



El Colegio de la Frontera Sur

Distribución actual y potencial de *Swietenia macrophylla*
King (caoba) en tres escenarios de cambio climático en
México

Tesis

presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural
Con orientación en Manejo y Conservación de Recursos Naturales

Por

Gregorio Mario Ramírez Magil

2019



El Colegio de la Frontera Sur

Chetumal, Quintana Roo a 21 de junio de 2019

Las personas abajo firmantes, miembros del jurado examinador de:

Gregorio Mario Ramírez Magil

hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada

Distribución actual y potencial de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en tres escenarios

de cambio climático en México

para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural**

	Nombre	Firma
Directora	<u>Dra. María Angélica Navarro Martínez</u>	
Codirector	<u>Dr. Francisco Javier Botello López</u>	
Asesora	<u>Dra. Martha García Ortega</u>	
Sinodal adicional	<u>Dr. Edward A. Ellis</u>	
Sinodal adicional	<u>Dra. Ligia Esparza Olguín</u>	
Sinodal adicional	<u>M.C. Luis Candelario Sánchez Pérez</u>	
Sinodal suplente	<u>M.C. Holger Weissenberger</u>	

Agradecimientos

A la beca número 278323 otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la presente investigación y el posgrado. A la Comisión Nacional Forestal por la base de datos con los registros de caoba del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014 otorgados. Al comité tutorial de tesis por su valiosa participación y revisión en la realización del manuscrito.

Contenido

1. Resumen y palabras clave	5
2. Introducción	6
2.1. Descripción general de la especie	6
2.2. Importancia ecológica, económica y cultural	6
2.3. Modelos de distribución	8
3. Artículo científico sometido para su publicación a la revista Madera y Bosques	13
4. Conclusiones generales	40
5. Literatura citada.....	41

1. Resumen y palabras clave

Los modelos de nicho ecológico (MNE) permiten determinar la idoneidad de hábitat de las especies vegetales o animales. El objetivo del presente trabajo fue determinar la idoneidad de hábitat de la caoba *Swietenia macrophylla* King, en tres escenarios de cambio climático en México. Para la modelación se empleó el algoritmo MaxEnt. Como fuente primaria se utilizaron los registros de caoba en el Inventario Nacional Forestal 2009-2014. Los predictores fueron los *raster* de 19 variables bioclimáticas de las interpolaciones de datos observados y representativos de 1960-1990, 2050 (promedio de 2041 a 2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) de *Worldclim*, con una resolución espacial aproximada a 1 km² y el *raster* de edafología de la CONABIO con una resolución espacial de 90 m². Para el escenario 2050 se proyecta una pérdida de hábitat idóneo del 39.79 %; mientras que para el escenario 2070 esta es de 12.89 % respecto al escenario 2050. Se concluye que en los tres escenarios las condiciones de hábitat idóneo permanecerán principalmente en los estados de Campeche y Quintana Roo, siendo este último el que conservará cerca del 50% del hábitat idóneo. Los resultados contribuyen a la generación de estrategias de conservación, aprovechamiento y mitigación del impacto del cambio climático que aseguren la permanencia de la caoba y los ecosistemas en los que habita.

Palabras clave: Conservación, distribución, hábitat idóneo, MaxEnt, *Swietenia macrophylla*, variables bioclimáticas.

