguio_picaflor?igsh=dzI0NGJvc3dma21m) y a Estrella-Cach, Juan Andrés por las fotos proporcionadas y su apoyo en el levantamiento de datos en campo.

7. Referencias

1. Moreno-Casasola, P.; Peresbarbosa Rojas, E.; Travieso-Bello, A.C. 2006. *Playas y dunas. En: P. Moreno-Casasola, E, Peresbarbosa y A.C. Travieso-Bello. Editores. Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal*; Primera edición.; Instituto de Ecología: Xalapa, Ver. México; ISBN 978-970-709-039-2. Disponible en línea: https://ebusca.uv.mx/Record/207197%20207197 (Acceso el 01 de agosto 2025).

2. Martínez, M.L. 2009. *Las playas y las dunas costeras. Un hogar en movimiento*; LA CIENCIA PARA TODOS; Fondo de Cultura Económica (FCE): Ciudad de México; Vol. 226; 189 p. Disponible en línea: https://www.fondodeculturaeconomica.com/Ficha/9786071601513/F (Acceso el 01 de agosto 2025).
3. Martínez, M L (2008) Dunas costeras. Investig. Cienc. 38, 26-35.
4. Hesp, P. 2024. 2.29 Coastal Dunes: Types, Initiation, Morphology, Evolution, and Relationships to Surfzone-Beach Systems and Climate. In Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition). Volume 2, Pages 866-903. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00074-3
5. Martínez, M.L.; Moreno-Casasola, P.; Espejel, I.; Jiménez-Orocio, O.; Infante Mata, D.; Rodríguez-Revelo, N.; Cruz González, J.C. 2014. *Diagnóstico de Las Dunas Costeras de México*; CONAFOR; ISBN 978-607-8383-17-7. Disponible en línea: https://www.cienagasyhumedales.org/diagnosticoge (Acceso el 25 de agosto 2025).
6. Ley-Vega de Seoane, C.; Gallego-Fernández, J.; Pascual, C. 2007. Manual de Restauración de Dunas Costeras. *Dir. Gen. Costas*. Disponible en línea: https://www.researchgate.net/publication/235247789_Coastal_dunes_Restoration_Manual (Acceso el 25 agosto 2025).
7. Hesp, P. 2002. Foredunes and Blowouts: Initiation, Geomorphology and Dynamics. *Geomorphology 48*, 245–268, doi:10.1016/S0169-555X(02)00184-8.
8. Psuty, N.P. 2004. The Coastal Foredune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development. In *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*; Martínez, M.L., Psuty, N.P., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg; pp. 11–27 ISBN 978-3-540-74002-5. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_2.
9. Maun, M. A. 2009. The Biology of Coastal Sand Dunes. Oxford University Press. Available online: https://doi.org/10.1093/oso/9780198570356.001.0001 (Acceso el 27 noviembre 2025)
10. Pedroza, D; Cid, A; García, O; Silva, R; Villatoro, M; Delgadillo-Calzadilla, M.A; Mendoza, E; Espejel, I; Moreno-Casasola, P; Martínez, M. 2013. Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Ciudad de México, Mexico, 2013; ISBN 978-607-8246-59-5. Available online: https://www.researchgate.net/publication/323487322_Manejo_de_Ecosistemas_de_Dunas_Costeras_Criterios_Ecologicos_y_Estrategias (acceso el 12 de abril de 2026).
11. López-Chan, J. A; Cutz-Pool, L. Q; Ortiz-León, H. J; Castro-Pérez, J. M; Ibarra-Garibay, L. E; Ramírez-Medina. M. 2014. Microartrópodos de dunas Costeras en la parte norte de Quintana Roo. Entomología mexicana, 1: 476-480.

