



VULNERABILITY OF FOREST SPECIES IN THE YUCATAN PENINSULA TO CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS †

[VULNERABILIDAD DE ESPECIES FORESTALES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN ANTE FACTORES CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS]

Teresa Alfaro-Reyna^{1*}, Josué Delgado-Balbuena¹, Fernando Arellano-Martín²
Aixchel Maya-Martínez³, Xavier García-Cuevas², Yameli Aguilar-Duarte⁴
and Carlos Alberto Aguirre-Gutierrez¹

¹CENID de Agricultura Familiar, km 93.5 carretera Ojuelos de Jalisco-Lagos de Moreno, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, México. C.P. 47540. Email: alfaro.teresa@inifap.gob.mx; delgado.josue@inifap.gob.mx; aguirre.carlos@inifap.gob.mx.

²Campo Experimental Chetumal, km 5 carretera xul-ha, Bacalar, Quintana Roo, México. C. P. 77963. Email: garcia.xavier@inifap.gob.mx; arellano.fernando@inifap.gob.mx.

³Campo Experimental Edzná, Km 15.5 carretera Campeche-Pocoyaxum, Camp., Campeche, México. C. P. 47000. Email: maya.aixchel@inifap.gob.mx.

⁴Centro de Investigación Regional del Sureste, calle 6 no. 398 col. Díaz Ordaz, Mérida, Yucatán, México. Email: aguilar.yameli@inifap.gob.mx.

*Corresponding author

SUMMARY

Background: The Yucatan Peninsula is covered mainly by semi-humid forests associated with karstic zones. These landscapes show high rates of endemism, and although they are resilient ecosystems, climatic variations place them as highly susceptible areas to climate change. **Objective:** To identify environmental and anthropogenic risk factors in the semi-humid forests of the Yucatan Peninsula, and to evaluate the vulnerability to climate change of 25 forest species with economic importance in this region. **Methodology:** A multi-criteria analysis was carried out to rank edaphic and climatic variables, changes in potential distribution due to climate change, species density and growing rate. These variables were integrated into a matrix and each variable was valued from 0 to 4, weighted between parameters, the higher the value, the greater the susceptibility. Four percent of the species were classified into the high-risk susceptibility and 84 % as medium risk and the rest as low. These species have a low density per hectare, have a restricted distribution, are slow growing and are over shallow soils. **Implications:** Species that can develop in a wide range of environmental conditions and have rapid growth rates were less susceptible to the risk factors analyzed here. **Conclusions:** The greatest risk factor was due to the effect of climate change, followed by the proximity to the Caribbean coast and the type of soil, which suggests that more conservation actions for forest species are needed, which will also ensure the provision of environmental services to human populations.

Keywords: multicriteria analysis; potential distribution; ecological range.

RESUMEN

Antecedentes: La península de Yucatán está cubierta en su mayor parte por selvas semihúmedas asociadas a zonas kársticas. Estos paisajes presentan altas tasas de endemismo, y aunque son ecosistemas resilientes, las variaciones climáticas los sitúan como áreas altamente susceptibles al cambio climático. **Objetivo:** Identificar factores de riesgo ambiental y antropogénico en las selvas semihúmedas de la península de Yucatán, y evaluar la vulnerabilidad frente al cambio climático de 25 especies forestales con importancia económica de esta región. **Metodología:** Se realizó un análisis multicriterio para jerarquizar variables edáficas, climáticas, cambios en la distribución potencial por el cambio climático, densidad de especies y densidad de la madera. Las variables se integraron en una matriz y cada variable fue valorado del 0 al 4, se ponderó entre parámetros, a mayor valor, mayor susceptibilidad. **Resultados:** El 4 % de las especies fueron catalogadas como de alta susceptibilidad de riesgo y el 84 % como de riesgo medio y el resto como bajo. Las especies de alto riesgo presentan una densidad baja por hectárea, tienen distribución restringida, son de lento crecimiento y están presentes en suelos someros. **Implicaciones:** las especies que son capaces de

† Submitted August 18, 2022 – Accepted November 22, 2022. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4516>



Copyright © the authors. Work licensed under a [CC-BY 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Teresa Alfaro Reyna <https://orcid.org/0000-0003-1983-5254>; Josue Delgado Balbuena <https://orcid.org/0000-0001-7928-1869>

desarrollarse en una amplia gama de condiciones ambientales tienen tasas de crecimiento rápido y son menos susceptibles a los factores de riesgo analizados. **Conclusiones:** El mayor factor de riesgo fue por efecto del cambio climático, seguido por la cercanía a la costa del Caribe y el tipo de suelo, lo que sugiere que más acciones de conservación de las especies forestales, lo cual asegurará además los servicios ambientales y de aprovisionamiento a las poblaciones humanas.

Palabras clave: análisis multicriterio; distribución potencial; rango ecológico.

INTRODUCCIÓN

Las selvas semihúmedas de México son ecosistemas de alta prioridad para su conservación debido a su elevado secuestro de carbono y a la alta biodiversidad de flora y fauna que albergan (Wagner *et al.*, 2016; Martínez-Sánchez, 2019). Estos ecosistemas están amenazados por diferentes factores ambientales y antropogénicos y son altamente sensibles a los efectos del cambio climático (Liu *et al.*, 2022). Por ejemplo, los ecosistemas cercanos a las costas son más sensibles a los impactos del cambio climático, principalmente por el aumento relativo del nivel del mar y el impacto de los huracanes. En el caso de la península de Yucatán, esta presenta una alta vulnerabilidad a los efectos adversos de eventos climáticos extremos, como los huracanes, cuya mayor frecuencia y severidad está asociada con el cambio climático (Boose *et al.*, 2003; Wigneron *et al.*, 2020; Palomo-Kumul *et al.*, 2021). Además, los eventos de sequía estacional se ven exacerbados debido a que la mayor parte del territorio peninsular está cubierto por suelos someros con abundantes afloramientos de rocas calizas, lo que reduce la disponibilidad de agua para las plantas (Fragoso-Servón y Pereira-Corona, 2014; Geekiyanage *et al.*, 2018, 2019).

Los eventos extremos tales como huracanes, provocan distintas acumulaciones de combustibles forestales a lo largo de las áreas afectadas al provocar la caída de ramas, hojarasca y al desenraizamiento de árboles (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2011). Las mayores cargas de combustibles se presentan en las selvas medianas con un gradiente de afectación de este a oeste, a lo largo de la trayectoria que usualmente siguen los huracanes; es decir, de la costa hacia la parte continental. Por otro lado, estos ecosistemas también están expuestos a factores de disturbio antropogénicos debido a los cambios de uso de suelo por la extensión de las zonas agrícolas, ganaderas y otros usos que a su vez juegan un papel importante en la interacción del clima y la vegetación (Reynolds y Stafford Smith, 2002; Caballero *et al.*, 2022).