2. Introducción

2.1. Descripción general de la especie

Swietenia macrophylla King (caoba de hoja ancha, Meliaceae) es un componente natural de los ecosistemas tropicales de América. Se caracteriza por estar presente en las selvas altas o medianas perennifolias y subperennifolias (Pennington y Sarukhán 1998; Vester y Navarro 2007). Es una de las especies más emblemáticas del neotrópico y la de mayor importancia económica (ITTO 2005). Se distribuye en Centro América, desde México hasta Panamá, Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil (Lamb 1966; Pennington 1998; Snook 1994). Es un árbol con alturas hasta de 70 m y diámetro a la altura del pecho (dap) hasta de 3.5 m, con contrafuertes de 2 a 3 m de alto (Pennington y Sarukhán, 1998); aunque en la actualidad es difícil encontrar individuos con tales dimensiones (Navarro-Martínez 2015). Se desarrolla en zonas con temperatura anual promedio igual o superior a 24 °C, con precipitaciones anuales de 1 000 a 2 000 mm. También crece en zonas subtropicales, en altitudes desde el nivel del mar hasta 1 500 msnm. Se ha reportado que su rango de mayor distribución varía entre 391 a 750 msnm. Se desarrolla en diversos suelos, ricos y pobres en nutrientes; secos y bien drenados a muy húmedos con exceso de humedad; así como kársticos ricos en calcio y magnesio (Juárez et al. 1989; Chávelas et al. 1999; Morales-Ortiz et al. 2009; Negreros-Castillo et al. 2014), con un pH de neutro a alcalino, entre 6.9 a 7.7 y, con materia orgánica (Cordero y Boshier 2003).

2.2. Importancia ecológica, económica y cultural

La caoba ha sido un recurso importante desde la época prehispánica. Los Mayas de la Península de Yucatán la utilizaban como material para construcción de viviendas (puertas y ventanas (Rancancoj 2006) y canoas (Hammond 1982). Desde inicios del siglo XIX es aprovechada comercialmente en México (Galletti 1994; Navarro-Martínez 2015) y es considerada la base de la industria forestal maderable tropical (Pennington y Sarukhán 1998; SIRE 2003).

Estudios recientes sugieren que, debido a la fuerte extracción de los individuos de tallas grandes, las poblaciones comerciales de caoba están prácticamente extintas (Patiño-Valera

1997; Calvo y Rivera 2000). Aunado a ello, debido a los cambios en el uso del suelo de los hábitats naturales de la especie, en la actualidad su área de distribución natural ha sido modificada (Kammesheidt et al., 2001) y disminuido drásticamente. Para finales del siglo XX se calculaba una conservación tan solo del 36% del área de distribución original de esta especie (Calvo y Rivera 2000). Para el caso de México se estimó la pérdida del 76% de los bosques tropicales con caoba para este mismo periodo (Calvo y Rivera 2000). Sin embargo, en la actualidad aún existen importantes poblaciones naturales de caoba en la región Sur de México, particularmente en los estados de Campeche y Quintana Roo.

Por los motivos mencionados y debido a los problemas de reclutamiento de individuos de caoba (Navarro-Martínez 2015), desde 2003, la especie fue incluida en el apéndice II de la Convención Sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, por sus siglas en inglés), lo que significa que para su exportación debe demostrarse que la madera proviene de bosques manejados sustentablemente (Grogan y Barreto 2005; CITES 2013).

Aunado a la problemática antes mencionada, las condiciones de sequía incrementadas por el cambio climático en la Península de Yucatán (Orellana et al., 2009; Márdero-Jiménez 2011) y el Golfo de México (Méndez et al. 2007), resultan una amenaza para la distribución de la caoba, ya que, es una especie con requerimientos de buena precipitación para su germinación, sobrevivencia y establecimiento por lo que la limitación de agua produce una tasa de mortalidad alta de las plántulas (Vester y Navarro 2007; Vieira et al., 2008; Negreros et al. 2014). Además, estudios recientes muestran que el cambio climático tiene una profunda influencia en la especiación, y en el rango de expansión y contracción de la distribución de las especies (Balvanera et al. 2011; Peterson et al. 2003; Sharafi et al. 2014), que a nivel regional es determinada principalmente por la precipitación, la temperatura y la evotranspiración (Holdridge, 1967), factores que influyen en la sobrevivencia y reproducción de los individuos (Hutchinson, 1957; Hof, 2010); así como la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas (Gómez et al. 2007; Oswald Spring 2008).