12. 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
13. Liceaga-Correa, M.A. 2020. Hábitats críticos y hotspots de tortugas marinas. En: Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo VII). Consorcio de Investigación del Golfo de México. Online: https://www.researchgate.net/publication/354220295_Habitats_criticos_y_hotspots_de_tortugas_marinas (acceso 12 de abril de 2026)
14. Rodríguez-Martínez R. E; Quintana-Pali G; Trujano-Rivera K. I; Herrera R; García-Rivas M. D. C; Ortíz A; Castañeda G; Maldonado G; Jordán-Dahlgren E. 2021. Sargassum landings have not compromised nesting of loggerhead and green sea turtles in the Mexican Caribbean. J Environ Manage. Dec 1;299:113614. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113614.
15. Knott, D. 2010. Atlantic ghost crab (Ocypode quadrata): distribution and ecology in Western Atlantic beaches. online: https://www.dnr.sc.gov/marine/sertc/Ghost%20Crab.pdf (acceso 12 de abril de 2026)
16. Chaves, G. 2013. Phyllodactylus tuberculosus distribution in Mexico and Central America. Zoologica Scripta.
17. Hernández-Gallegos, O; López-Moreno, A. E; Méndez- Sánchez, J. F; Rheubert, J. L; Méndez-de la Cruz, F. R. 2015. Home range of Aspidoscelis cozumela (Squamata: Teiidae): a parthenogenetic lizard microendemic to Cozumel Island, México. Revista de Biología Tropical.
18. Sosa-Escalante, J. E; Pech-Canché, J. M; Mac_Swiney-González, M. C; Hernández Betancourt, S. 2013. Mamíferos terrestres de la península de Yucatán, México: riqueza, endemismo y riesgo. Revista Mexicana De Biodiversidad, 84(3). https://doi.org/10.7550/rmb.33285
19. Pérez-Flores J; Arias-Domínguez H; Arias-Domínguez N. 2020. First documented predation of a Baird's tapir by a jaguar in the Calakmul region, Mexico. Neotropical Biology and Conservation 15(4): 453-461. https://doi.org/10.3897/neotropical.15.e57029
20. Pardo-López, L; Gutiérrez-Ríos, R.M. 2021. Distribución de bacterias. En S. Z. Herzka, R. A. Zaragoza Álvarez, E. M. Peters y G. Hernández Cárdenas. (Coord. Gral.). Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo X), México: Consorcio de Investigación del Golfo de México.
21. Del Vecchio, S; Rova, S; Fantinato, E; Pranovi, F; Buffa, G. 2022. Disturbance affects the contribution of coastal dune vegetation to carbon storage and carbon sequestration rate. Plant Sociology 59(1): 37-48. https://doi.org/10.3897/pls2022591/04
22. Feagin, R.A.; Furman, M.; Salgado, K.; Martinez, M.L.; Innocenti, R.A.; Eubanks, K.; Figlus, J.; Huff, T.P.; Sigren, J.; Silva, R. 2019. The Role of Beach and Sand Dune Vegetation in

Mediating Wave Run up Erosion. Estuar. Coast. Shelf Sci. 219, 97–106, doi:10.1016/j.ecss.2019.01.018.

23. Martínez, M.L.; Silva, R.; López-Portillo, J.; Feagin, R.A.; Martínez, E. 2020. Coastal Ecosystems as an Ecological Membrane. J. Coast. Res. 95, 97–101, doi:10.2112/SI95-019.1.
24. Hesp, P.A. 2008. Coastal Dunes in the Tropics and Temperate Regions: Location, Formation, Morphology and Vegetation Processes. In Coastal Dunes: Ecology and Conservation; Martínez, M.L., Psuty, N.P., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg; Vol. 171, pp. 29–49 ISBN 978-3-540-74002-5. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_3.
25. Flor, G.; Flor-Blanco, G. 2014. Componentes de viento generadores de morfologías y campos de dunas costeras en Asturias (no de España). Cuaternario Geomorfol. 28, 47–68. Disponible en línea: https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/29823 (Acceso el 01 de agosto 2025).
26. Miller, T. E; Gornish, E. S; Buckley, H. 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
27. Macías-Rodríguez, M. Á; Alburquerque, F; Azcárate, J. G. 2024. Análisis de la vegetación de las dunas costeras del estado de Jalisco, México. Acta Botanica Mexicana, 131, Article 131. https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2308
28. Castillo-Campos, G; Martínez, M. L; García-Franco, J. G; Vázquez, G; Pérez-Maqueo, O; Pale-Pale, J. 2021. First record of naturalization of Scaevola taccada (Gaertn.) Roxb. (Goodeniaceae) in southeastern Mexico. Check List, 17(2). https://doi.org/10.15560/17.2
29. Moreno-Casasola, P; Espejel, I. 1986. Classification and ordination of coastal sand dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. Vegetatio, 66(3), 147-182. https://doi.org/10.1007/BF00039908
30. de Almeida, L.R.; Silva, R.; Martínez, M.L. 2022. The Relationships between Environmental Conditions and Parallel Ecosystems on the Coastal Dunes of the Mexican Caribbean. Geomorphology 397, 108006, doi:10.1016/j.geomorph.2021.108006.
31. Mendoza-González, G.; Aguirre Fierro, J.C.; Badillo Alemán, M.; Hernández-Mendoza, V.B.; Popoca Cruz, P.E.; Tellez-Valdes, O.; Carnevali, G.; Chiappa-Carrara, X. 2025. Catálogo de vegetación de la duna costera de la península de Yucatán; 1st ed.; Escuela Nacional de Estudios Superiores, Mérida, de la Universidad Nacional Autónoma de México: Ucú, Yucatán., ISBN 978-607-587-568-2. Disponible en línea: https://zenodo.org/records/15756437 (acceso el 16 de septiembre de 2025).
32. Guimarais, M.; Zúñiga-Ríos, A.; Cruz-Ramírez, C.J.; Chávez, V.; Odériz, I.; van Tussenbroek, B.I.; Silva, R. 2021. The Conservational State of Coastal Ecosystems on the Mexican Caribbean Coast: Environmental Guidelines for

Their Management. Sustainability, 13, 2738, doi:10.3390/su13052738.