Un ecosistema se vuelve vulnerable cuando uno de sus componentes se ve amenazado o disminuye su capacidad de respuesta al cambio (Villanueva-Fragoso *et al.*, 2010). En el caso de los ecosistemas tropicales semihúmedos de la península de Yucatán, las evaluaciones de vulnerabilidad respecto al cambio climático se han centrado principalmente en los efectos de los huracanes o de los incendios forestales, y poco

se ha investigado acerca de los efectos de las variables climáticas sobre las especies forestales. En este estudio utilizamos los conceptos de vulnerabilidad y riesgo adaptados al contexto de los bosques semihúmedos, con el objetivo de medir los efectos antropogénicos y su interacción con el clima a corto y mediano plazo, y sin tomar en cuenta procesos de adaptación evolutiva ni sucesión. Se combinaron diferentes componentes y factores atribuibles a los efectos del cambio climático, a las actividades antropogénicas y a los factores intrínsecos de la especie que la hacen más susceptible frente a los efectos del cambio climático (cercanía de las poblaciones a la costa del Caribe, cercanía a centros de población, estado de conservación de las especies, porcentaje de cobertura dentro de áreas naturales protegidas, densidad de la madera, densidad de las especies y amplitud de la distribución). Aunque pueden existir otros factores de riesgo importantes en el contexto ecológico, se seleccionaron los componentes más extendidos en la península de Yucatán con la finalidad de identificar los factores de riesgo que aumentan la vulnerabilidad de las especies forestales al cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se desarrolló en la península de Yucatán (PY), conformada por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán (Figura 1). La vegetación predominante en la península de Yucatán es la selva baja caducifolia. Las temperaturas medias anuales varían entre los 25 y 28 °C, la hidrografía superficial es escasa, y forma un gradiente de precipitación que no exceden los 2,200 mm al año y disminuye desde el sureste hacia el noreste. Al oeste se presentan planicies y mesetas kársticas, ondulaciones y lomeríos bajos con hondonadas (Hubp y Pereño, 1992); hacia el sur se presentan los suelos más profundos (Phaeozems y Vertisoles) en zonas de bajo relieve cubiertos por selva mediana subperennifolia y perennifolia. En su mayor parte la península está formada por rocas carbonatadas, evaporíticas y clásticas como la caliza, la dolomita, el yeso y la arenisca. Las formaciones más antiguas (Cretácico y Paleoceno) se ubican al sur y las más recientes (Plioceno y Cuaternario) en el norte y este del territorio. Éstas últimas se caracterizan por presentar suelos delgados y pedregosos muy susceptibles a colapsos y procesos erosivos con abundantes afloramientos de roca caliza (Bautista *et al.*, 2011).

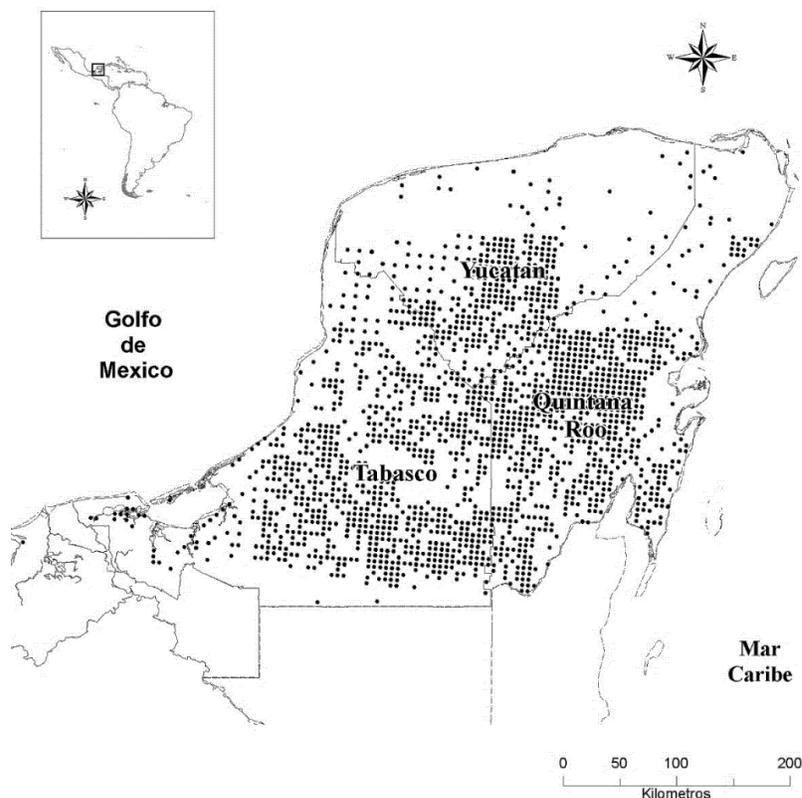


Figura 1. Península de Yucatán conformada por los estados Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Los puntos indican la ubicación de cada uno de los conglomerados del inventario nacional forestal y de suelos seleccionados para este estudio. Elaboración propia.

Datos

Se seleccionaron 25 especies arbóreas distribuidas en la península de Yucatán, cuyo criterio de selección fue su importancia ecológica y económica que tienen en la región (Tabla 1). Se utilizó la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) del período 2004-2009 (CONAFOR, 2015). Se seleccionaron 3200 conglomerados que contenían 163,697 registros de las 25 especies arbóreas seleccionadas. Se extrajo el número de conglomerado, nombre científico, coordenadas de ubicación del conglomerado y diámetro normal de cada árbol. A partir de estos datos se calculó la densidad (número de árboles por hectárea) y área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) por conglomerado. También se calculó la cercanía a centros de población y la distancia a la costa del Caribe (km). Se utilizó la herramienta “near” de ArcMap (CONABIO, 2010) para calcular el promedio de la distancia de los conglomerados por especie a los centros de población y la costa del Caribe. La amplitud de la distribución se calculó utilizando el área de ocupación actual con respecto a la superficie del territorio nacional. Se generaron cuatro categorías: muy restringida, menor a 5 % del territorio nacional; restringida, entre el 5 y el 15 %;

amplia, entre el 15 % y el 40 %; y ampliamente distribuida, mayor al 40 % del territorio nacional.

Para calcular la afectación del cambio climático en las especies se generaron modelos de distribución potencial a partir de su distribución actual y las variables bioclimáticas actuales, utilizando el algoritmo de máxima entropía (MAXENT). Posteriormente, el modelo se proyectó en las condiciones ambientales futuras de acuerdo con el modelo RCP 2.6 al año 2050 para conocer la distribución potencial futura de las especies. Este modelo de Trayectoria de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) es el más conservador y asume el éxito de las políticas públicas en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), logrando reducirlos a la mitad para el 2050 y un incremento probable de la temperatura menor a 2 °C a finales de siglo (Edenhofer, 2015). La diferencia entre el área de ocupación actual y futura de las especies se utilizó como el parámetro para determinar el grado de afectación por el cambio climático. De igual manera, se adicionó información como: densidad de la madera (g/cm^3), tipo de suelo y profundidad de suelo (suelos someros <25 cm, suelos medianamente profundos 25-60 cm, y suelos profundos > de 60 cm, estado de

conservación (peligro crítico, vulnerable, preocupación menor, sin preocupación), y porcentaje de cobertura sobre áreas naturales protegidas (porcentaje del área de distribución de la especie dentro de un área natural protegida).

Análisis multicriterio

Se generó un listado preliminar de criterios el cual fue discutido y validado en un taller con expertos e interesados en el manejo de los recursos forestales (líderes locales, representantes de instituciones gubernamentales y ONG, técnicos forestales e investigadores) por cada uno de los tres estados de la PY. Con el taller se obtuvo un listado final de criterios, la definición conceptual e importancia de

cada uno y el enfoque de prioridad. Para determinar el grado de vulnerabilidad de cada especie, se realizó un análisis multicriterio, para lo cual se generó una matriz con cada una de las variables descritas en la Tabla 2, cada criterio fue valorado usando como insumo la información detallada de cada parámetro y el mecanismo de valoración entre criterios. Cada criterio se valoró en una escala de cero a cuatro (valores mayores indican mayor grado de susceptibilidad de riesgo). Se combinaron las diferentes ponderaciones por criterio para obtener una sumatoria total por especies de todos los criterios. Posterior a la valoración de cada especie por factor, se hizo una jerarquización de los factores de acuerdo con su importancia. La importancia de cada factor se obtuvo a través de los talleres participativos y del

Tabla 1. Especies forestales seleccionadas y su estado de conservación, en la península de Yucatán.