2.3. Modelos de distribución

Una herramienta útil para el análisis de la distribución de especies son los modelos de nicho ecológico (MNE), que permiten proyectar la distribución potencial de una especie y conocer las condiciones ambientales que favorecen su adecuación (Hutchinson 1957). Estos modelos permiten simular los impactos que las modificaciones en el clima podrían ocasionar a los ecosistemas y la biodiversidad debido a los cambios en las variables ambientales (Magaña et al. 2000). Estos modelos asocian variables bioclimáticas a los registros de presencia y/o ausencia de las especies, asumiendo que el clima es uno de los factores más importantes en su distribución (Parmesan 2006; Hof 2010).

En la actualidad se han propuesto un gran número de modelos y algoritmos para proyectar la distribución potencial de las especies (Tabla 1). Uno de los más utilizados es MaxEnt (Phillips et al. 2006), por las ventajas que ofrece: 1. al requerir datos solo de presencia, en comparación con otros modelos que requieren datos de presencia y ausencia; 2. trabajar con muestras pequeñas de datos y 3. ofrecer resultados confiables; además de ser software de acceso libre. MaxEnt se basa en el concepto de nicho ecológico y, utiliza como fuente principal, datos solo de presencia espacial (longitud, latitud) de la especie, asociados a variables climáticas (Phillips et al. 2006).

En su evolución, los modelos de nicho han facilitado la elaboración de trabajos de la conectividad ecológica, el cambio climático y el hábitat idóneo, con la finalidad de explicar la distribución potencial de especies debida a tales factores (Tabla 2).

En años recientes se ha desarrollado otra herramienta que permite determinar las abundancias de las especies en espacios geográficos, el método de distancias al centroide propuesto por Maguire en 1973, sugiere que conforme las poblaciones se van acercando al centro de su nicho, su abundancia será mayor. Para su desarrollo este método se fundamenta, también, en los modelos de nicho ecológico (Hutchinson 1957), el cual utiliza información ambiental y un modelo de distribución generado previamente (Martínez-Meyer et al. 2012).

Los estudios basados en modelos de distribución que evalúen el impacto del cambio climático en el área de distribución natural de la caoba en México son prácticamente ausentes. En años recientes se realizaron dos investigaciones sobre la distribución de la caoba en la Península de Yucatán (Alfaro et al. 2014; Navarro-Martínez 2015), pero solo basan sus análisis en la búsqueda de la distribución actual y potencial de la especie sin relacionarla con otros aspectos como el cambio climático. Garza-López (2016) son los únicos que han intentado proyectar los cambios en la distribución de la caoba tomando en cuenta el cambio climático, pero para el periodo actual y para 1930.

El presente estudio tuvo como objetivo principal determinar el área de distribución presente de la caoba y proyectar su distribución en dos escenarios de cambio climático para los años de 1950 y 1970. Con ello, se busca contribuir con información necesaria y relevante para el manejo y conservación de las poblaciones remanentes de caoba en México a fin de asegurar la permanencia de la especie en el largo plazo y a través de su área de distribución natural.

Tabla 1. Descripción de los principales métodos empleados en el modelado de distribución potencial de especies.

Modelo	Nombre	Descripción general y supuestos	Fuente
ANN (BM)	Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks)	Se basan en la regresión no lineal y modelos discriminantes que pueden implementarse con software estadístico estándar.	Warren McCulloch y Walter Pitts (1943).
BIOCLIM	Algoritmo Bioclimático de envoltura (Bioclimatic Envelope Algorithm)	Calcula la similitud de una ubicación comparando los valores de las variables ambientales en cualquier ubicación con una distribución porcentual de los valores de ocurrencia de la especie. Las suposiciones principales son: (1) la distribución de la especie está determinada por el clima, (2) la distribución estadística de las variables climáticas es normal, y (3) todas las variables con intervalos restringidos influyen a la especie de interés.	Henry Nix (1986)
BRT (BM)	Árboles de Regresión (Boosting Regression Trees)	La idea general es calcular una secuencia de árboles de regresión simples, donde cada árbol sucesivo se construye para los residuos de predicción del árbol anterior.	Breiman et al. (1984).
CART (BM)	Árboles de clasificación y regresión (Classification and Regression Trees)	Los árboles explican la variación de una sola variable de respuesta por una o más variables explicativas. La variable de respuesta puede ser categórica (clasificación árboles) o numérica (árboles de regresión), y las variables explicativas pueden ser categóricas y/o numéricas.	Breiman et al. (1984), Clark y Pregibon (1992)

Tabla 1. Descripción de los principales métodos empleados en el modelado de distribución potencial de especies.