33. Rioja-Nieto R,;Álvarez-Filip L. 2019. Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. Mar Pollut Bull. Mar;140:616-625. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.07.005. Epub 2018 Jul 11. PMID: 30005908.
34. Alcérreca-Huerta, J.C; Cruz-Ramírez, C.J; de Almeida, L.R; Chávez, V; Silva, R. 2022. Interconnections between Coastal Sediments, Hydrodynamics, and Ecosystem Profiles on the Mexican Caribbean Coast. Land, 11, 524, doi:10.3390/land11040524.
35. Gayosso-Soto, E. 2015. Estructura espacial de la vegetación de duna costera de la zona norte y sur de la reserva de la biosfera de Sian Ka´an, Quintana Roo, México. DOI: 10.13140/RG.2.2.10880.81929.
36. Elizondo, N.C; Infante-Mata, D.C; Rincón-Pérez, M; García-Alfaro, R; Islebe, G.A; Valdéz, M; Troche-Souza, C.H; Camacho-Sandoval, T; Weissenberger; López-Merlín, D. 2016. Diagnóstico sobre el estado actual del ecosistema de duna costera en la costa norte, centro y sur de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an; CONANP, p. 245. Disponible en línea: https://iefectividad.conanp.gob.mx/i-efectividad/I-efectividad atendido/RB Sian Ka´an/DOCUMENTOS/DIAGNOSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LAS DUNAS COSTERAS RBSK 2016.pdf (acceso el 01 de marzo 2024).
37. Espejel, I; Jiménez-Orocio, O; Castillo-Campos, G; Garcillán, P. P; Álvarez, L; Castillo-Argüero, S; Durán, R; Ferrer, M; Infante-Mata, D; Iriarte, S; León de la Luz, J. L; López-Rosas, H; Medel-Narváez, A; Monroy, R; Moreno-Casasola, P; Rebman, J. P; Rodríguez-Revelo, N; Sánchez-Escalante, J; Vanderplank, S. 2017. Flora en playas y dunas costeras de México. Acta Botanica Mexicana 121: 39-81. DOI: http://dx.doi.org/10.21829/abm121.2017.1290
38. Martínez, M.L; Intralawan, .; Vázquez, G; Pérez-Maqueo, O; Sutton, P; Landgrave, R. 2007. The Coasts of Our World: Ecological, Economic and Social Importance. Ecological Economics, 63, 254–272, doi:10.1016/j.ecolecon.2006.10.022.
39. Martínez, M; Lithgow, D; Vázquez, G; Garcia-Franco, J.G. 2016. Capítulo 18. Diagnóstico de Las Necesidades y Probabilidades de Restauración En Las Dunas Costeras de Quintana Roo. In Experiencias Mexicanas en la Restauración de los Ecosistemas.; UNAM; CRIM; UAEM; CONABIO: Ciudad de México, México; pp. 409–431 ISBN 978-607-02-8157-0.
40. Santiago-Contreras, J. F; González-Salvatierrra, C; Carrillo-Bastos, A; Cutz Pool, L. Q; Rosas-Luis, R. 2021. Diversidad, estructura y composición Florística de la duna costera de Mahahual- Xcalak, Quintana Roo. ECTI, EXPERIENCIAS CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS Y DE INNOVACIÓN. Vol. 1. 100-104.
41. DOF. 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección Ambiental-Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres-

Categorías de Riesgo y Especificaciones Para Su Inclusión, Exclusión o Cambio-Lista de Especies En Riesgo Disponible en línea: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm (acceso el 26 November 2025).

42. Collantes-Chávez-Costa, A; Alanís-Rodríguez, E; Yam-Uicab, O; López-Contreras, C; Sarmiento-Muñoz, T; Tapia-Muñoz, J. L. (2019). Composition, structure and diversity of coastal vegetation in the northeastern of Cozumel, Mexico. Botanical Sciences, 97(2), 135-147. https://doi.org/10.17129/botsci.2044
43. Gutiérrez-Báez, C; Avendaño-Reyes, S; Zamora-Crescencio, P. (2020). Listado florístico de las dunas costeras de la Península de Yucatán, México. Foresta Veracruzana, 22(2), 1–6.