Familia	Especie	Nombre común	Estado de conservación
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Jobillo	Protección especial
Anacardiaceae	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb	Chechem	Comercial
Araliaceae	<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne. & Planch.	Sak'chaca	Comercial
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC	Palo de rosa, macuilis	Comercial
Bombacaceae	<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	Amapola	Comercial
Cordiaceae	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	Bojón	Comercial
Cordiaceae	<i>Cordia dodecandra</i> DC	Ciricote	Comercial
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	Chaca	Comercial
Combretaceae	<i>Laguncularia racemosa</i> (L.) C.F. Gaertn.	Mangle blanco	Amenazada
Combretaceae	<i>Conocarpus erectus</i> L.	Mangle botón	Protección especial
Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	Pich	Comercial
Fabaceae	<i>Lonchocarpus castilloi</i> Standl.	Baal che	Comercial
Guttiferae	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Barí	Amenazada
Leguminosae	<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Tzalam	Comercial
Leguminosae	<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg	Jabin	Comercial
Leguminosae	<i>Platymiscium yucatanum</i> Standl.	Granadillo	Comercial
Leguminosae	<i>Swartzia cubensis</i> (Britton & P. Wilson) Standl	katalox	Comercial
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro	Amenazada
Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla</i> King in Hook	Caoba	Comercial
Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	Ramón	Comercial
Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i> L.	Mangle	Comercial
Sapotaceae	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P Royen	Zapote	Comercial
Sapotaceae	<i>Mastichodendron capiri</i> (A.DC.) Cronquist	Tampisque	Amenazada
Verbenaceae	<i>Avicennia germinans</i> (L.) L.	Mangle negro	Protección especial
Verbenaceae	<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Yaaxnik	Comercial
Zygophyllaceae	<i>Guaiacum sanctum</i> L.	Guayacán	Protección especial

conocimiento de expertos. A los factores de mayor importancia se les otorgó el 100 % de su valor, mientras que a los factores de menor importancia se les penalizó con el 10, 20, 30 y 40 % de su valor. Finalmente se obtuvieron cuatro grupos jerarquizados

de acuerdo con el menor y mayor valor absoluto otorgado que representa la susceptibilidad de la especie ante la integración de los criterios (nulo, bajo, medio y alto).

Tabla 2. Descripción de los criterios seleccionados, características y rango de valoración.

Parámetro	Característica	Puntaje	Justificación
Amplitud de la distribución	Muy restringida (restringida a la PY)	4	La amplitud de la distribución del taxón es relativo al ámbito de distribución natural, se consideran cuatro categorías, para especies locales, especies regionales y de amplia distribución (Maciel Mata et al., 2015).
	Restringida (Restringida a México)	3	
	Amplia (Se distribuye en México y Centroamérica)	2	
	Ampliamente distribuida (México, Centroamérica, Suramérica)	1	
Estado de conservación	Peligro crítico (PC)	4	Basada en la Norma Oficial Mexicana NOM-059 (SEMARNAT, 2010).
	Vulnerable (P)	3	
	Preocupación menor (V)	2	
	Sin preocupación (PM)	1	
Cercanía a la población	1 km	4	La distancia a centros de población está relacionada con la degradación de los bosques, por lo que la distancia a centros de población puede ser usado como una medida de cambio de uso de suelo (Cardelús et al., 2019; Laurance et al., 2009; Vergara y Gayoso, 2004).
	5 km	3	
	10 km	2	
	15 km	1	
	20 km	0	
Densidad (no. árboles ha ⁻¹)	menos de 1 árbol por ha	4	La densidad es un indicador confiable del grado de ocupación del arbolado de un lugar y tiempo específicos, además es una de las pocas variables que representan, de manera sencilla y objetiva la estructura de áreas forestales (Zeide, 2004). Se ha sugerido que poblaciones grandes son menos proclives a la extinción que las poblaciones pequeñas (Matthies et al., 2004). La densidad influye en la tasa de crecimiento, fecundidad, dispersión y la sobrevivencia (Huang et al., 2003).
	1-3	3	
	3-5	2	
	5-10	1	
	Más de 10	0	
Velocidad de crecimiento	>0.9 (muy lento)	4	La densidad de la madera está relacionada con la tasa de crecimiento. Existe una relación negativa entre la densidad de la madera y el crecimiento en diámetro de los árboles tropicales. Esto se explica por la mayor inversión de biomasa por unidad de diámetro en árboles con densidad de madera alta (King et al., 2005; Francis et al., 2017).
	0.7-0.9 (lento)	3	
	0.5-0.7 (medio)	2	
	0.3-0.5 (bajo)	1	
% cobertura ANP	Presente hasta en el 15 % del ANP	4	El porcentaje de cobertura de un área natural protegida implica cuan protegida esta una especie.
	Presente hasta en el 30 % del ANP	3	
	Presente hasta en el 45 % del ANP	2	
	Presente hasta en el 60 % del ANP	1	
	Presente en el 60 % o más del ANP	0	
Suelo (Profundidad)	Leptosoles (P) (<25 cm)	4	La profundidad del suelo implica una vulnerabilidad frente a eventos climáticos. El estrés hídrico que sufren las plantas depende, entre otros factores, de las características del suelo como son: capacidad almacenar agua y de su profundidad y textura (Tyree et al., 1998). El acceso a fuentes de agua profundas (además de la profundidad de raíces) puede mitigar la mortalidad de árboles por estrés hídrico (Chitra-Tarak et al., 2021).
	Chernozem (CH), Cambisol (CM), Histosol (HS), Phaeozem (PH), Solonchak (SC) (25 a 60 cm)	2	
	Arenosol (AR), Fluvisol (FL), Gleysol (GL), Luvisol (LV), Nitisol (NT), Regosol (RG), Vertisol (VR) (> 60 cm)	0	
Modelo CC	Disminuye entre 75 y 100 % de cobertura	4	Los modelos de cambio climático muestran el cambio en la distribución probable de las especies ante un escenario de cambio climático que podría
	Disminuye entre 50 % y 75 % de	3	

Parámetro	Característica	Puntaje	Justificación
	cobertura		ocurrir al año 2050 (RCP 2.6)
	Disminuye entre 25 y 50 % de cobertura	2	
	Disminuye menos 25 % de cobertura	1	
	No presenta cambios o aumenta	0	
Distancia a la costa del caribe (riesgo por incidencia de huracanes)	0-34 km	4	Distancia del registro a la costa del caribe, incluida la costa este de las islas de mayor tamaño (p. ej. Cozumel), a lo largo de la trayectoria que usualmente siguen los huracanes (este-oeste) (Maya-Martínez y Pozo, 2009).
	35-102 km	3	
	103-170 km	2	
	171-237 km	1	
	más de 238 km	0	

RESULTADOS

Las especies arbóreas seleccionadas pertenecieron a 16 familias y 24 géneros, el 28 % de estas se encuentran bajo alguna categoría de riesgo según la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2010), con una amplitud de distribución que varió entre una distribución restringida a una distribución ampliamente distribuida y con densidades que van desde un árbol por hectárea a más de 40 árboles por ha, y con densidades de madera entre 0.4 y 1.4 g cm⁻³.

Los factores que se consideraron como los más importantes fueron el cambio en la distribución potencial por efecto del cambio climático (modelo de cambio climático) y la distancia a la costa del Caribe, por lo que estos no fueron penalizados. La distancia a centros de población se penalizó con el 10 %, mientras que se penalizó con el 20, 30 y 40 % al tipo de suelo y densidad, amplitud de la distribución y

densidad de la madera, y estado de conservación y representación en una ANP, respectivamente.