Modelo	Nombre	Descripción general	Fuente
ENFA	Análisis de factor de nicho ecológico (Ecological Niche Factor Analysis)	Utiliza un análisis de componentes principales modificado para desarrollar un modelo basado en datos de presencia.	Hirzel et al. (2002).
GAM (BM)	Modelos aditivos generalizados (Generalized Additive Models)	Son una extensión de los modelos tradicionales de regresión lineal para el análisis de los datos que incorporan la no linealidad y la regresión no paramétrica. El modelo está construido por la suma de funciones suaves (splines) de las variables predictivas, pudiendo ser estas variables continuas, variables categóricas, número de casos y series de datos.	Hastie y Tibshirani (1990).
GARP	Algoritmo genético para la producción de conjuntos de reglas (Genetic Algorithm for Rule-set Production)	Busca las asociaciones entre variables ambientales y la ocurrencia de las especies, contrastándola con las características ambientales a lo largo de toda el área de estudio.	Stockwell y Noble (1991), Stockwell (1992), Stockwell y Peters (1999).
GLM (BM)	Modelos lineales generalizados (Generalized Linear Models)	Los modelos lineales generales obtienen estimaciones de máxima verosimilitud de los parámetros utilizando un algoritmo iterativo de mínimos cuadrados re-ponderados.	McCullagh y Nelder (1989).
MAXENT	Maximum Entropy	Estima la distribución potencial del nicho ecológico de la especie con base en la localización de la distribución de máxima entropía (más cercana y uniforme) considerando que los valores esperados para cada una de las características analizada bajo esta distribución estimada, coincidan en su valor empírico promedio.	Phillips <i>et al.</i> (2006).
RF (BM)	Random Forest	Es un predictor que consiste en una colección de árboles de regresión de base aleatoria, de modo que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio muestreado de forma independiente y con la misma distribución para todos los nodos.	Breiman (2001).

Tabla 2. Aplicación en el modelado de distribución potencial de especies.

Aplicación	Descripción	Área
Distribución potencial	Basados en procedimientos estadísticos y cartográficos (Mateo <i>et al.</i> , 2011). Generan una distribución potencial de la especie, mediante el uso de información primaria (datos de presencia y/o ausencia de la especie) y secundaria (datos ambientales, topográficos, de uso de suelo del área donde se quiere predecir la distribución de la especie estudiada) (Guisan y Zimmernann 2000; Guisan y Thuiller 2005; Naoki <i>et al.</i> , 2006).	Fauna (Espinoza-García <i>et al.</i> 2014; Moterrubio-Rico <i>et al.</i> 2011; Torres y Jayat 2010; Chávez y Zarza 2009). Conservación de la biodiversidad (Sánchez-Cordero <i>et al.</i> 2000). Especies invasoras (Martínez-Meyer <i>et al.</i> 2012).
Distribución potencial y Cambio Climático	Permiten incorporar las fluctuaciones en las variables climáticas y simular el efecto de cambios en las mismas (Magaña <i>et al.</i> , 2000).	Forestal (Gómez-Díaz <i>et al.</i> 2007; Benito-Garzón <i>et al.</i> 2008, 2011, 2013; Ibañez-Campos 2011; Gutiérrez y Trejo 2014). Agrícola (Tinoco-Rueda 2011). Conservación de la biodiversidad (Romo <i>et al.</i> 2012).
Conectividad	Es “el grado en que el paisaje facilita o impide el movimiento de los recursos entre los parches (Taylor 1993), o “la relación funcional entre los parches de hábitat, debido al contagio espacial del hábitat y las respuestas del movimiento de los organismos a la estructura del paisaje” (With <i>et al.</i> 1997).	Conectividad del paisaje para la conservación (Correa 2016). Identificación de áreas de conservación potencial (Correa <i>et al.</i> 2014). Conectividad del hábitat para la conservación de la biodiversidad (Correa <i>et al.</i> 2016). Impacto antropogénico en la conectividad del hábitat (Correa <i>et al.</i> 2017).