Antes de la penalización, los factores más importantes por tener valores de riesgo altos y una sumatoria mayor a través de las especies fueron el tipo de suelo, seguido por el porcentaje de cambio en la distribución potencial por efecto del cambio climático, la distancia a centros de población y la distancia a la costa (Figura 2). Después de la penalización hubo cambios en el orden de los factores; no obstante, fueron los mismos cuatro: cambio en la distribución por el cambio climático, distancia a la costa, tipo de suelo y la distancia a centros de población, en este orden. A pesar de que la representación de las especies dentro de una ANP tuvo el mayor número de especies con el valor máximo de riesgo (8 especies con valor de riesgo 4), también tuvo una alta proporción de especies con valor nulo (7 especies con riesgo 0).

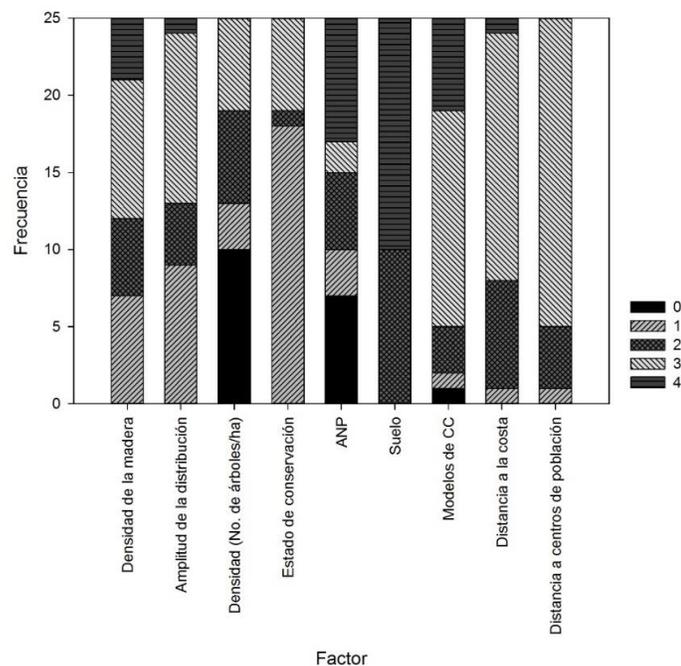


Figura 2. Número de especies (frecuencia) con los niveles de riesgo por factor (0 nulo, 1 bajo, 2 medio, 3 alto y 4 muy alto).

De acuerdo con el análisis de la matriz se obtuvieron cuatro categorías de riesgo (alto, medio, bajo y nulo). Estas categorías se establecieron de acuerdo con los valores máximos posibles cuando todos los factores tuvieran el valor de riesgo 1, 2 y 3 (sumatorias de 7, 14 y 21, respectivamente). La categoría de riesgo muy alto se consideró solo en el caso de que alguna especie tuviera los valores máximos para todos los factores (valores de 4 y sumatoria de 28); sin embargo, ninguna especie tuvo esta calificación, por lo que se omitió tal categoría. El 84 % de las especies se ubicaron en la categoría de susceptibilidad media, mientras que solo el 12 y 4 % de las especies se clasificaron en las categorías de riesgo bajo y alto, respectivamente. Solo una especie perteneció a la categoría de riesgo alto (*Platymiscium yucatanum*).

Los factores con mayor aporte a la vulnerabilidad de riesgo después de la penalización fueron el porcentaje de cambio en la distribución potencial por efecto del cambio climático. El 80 % de las especies mostraron disminución de su área de distribución de más del 50 % respecto al área actual. Únicamente *Pseudobombax ellipticum*, mostró un incremento de más del 50 % en

su área de distribución; mientras que especies como *Guaicum sanctum*, *Astronium graveolens*, *Dendropanax arboreus*, *Metopium browni* y *Swartzia cubensis* mostraron una reducción casi total de su distribución geográfica dentro de la península de Yucatán.

Dentro de las variables usadas para la modelación del área de distribución potencial, las que tuvieron mayor contribución fueron la precipitación media anual (PMA), la topografía (elevación sobre el nivel del mar), isotermalidad, PPT del cuarto del año más seco y la temperatura media anual (TMA). El rango diurno medio y la temperatura del cuarto del año más seco mostraron valores altos de contribución al modelo, pero solo en 2 especies (Figura 3). Hubo una alta variación del porcentaje de contribución de las variables climáticas entre las especies, con valores máximos de 42 %. La topografía y la PMA fueron de las variables más importantes en la mayoría de las especies, únicamente no fueron de las primeras cuatro variables más importantes en 4 y 6 especies, respectivamente.

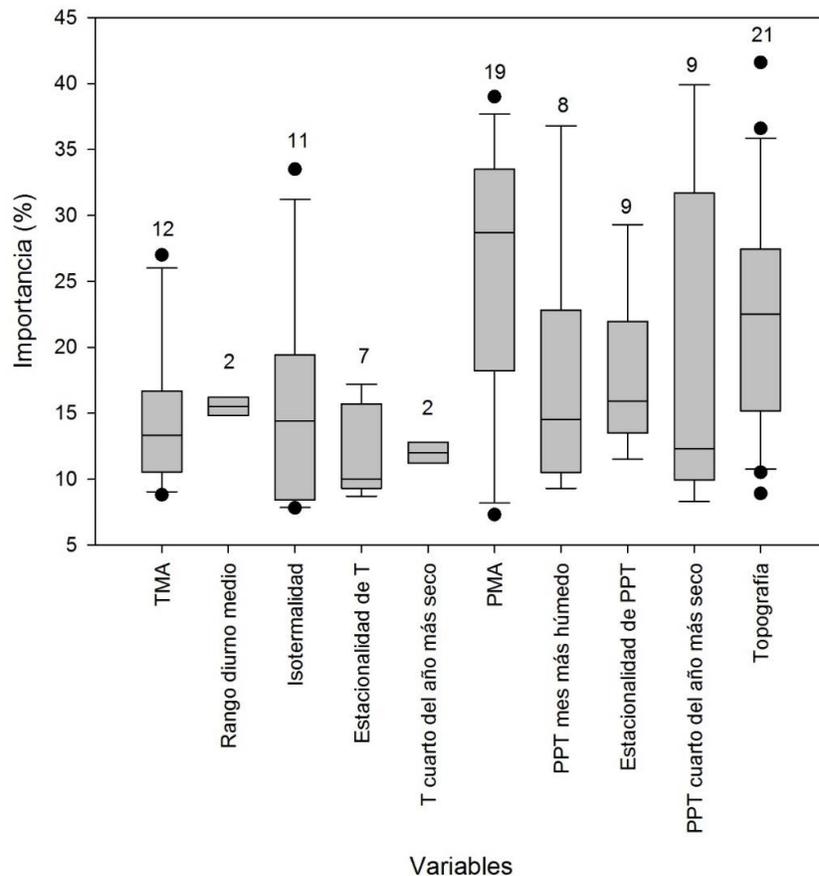


Figura 3. Porcentaje de importancia de las variables ambientales y la topografía en los modelos de distribución potencial de las especies (modelo MAXENT). Únicamente se incluyeron las primeras cuatro variables más importantes por especie. Los números sobre las cajas indican el número de veces que la variable estuvo entre las primeras cuatro variables de mayor importancia por especie (valor máximo = 25 especies).

El modelo de cambio climático RCP 2.6 proyectó un aumento en la temperatura media anual y de la temperatura del cuarto del año más seco de 1.3 °C en el área de distribución de las especies consideradas en este estudio. Respecto a la precipitación, el modelo mostró una reducción de 103 mm en la PMA, mientras que hubo una reducción de 10 y 9 mm de precipitación del mes más húmedo y del cuarto del año más seco, respectivamente (Figura 4).

La distancia al centro de población, la distancia a la costa y la densidad de la madera fueron los factores que más aportaron en la categoría de riesgo medio. El 80 % de las especies se encuentran a 5 km de algún centro de población, y el resto a distancias mayores a 10 km. El 70 % de las especies se encuentran entre 35 y 102 km de la costa del caribe y el 23 % a más de 100 km. El factor densidad de la madera, el 52 % de las especies presentan una densidad alta y muy alta, destacando *S. cubensis* y *G. sanctum*; el resto de las especies se caracterizan por una densidad media a baja.

Respecto al tipo de suelo, el 60 % de las especies forestales se distribuyeron sobre suelos de tipo leptosoles (LP) con una profundidad menores a 25 cm clasificados como suelos muy someros sobre roca dura o material altamente calcáreo. Solo algunas especies como las de mangle (*L. racemosa*, *C. erectus*, *R. mangle*, *A. germinans*, *Astronium graveolens* entre otras) se encuentran en suelos con

una profundidad entre 60 cm 1.20 m, clasificados como suelos con una vulnerabilidad media a la erosión.

El 4 % de las especies forestales fue considerada como riesgo alto, el resto de las especies (96 %) fueron catalogadas como riesgo medio y bajo; no se registraron especies en la categoría de susceptibilidad nula. El *Platymiscium yucatanum* fue la única especie catalogada en la categoría de susceptibilidad de riesgo alto, mientras que, las especies catalogadas con susceptibilidad de riesgo medio y alto son especies que presentaron una disminución mayor del 50 % de su distribución potencial, según el modelo de cambio climático para el año 2050, además de encontrarse en un rango de cercanía a la costa de entre 0-35 km y a menos de 5 km de algún centro de población, y más del 50 % de sus poblaciones se encuentran establecidas en suelos someros (Figura 5).

Las especies catalogadas como riesgo bajo son especies que presentan densidades mayores a 5 árboles por hectárea, con distribución mayor al 15 % del territorio nacional, un porcentaje mayor al 45 % de su distribución en la península de Yucatán y más del 45 % de sus poblaciones se encuentran dentro de un área natural protegida. Así mismo, la mayor parte de estas especies se encuentran en suelos con profundidades mayores a 60 cm y alejadas de la costa y de centros de población.

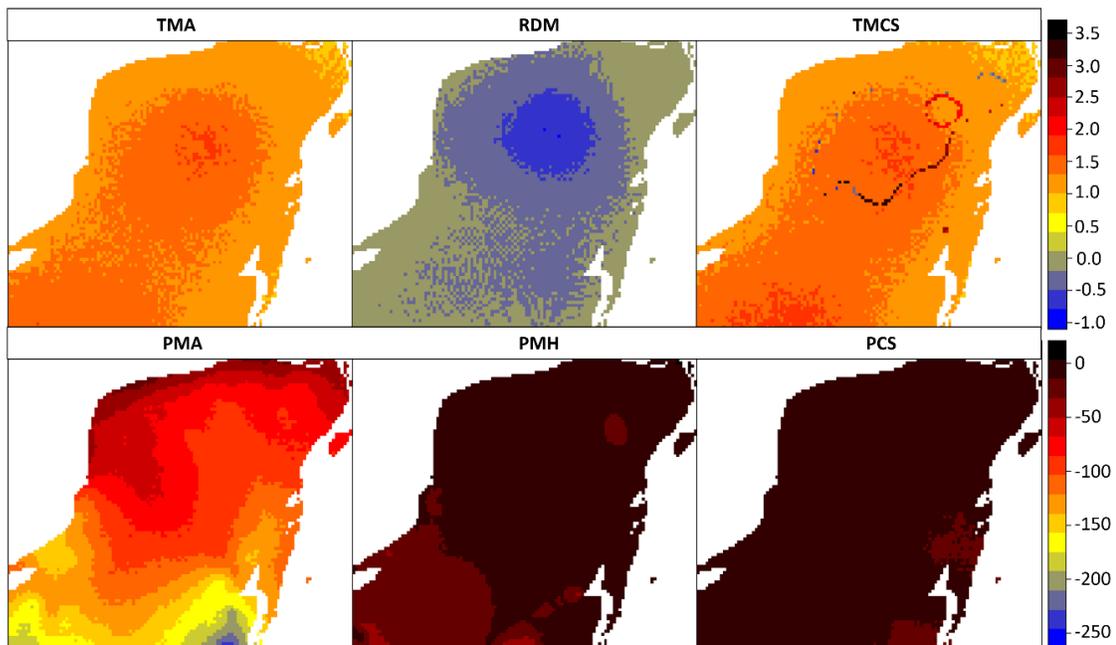


Figura 4. Cambios en las variables ambientales en la península de Yucatán de acuerdo con el presente y al modelo de cambio climático RCP 2.6. (TMA temperatura media anual; RDM rango diurno medio; TMCS temperatura del trimestre del año más seco; PMA precipitación media anual; PMH precipitación del mes más húmedo; PCS precipitación del trimestre del año más seco).

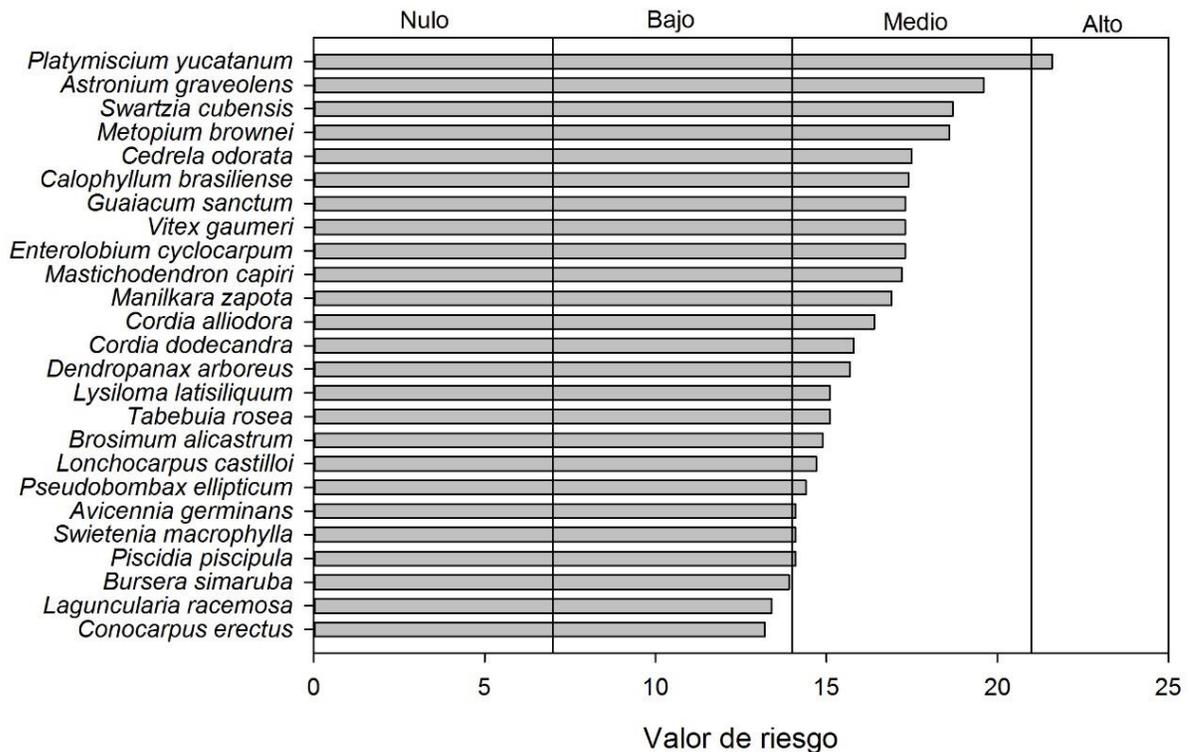


Figura 5. Valor de riesgo final por especie. Las líneas verticales indican los límites entre los niveles de riesgo.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados del estudio, de las 25 especies seleccionadas el granadillo (*P. yucatanum*) fue la única especie considerada como de alto riesgo, debido a que es una especie que mostró una disminución de más del 50 % de su superficie de acuerdo al modelo de cambio climático, a que tiene menos de dos árboles por hectárea, a su baja tasa de crecimiento (alta dureza de madera) y a su distribución restringida mayormente a la península de Yucatán; aunque esta especie actualmente no está considerada bajo ninguna categoría de protección (SEMARNAT, 2010); sin embargo, en otras regiones sí se le considera como una especie en peligro de extinción por su baja densidad poblacional (Corea-Arias *et al.*, 2016).