3. Artículo científico sometido para su publicación a la revista *Madera y Bosques* Idoneidad de hábitat de la caoba en escenarios de cambio climático en México

Habitat suitability of mahogany in climate change scenarios in Mexico

Resumen

Los modelos de nicho ecológico (MNE) permiten determinar la idoneidad de hábitat de las especies. El objetivo del presente trabajo fue determinar la idoneidad de hábitat de la caoba *Swietenia macrophylla* King, en tres escenarios de cambio climático en México. Para la modelación se empleó el algoritmo *MAXENT*. Como fuente primaria se utilizaron los registros de caoba en el Inventario Nacional Forestal 2009-2014 (INFyS). Los predictores fueron los *raster* de 19 variables bioclimáticas de las interpolaciones de datos observados y representativos de 1960-1990, 2050 (promedio de 2041 a 2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) de *Worldclim*, con una resolución espacial aproximada a 1 km² y el *raster* de edafología de la CONABIO con una resolución espacial de 90 m². Para el escenario 2050 se proyecta una pérdida de hábitat idóneo del 39.79%; mientras que para el escenario 2070 esta es de 12.89% respecto al escenario 2050. Se concluye que en los tres escenarios las condiciones de hábitat idóneo permanecerán principalmente en los estados de Campeche y Quintana Roo, siendo este último el que conservará cerca del 50% del hábitat idóneo. Los resultados permitirán generar estrategias de conservación, aprovechamiento y mitigación del impacto del cambio climático que aseguren la sobrevivencia y uso de la caoba y los ecosistemas en los que habita.

Palabras clave: Conservación, distribución, hábitat idóneo, MaxEnt, *Swietenia macrophylla*, variables bioclimáticas.

Abstract

Ecological niche models (ENM) allow to determine the suitability of species' habitat. The objective of the present work was to determine the habitat suitability of mahogany, *Swietenia macrophylla* King, in three scenarios of climate change in Mexico. For modeling, the MAXENT algorithm was used. Mahogany records were obtained from the National Forest Inventory 2009-2014 (INFyS). The predictors were raster for 19 bioclimatic variables of interpolations of observed and representative data of 1960-1990, 2050 (average of 2041 to 2060) and 2070 (average of 2061-2080) of Worldclim, with an approximate spatial resolution of 1 km², and the edaphology raster from CONABIO with a spatial resolution of 90 m². For scenario 2050 a habitat loss of 39.79% is projected; while for the 2070 scenario there is an increase of 12.89% with respect to the 2050 scenario. It is concluded that in the climate change scenarios the ideal habitat conditions will remain mainly in the states of Campeche and Quintana Roo, the latter being the one that will keep close to 50% of the ideal habitat. The results will permit to generate strategies for conservation, use and mitigation from impacts of climate change, to ensure the survival and use of mahogany and the ecosystems in which it lives.

Keywords: Conservation, distribution, suitable habitat, MaxEnt, *Swietenia macrophylla*, bioclimatic variables.

Introducción

En la actualidad, el cambio climático está ocasionando variaciones regionales y globales en variables ambientales como la temperatura y la precipitación. Dichos cambios afectan la fenología y distribución de plantas, por sus requerimientos específicos de temperatura, humedad, precipitación y luz para su desarrollo (Deschenes y Greenstone, 2004; Parmesan, 2006). Cuando los límites de tolerancia a estas variables se alteran, las especies no pueden establecerse, crecer o reproducirse (Hutchinson, 1957).