Dentro de las especies catalogadas de susceptibilidad media se encuentran 21 especies de las cuales solo el 29 % está catalogada bajo alguna categoría de protección *A. graveolens*, *C. dodecandra*, *P. piscipula*, *L. latisiliquum*, *G. sanctum*, entre otras. En la categoría de susceptibilidad baja se encuentra el 12 % de las especies. En esta categoría, las especies de mangle blanco y botoncillo, aunque actualmente están consideradas como especies amenazadas, son especies que, de acuerdo con los resultados, se desarrollan en suelos profundos, y presentan una alta

densidad por hectárea en sus áreas de distribución. Aunque el aumento del nivel del mar atribuido al calentamiento global puede representar una amenaza adicional para los manglares, algunas especies podrían beneficiarse, como es *Rhizophora mangle* que presenta características que la podrían favorecer como la velocidad de crecimiento de las plántulas y la capacidad de sobrevivir a las inundaciones mientras que otras especies de mangle podrían verse afectadas como *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa* que las plántulas no sobreviven a la inundación a largo plazo (Nizam *et al.*, 2022; Smith-Martin *et al.*, 2020; Snyder *et al.*, 2022).

Los factores de riesgo regularmente se asocian con causas directas que pueden causar la mortalidad de las especies arbóreas, como en el caso de plagas y enfermedades, tala y muerte por sequías prolongadas; sin embargo, factores como tormentas, huracanes y vientos intensos, pueden promover el desarraigo de árboles lo cual es considerado un factor natural, pero acontece esporádicamente (Lases-Hernández *et al.*, 2020). Sin embargo, el aumento de la frecuencia e intensidad de estos eventos podría poner en riesgo las poblaciones más cercanas a la costa del caribe, por lo que se consideró la cercanía a la costa del caribe como un factor de riesgo ya que es la trayectoria que usualmente siguen los huracanes (Maya-Martínez y Pozo, 2009). Aunque este riesgo depende en gran

medida de la intensidad y dirección del evento meteorológico (Boose *et al.*, 2016).

Según los resultados, la mayoría de las especies seleccionadas se encuentran en la categoría de riesgo alto respecto a la cercanía a la costa del Caribe (35 - 102 km). Debido a que la península de Yucatán al presentar una topografía casi plana (elevación máxima de 210 msnm) (Bautista *et al.*, 2011), permite que los fuertes vientos de las tormentas tropicales y huracanes sean devastadores aún varios cientos de kilómetros tierra adentro (Jaramillo *et al.*, 2018; Parker *et al.*, 2018). Aunque algunas especies de rápido crecimiento pueden beneficiarse de este tipo de eventos, al crear espacios en el dosel modificando la estructura del bosque. Algunos estudios han mostrado que la recuperación de la estructura del bosque puede tardar más de diez años (Wigner *et al.*, 2020). No obstante, la productividad del ecosistema se recupera en menor tiempo (Sánchez-Rivera, 2022). Por otra parte, el tipo de suelo, la edad del bosque y la topografía son algunos de los componentes que pueden favorecer al proceso de desarraigo del arbolado (Peterson, 1995). En este estudio se consideró además la profundidad del suelo como un factor de riesgo por la alta susceptibilidad a la erosión y la elevación de suelo en zonas de manglar (Howes *et al.*, 2010; Mulcahy *et al.*, 2016). Los resultados muestran que el 80 % de las especies se distribuyen en suelos someros sobre material calcáreo, con una profundidad menor a 25 cm, con un alto riesgo de erosión. Únicamente algunas especies como los manglares se desarrollan en suelos profundos. Sin embargo, los manglares se enfrentan a otras condiciones adversas como son la alta salinidad y su exposición a eventos meteorológicos extremos ya que son el primer contacto en caso de tormentas y huracanes. Por lo que estas especies han desarrollado complejas adaptaciones morfológicas, anatómicas, fisiológicas y moleculares que les permiten sobrevivir en condiciones de alto estrés ambiental (Nizam *et al.*, 2022).

De acuerdo con los resultados, el principal riesgo de las especies forestales es por el cambio climático, donde más del 90% de las especies probablemente pierdan más de la mitad de su ambiente (nicho) idóneo para su establecimiento. En el área de distribución de las especies estudiadas, hubo un incremento de la temperatura media ambiente de 1.3 °C, además de una disminución de la precipitación media anual de 100 mm en el escenario climático RCP 2.6. Las condiciones de mayor aridez y temperatura reducirán la disponibilidad de agua, principalmente durante la temporada de sequía cuando las especies forestales son más vulnerables (Brum *et al.*, 2017). Sin embargo, el acceso de las raíces a aguas profundas podría compensar el riesgo

de mortalidad de los árboles relacionado con el estrés hídrico (Chitra-Tarak *et al.*, 2021).

La cercanía de las especies forestales a centros de población se consideró como un factor de riesgo alto principalmente para las especies de alto valor comercial, como la Caoba, Cedro, Granadillo (Jiménez-González *et al.*, 2017; Romo-Lozano *et al.*, 2017). Además, la cercanía a centros de población facilita la explotación de estas especies maderables (Vergara y Gayoso, 2004). La mayoría de las poblaciones de las especies estudiadas estuvieron a menos de 5 km de distancia a centros de población. No obstante, en este estudio no se consideró el tamaño de la población humana como otro factor de riesgo o como un elemento de peso en la evaluación del factor, que existan vías de acceso a las comunidades, sin importar su tamaño, facilita el acceso a los macizos de bosque. La cercanía de las comunidades a zonas forestales de igual manera implica un mayor riesgo de incendios forestales, lo cual está correlacionado con la densidad de la población y las vías de acceso (Pérez-Verdín *et al.*, 2013).

La densidad de la madera fue uno de los factores que más aportó a la categoría de riesgo medio, aunque este factor depende de las características intrínsecas de la especie es la densidad de la madera, la cual está estrechamente con características ecológicas como la mortalidad (Greenwood *et al.*, 2017), las tasas de crecimiento (Muller-Landau, 2004) y la capacidad de almacenamiento de carbono (Greenwood *et al.*, 2017); sin embargo, en este estudio la densidad de la madera fue considerada como una característica ligada a la tasa de crecimiento, considerando que las especies de lento crecimiento tienen menor posibilidad de adaptarse rápidamente a los cambios de corto plazo.

Aunque este estudio está fundamentado bajo un análisis robusto, se debe tomar en consideración que los factores seleccionados, no necesariamente representan todos los factores que más afectan a las especies forestales, además de que cada especie tiene diferentes respuestas fisiológicas ante diferentes eventos y no se toma en cuenta su plasticidad genética.

CONCLUSIONES

En este estudio se identificaron factores de riesgo ambientales, intraespecíficos y antropogénicos que afectan a 25 especies forestales de la península de Yucatán. De estas especies, solo una se identificó en la categoría de susceptibilidad alta, mientras que 24 de ellas se identificaron como susceptibilidad de riesgo medio y bajo. El mayor factor de riesgo fue por efecto del cambio climático, seguido por la cercanía

de las especies forestales a centros de población, cercanía a la costa del Caribe y el tipo de suelo. De las especies que se identificaron en la categoría de riesgo medio solo el 26 % se encuentra bajo alguna protección, lo que sugiere que más acciones en las selvas semihúmedas de la península de Yucatán son necesarias para la conservación de las especies forestales, tales como el aumento de áreas naturales protegidas, y reducción del cambio de uso de suelo, lo cual asegurará además los servicios ambientales y de aprovisionamiento a las poblaciones humanas.

Funding. The CONACYT-Campeche, provided financial support to the Project QROO-2008-C02-108636

Conflict of interest. The authors declare that there has no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Nothing to declare. The research presents original data that have not been submitted to other journals at the same time.

Data availability. Data are available from the corresponding author (alfaro.teresa@inifap.gob.mx) upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **T Alfaro-Reyna** - Conceptualization, Funding acquisition, Methodology, Project administration, Formal Analysis, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **J Delgado-Balbuena** - Data curation, Methodology, Formal Analysis, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **F Arellano-Martín**: Methodology, Formal Analysis, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **A Maya-Martínez** - Conceptualization, funding acquisition, Project administration, Methodology, Formal Analysis, Validation. **X García-Cuevas** - Conceptualization, funding acquisition, Project administration, Methodology, Formal Analysis, Validation. **Y Aguilar-Duarte** - Methodology, Formal Analysis, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **CA Aguirre-Gutierrez** - Formal Analysis, Validation, Writing – review & editing.

REFERENCIAS

Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P. and Zinck, J.A., 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135(3–4), pp. 308–321. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.02.014>.

Boose, E.R., Foster, D.R., Barker Plotkin, A. and Hall, B., 2003. Geographical and historical variation in hurricanes across the Yucatan Peninsula. In: *The Lowland Maya Area*. [online] New York: Haworth. pp. 495–516.

Brum, M., Teodoro, G.S., Abrahão, A. and Oliveira, R.S., 2017. Coordination of rooting depth and leaf hydraulic traits defines drought-related strategies in the campos rupestres, a tropical montane biodiversity hotspot. *Plant and Soil*, [online] 420(1–2), pp. 467–480. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3330-x>.

Caballero, C. B., Ruhoff, A., and Biggs, T. 2022. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 808, p. 152134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>

Cardelús, C.L., Woods, C.L., Mekonnen, A.B., Dexter, S., Scull, P. and Tsegay, B.A., 2019. Human disturbance impacts the integrity of sacred church forests, Ethiopia. *PLOS ONE*, [online] 14(3), p. e0212430. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0212430>.

Chitra-Tarak, R., Xu, C., Aguilar, S., Anderson-Teixeira, K.J., Chambers, J., Detto, M., Faybishenko, B., Fisher, R.A., Knox, R.G., Koven, N. Kunert, J. Kupers, Nate G. McDowell, D. Newman, R. Paton, R. Pérez, L. Ruiz, L. Sack, M. Warren, Brett T. Wolfe, C. Wright, S.J.Wright, J. Zailaa, and McMahon, S.M., 2021. Hydraulically-vulnerable trees survive on deep-water access during droughts in a tropical forest. *New Phytologist*, [online] 231(5), pp. 1798–1813. <https://doi.org/10.1111/NPH.17464>.

CONABIO, 2010. Población por localidad. [online] Available at: <<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>> [Accessed 15 May 2022].

CONAFOR, 2015. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimiento de muestreo. Guadalajara, México.

Corea-Arias, E., Arnáez-Serrano, E., Moreira-González, I. and Castillo-Ugalde, M., 2016. Situación de nueve especies forestales en peligro crítico de extinción en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, [online] 13(33), pp. 36–46.

- <https://doi.org/10.18845/RFMK.V13I33.2576>.
- Edenhofer, O. (Ed.), 2015. Climate change 2014: mitigation of climate change (Vol. 3). Cambridge University Press.
- Fragoso-Servón, P. and Pereira Corona, A., 2014. El Karst de la porción este de la Península de Yucatán. *researchgate.net*. [online] <https://doi.org/10.13140/2.1.5098.5280>.
- Francis, E.J., Muller-Landau, H.C., Wright, S.J., Visser, M.D., Iida, Y., Fletcher, C., Hubbell, S.P. and Kassim, Abd.R., 2017. Quantifying the role of wood density in explaining interspecific variation in growth of tropical trees. *Global Ecology and Biogeography*, [online] 26(10), pp. 1078–1087. <https://doi.org/10.1111/geb.12604>.
- Geekiyange, N., Goodale, U.M., Cao, K. and Kitajima, K., 2018. Leaf trait variations associated with habitat affinity of tropical karst tree species. *Ecology and Evolution*, 8(1), pp. 286–295. <https://doi.org/10.1002/ECE3.3611>.
- Geekiyange, N., Goodale, U.M., Cao, K. and Kitajima, K., 2019. Plant ecology of tropical and subtropical karst ecosystems. *Biotropica*, 51(5), pp. 626–640. <https://doi.org/10.1111/BTP.12696>.
- Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C.D., Fensham, R., Laughlin, D.C., Kattge, J., Bönisch, G., Kraft, N.J.B. and Jump, A.S., 2017. Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecology Letters*, [online] 20(4), pp. 539–553. <https://doi.org/10.1111/ele.12748>.
- Howes, N.C., FitzGerald, D.M., Hughes, Z.J., Georgiou, I.Y., Kulp, M.A., Miner, M.D., Smith, J.M. and Barras, J.A., 2010. Hurricane-induced failure of low salinity wetlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [online] 107(32), pp. 14014–14019. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914582107>.
- Huang, W., Pohjonen, V., Johansson, S., Nashanda, M., Katigula, M.I.L. and Luukkanen, O., 2003. Species diversity, forest structure and species composition in Tanzanian tropical forests. *Forest Ecology and Management*, [online] 173(1–3), pp. 11–24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00820-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00820-9).
- Hubb, J., Quesado, J. and Pereño, R., 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, [online] 10(2), pp. 143–150.
- Jaramillo, V.J., Martínez-Yrizar, A., Maass, M., Nava-Mendoza, M., Castañeda-Gómez, L., Ahedo-Hernández, R., Araiza, S. and Verduzco, A., 2018. Hurricane impact on biogeochemical processes in a tropical dry forest in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, [online] 426, pp. 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.031>.
- Jiménez-González, A., Pincay-Alcivar, F.A., Ramos-Rodríguez, M.P., Mero-Jalca, O.F. and Cabrera-Verdesoto, C.A., 2017. Utilización de productos forestales no madereros por pobladores que conviven en el bosque seco tropical. [online] *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFOREs*. 5 (3), pp. 270–286. <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/264/html>
- King, D.A., Davies, S.J., Supardi, M.N.N. and Tan, S., 2005. Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia. *Functional Ecology*, [online] 19(3), pp. 445–453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.00982.x>.
- Lases-Hernández, F., Medina-Elizalde, M. and Benoit Frappier, A., 2020. Drip water $\delta^{18}\text{O}$ variability in the northeastern Yucatán Peninsula, Mexico: Implications for tropical cyclone detection and rainfall reconstruction from speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 285, pp. 237–256. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2020.07.008>.
- Laurance, W.F., Goosem, M. and Laurance, S.G.W., 2009. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, [online] 24(12), pp. 659–669. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.009>.
- Liu, L., Chen, X., Ciais, P., Yuan, W., Maignan, F., Wu, J., Piao, S., Wang, Y., Wigneron, J., Fan, L., Gentile, P., Yang, X., Gong, F., Liu, H., Wang, C., Tang, X., Yang, H., Ye, Q., He, B., Shang, J. and Su, Y., 2022. Tropical tall forests are more sensitive and vulnerable to drought than short forests. *Global Change*