Para comprender los impactos que el clima podría ocasionar a los ecosistemas y la biodiversidad, se han desarrollado una variedad de modelos que asocian variables bioclimáticas a los registros de presencia de las especies, asumiendo que el clima es uno de los factores más importantes en su distribución (Parmesan, 2006; Hof, 2010). Dichos modelos han resultado ser importantes herramientas, que, apoyadas con los Sistemas de Información Geográfica, han permitido modelar la distribución presente y futura de diversas especies y ecosistemas (Jarvis *et al.*, 2005). Algunos de estos modelos están basados en el concepto del nicho ecológico, con el cual se pueden conocer los límites de tolerancia de las especies a las variables ambientales, más allá de los cuales las especies no pueden sobrevivir, crecer o reproducirse. Adicionalmente, se pueden incorporar las fluctuaciones en las variables climáticas y simular el efecto de cambios en las mismas (Magaña *et al.*, 2000). Esto permite comprender las posibles respuestas de los bosques al cambio climático, reflejadas en los procesos ecológicos, la estructura, composición y distribución de las especies.

Investigaciones que emplean los modelos de nicho ecológico (MNE) para determinar la idoneidad del hábitat, han reportado que las especies experimentarían reducción en su área de distribución en escenarios de cambio climático. Dichos trabajos han abordado esta problemática en el área forestal (Gómez-Díaz *et al.*, 2007; Benito-Garzón *et al.*, 2008; Benito-Garzón *et al.*, 2011; Ibañez-Campos, 2011; Benito-Garzón *et al.*, 2013; Gutiérrez y Trejo, 2014; Leguía *et al.*, 2015), agrícola (Tinoco-Rueda, 2011), conservación de la biodiversidad (Romo *et al.*, 2012) y el impacto de especies invasoras (Peterson, 2003), entre otras; contribuyendo al entendimiento de la magnitud y dirección de los cambios provocados por el cambio climático (Guisan *et al.*, 2007). Lo anterior permite hacer recomendaciones a los responsables del manejo forestal a nivel local y regional, en el mediano y largo plazo, promoviendo la conservación de las especies aprovechadas y sus hábitats.

La caoba (*Swietenia macrophylla* King), es una especie maderable emblemática de las selvas del neotrópico. En México esta especie tiene una larga historia de aprovechamiento que data desde inicios del siglo XIX (Galletti, 1994; Navarro-Martínez, 2015). Debido a la intensa extracción selectiva de los individuos de mayor talla en los últimos años, las poblaciones naturales con potencial comercial de esta especie han sido consideradas prácticamente extintas (Patiño-Valera, 1997; Calvo y Rivera, 2000). Motivo por el cual, desde 2003, la especie ha sido incluida en el apéndice II de la Convención Sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) (Grogan y Barreto, 2005; CITES, 2013). Además, el área de distribución original de la caoba en Mesoamérica ha disminuido drásticamente. Para México, se estima que para esta fecha se había perdido el 76% de los bosques tropicales con caoba (Calvo y Rivera, 2000).

Se calcula que para finales del siglo XX sólo se conservaba el 36% del área original de la esta especie. Sin embargo, algunos autores consideran que estas estimaciones son un tanto especulativas (Kommeter *et al.*, 2004).

Objetivos

El presente estudio tuvo como finalidad conocer el hábitat idóneo de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en México y proyectarlo a dos escenarios futuros de cambio climático.

Materiales y métodos

Swietenia macrophylla King (caoba) es un árbol con altura hasta de 70 m y diámetro a la altura del pecho hasta de 3.5 m, con contrafuertes de 2 a 3 m de alto (Pennington y Sarukhán 1998), aunque en la actualidad es difícil encontrar individuos con dichas dimensiones (Navarro-Martínez, 2015). Se desarrolla en zonas con temperatura anual promedio igual o superior a 24°C, precipitaciones anuales entre 1 000 y 2 000 mm. También crece en zonas subtropicales, en altitudes que van desde el nivel del mar hasta 1 500 m s. n. m.; se ha reportado que su rango de mayor distribución varía entre los 391 a 750 m s.n.m. Crece en diversos suelos, ricos y pobres en nutrientes; secos y bien drenados a muy húmedos con exceso de humedad; así como kársticos ricos en calcio y magnesio (Juárez *et al.*, 1989; Chávelas *et al.*, 1999; Morales-Ortiz *et al.*, 2009; Negreros-Castillo *et al.*, 2014), pH de neutro a alcalino (entre 6.9 a 7.7) y ricos en materia orgánica (Cordero y Boshier, 2003).