- Biology*, [online] 28(4), pp. 1583–1595. <https://doi.org/10.1111/gcb.16017>.
- Maciel Mata, C.A., Manríquez Morán, N., Octavio Aguilar, P. and Sánchez Rojas, G., 2015. Geographical distribution of the species: a concept review. *Acta Universitaria*, [online] 25(2), pp. 3–19. <https://doi.org/10.15174/au.2015.690>.
- Martínez-Sánchez, J.L., 2019. Relación logística entre la diversidad de especies arbóreas de áreas naturales y los asentamientos humanos del trópico de México. *Acta Botanica Mexicana*, [online] (126). <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1484>.
- Matthies, D., Bräuer, I., Maibom, W. and Tschardtke, T., 2004. Population size and the risk of local extinction: empirical evidence from rare plants. *Oikos*, [online] 105(3), pp. 481–488. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.12800.x>.
- Maya-Martínez, A. and Pozo, C., 2009. Distribution patterns of Charaxinae (Lepidoptera: Nymphalidae) in Yucatan Peninsula, Mexico. *Acta zoológica Mexicana*, [online] 25(2), pp. 283-301. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372009000200004&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2448-8445.
- Mulcahy, N., Kennedy, D.M. and Blanchon, P., 2016. Hurricane-induced shoreline change and post-storm recovery: Northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 1(75), pp. 1192–1196. <https://doi.org/10.2112/S175-239.1/29782>.
- Muller-Landau, H.C., 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees. *Biotropica*, [online] 36(1), pp. 20–32. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2004.tb00292.x>.
- Nizam, A., Meera, S.P. and Kumar, A., 2022. Genetic and molecular mechanisms underlying mangrove adaptations to intertidal environments. *iScience*, [online] 25(1), p. 103547. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103547>.
- Palomo-Kumul, J., Valdez-Hernández, M., Islebe, G.A., Cach-Pérez, M.J. and Andrade, J.L., 2021. El Niño-Southern Oscillation affects the water relations of tree species in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Scientific Reports*, [online] 11(1), p. 10451. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89835-8>.
- Parker, G., Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Yépez, J.C., Maass, M. and Araiza, S., 2018. Effects of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, [online] 426, pp. 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.037>.
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M.A., Cortés-Ortiz, A. and Salmerón-Macías, M., 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. [online] *Madera y Bosques*. 19(2), pp. 37-58. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000200003&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2448-7597.
- Peterson, C.J., 1995. Forest reorganization: A case study in an old-growth forest catastrophic blowdown. *Ecology*, 76(3), pp. 763–774. <https://doi.org/10.2307/1939342>.
- Reynolds, J. and Stafford Smith, D., 2002. Do humans cause deserts? [online] *Global Desertification: Do humans cause deserts*. Berlin: Dahlem University Press.
- Rodríguez-Trejo, D.A., Hubert Tchikoué, Carlos Cíntora-González, Rafael Contreras-Aguado and Alfonso de la Rosa-Vázquez, 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, [online] 45(5), pp. 593–608.
- Romo-Lozano, J.L., Vargas-Hernández, J.J., López-Upton, J., Ávila Angulo, M.L., Romo-Lozano, J.L., Vargas-Hernández, J.J., López-Upton, J. and Ávila Angulo, M.L., 2017. Estimación del valor financiero de las existencias maderables de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México. *Madera y Bosques*, [online] 23(1), pp. 111–120. <https://doi.org/10.21829/MYB.2017.231473>.
- Sánchez-Rivera, G., 2022. Efectos de los ciclones tropicales en la resiliencia de la vegetación en la península de Yucatán, México, entre 2000-2012. *Investigaciones*. [online].
- SEMARNAT, 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. Diario Oficial de la Federación, [online] p. 78. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- Smith-Martin, C.M., Xu, X., Medvigy, D., Schnitzer, S.A. and Powers, J.S., 2020. Allometric scaling laws linking biomass and rooting depth vary across ontogeny and functional groups in tropical dry forest lianas and trees. *New Phytologist*, 226(3), pp. 714–726. <https://doi.org/10.1111/NPH.16275>.
- Snyder, C.M., Feher, L.C., Osland, M.J., Miller, C.J., Hughes, A.R. and Cummins, K.L., 2022. The Distribution and Structure of Mangroves (*Avicennia germinans* and *Rhizophora mangle*) Near a Rapidly Changing Range Limit in the Northeastern Gulf of Mexico. *Estuaries and Coasts*, [online] 45(1), pp. 181–195. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00951-0>.
- Tyree, M., Patiño, S. and Becker, P., 1998. Vulnerability to drought-induced embolism of Bornean heath and dipterocarp forest trees. *Tree Physiology*, 18(8-9), 583-588., [online] 18(8–9), pp. 583–588.
- Vergara, G. and Gayoso, J., 2004. Efecto de factores físico-sociales sobre la degradación del bosque nativo. *Bosque* (Valdivia), [online] 25(1), pp. 43–52. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000100004>.
- Villanueva-Fragoso, Ponce-Velez, García, C. and Presa, 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. [online]. Gobierno del estado de Tabasco. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad de Campeche, pp. 37-72.
- Wagner, F. H., H'erault, B., Bonal, D., Stahl, C. and Anderson, L. O., Baker, T. R., Becker, G. S., Beekman, H., Boanerges Souza, D., Botosso, P. C., Bowman, D. M. J. S., Br'auuning, A. and Brede, B., Brown, F. I., Camarero, J. J., Camargo, P. B., Cardoso, F. C. G., Carvalho, F. A., Castro, W., Chagas, R. K., Chave, J., Chidumayo, E. N., Clark, D. A., Costa, F. R. C., Couralet, C., da Silva Mauricio, P. H., Dalitz, H., de Castro, V. R., de Freitas Milani, J. E., de Oliveira, E. C., de Souza Arruda, L., Devineau, J.-L., Drew, D. M., D'unisch, O., Durigan, G., Elifuraha, E., Fedele, M., Ferreira Fedele, L., Figueiredo Filho, A., Finger, C. A. G., Franco, A. C., Freitas Junior, J. L., Galvao, F., Gebrekirstos, A., Gliniars, R., Gracca, P. M. L. D. A., Griffiths, A. D., Grogan, J., Guan, K., Homeier, J., Kanieski, M. R., Kho, L. K., Koenig, J., Kohler, S. V., Krepkowski, J., Lemos-Filho, J. P., Lieberman, D., Lieberman, M. E., Lisi, C. S., Longhi Santos, T., López Ayala, J. L., Maeda, E. E., Malhi, Y., Maria, V. R. B., Marques, M. C. M., Marques, R., Maza Chamba, H., Mbwambo, L., Melgacco, K. L. L., Mendivelso, H. A., Murphy, B. P., O'Brien, J. J., Oberbauer, S. F., Okada, N., Pelissier, R., Prior, L. D., Roig, F. A., Ross, M., Rossatto, D. R., Rossi, V., Rowland, L., Rutishauser, E. and Santana, H. and Schulze, M., Selhorst, D., Silva, W. R. and Silveira, M. and Spann, S., Swaine, M. D., Toledo, J. J., Toledo, M. M., Toledo, M., Toma, T., Tomazello Filho, M., Valdez Hernández, J. I., Verbesselt, J., Vieira, S. A., Vincent, G., Volkmer de Castilho, C., Volland, F., Worbes, M., Zanon, M. L. B. and Aragão, L.E.O.C., 2016. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. *Biogeosciences*, [online] 13(8), pp. 2537–2562. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2537-2016>.
- Wigneron, J.-P., Fan, L., Ciais, P., Bastos, A., Brandt, M., Chave, J., Saatchi, S., Baccini, A. and Fensholt, R., 2020. Tropical forests did not recover from the strong 2015–2016 El Niño event. *Science Advances*, [online] 6(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay4603>.
- Zeide, B., 2004. Optimal stand density: a solution. *Canadian Journal of Forest Research*, [online] 34(4), pp. 846–854. <https://doi.org/10.1139/x03-258>.