Área de estudio: El área de estudio se definió con base en el área de coincidencia entre los registros de presencia de la caoba del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS)

para el período 2009-2014 y las Provincias Biogeográficas de México propuestas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Espinosa-Organista *et al.* 2008), organizadas en un arreglo jerárquico (Rzedowski, 1978), las cuales son una regionalización propuesta por varios autores, basada en la distribución de plantas (Rzedowski y Reyna-Trujillo 1990), anfibios y reptiles (Casas-Andreu y Reyna-Trujillo 1990), mamíferos (Ramírez-Pulido y Castro-Campillo 1990), flora, vegetación y rasgos morfoestructurales (Ferrusquía-Villafranca 1990) y distribución de aves (Escalante *et al.* 1993).

Las áreas definidas en la Tabla 1 son: 1. Provincia de Oaxaca (Oax), 2. Provincia de Los Altos de Chiapas (Chi), 3. Provincia del Soconusco (Soc), 4. Provincia del Pacífico, 5. Provincia del Golfo de México, 6. Provincia Yucateca, y 7. Provincia del Petén (Figura 1) (Espinosa-Organista *et al.*, 2008).

Base de datos. Se utilizó como insumo principal 623 registros de presencia de caoba del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) para el período 2009-2014 proporcionados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Se consideraron los registros de la especie en los estados de la República Mexicana en donde se distribuye de manera natural, con base en el diseño de muestreo del INFyS que consta de conglomerados con una superficie de 1 600 m² (4 parcelas de 400 m²) dispuestos a 5 km de distancia entre sí. Se descartaron 353 registros de árboles que comparten el mismo conglomerado, con lo cual se integró una base de datos con 270 registros. Cabe mencionar que no hubo registros fuera del área de distribución histórica conocida (Pennington y Sarukhán, 2005; Negreros-Castillo *et al.*, 2014).

VARIABLES ECOLÓGICAS Y BIOCLIMÁTICAS. Para el modelado de hábitat idóneo se utilizó el conjunto de variables bioclimáticas de condiciones presentes (1960-1990), 2050 (promedio de 2041 a 2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) de *Worldclim* disponibles en <http://www.worldclim.org>, con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado (30 arc-segundos) y el *raster* de edafología obtenido de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), con una resolución espacial de 90 m² (3 arc-segundos). Los escenarios futuros corresponden a las proyecciones climáticas IPCC5 (Quinto Informe de evaluación del IPCC), estas se basan en posibles cambios en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés), por causas antropogénicas. Las emisiones de vías de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de 4.5 asumen que las emisiones mundiales anuales de GEI (medidas en equivalentes de CO₂), alcanzan su punto máximo alrededor del año 2040, y luego disminuyen (Hijmans *et al.*, 2005).

El *raster* de edafología se reproyectó con los *raster* de las 19 variables bioclimáticas, de 90 m² a 1 km², para homogenizar sus parámetros de extensión y sean compatibles entre sí, para generar los modelos de distribución potencial.

Para realizar el modelado se determinó el área de extensión de modelado (movilidad (M)) (Barve *et al.*, 2011), sobreponiendo los registros con los polígonos de provincias biogeográficas de México. Al área de superposición se le generó un buffer de 5 km como zona de amortiguamiento. Con este proceso se generó el polígono de extensión de modelado con el cual se delimitaron los *raster* de las 19 variables bioclimáticas y edafología de los tres escenarios. Se realizó un análisis de correlación de variables,

descartando 13 variables con una correlación $r > 0.7$ para evitar problemas de multicolinealidad, las variables finales para generar el modelo fueron: bio2 (Oscilación diurna de la temperatura), bio4 (Temperatura estacional), bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio15 (Estacionalidad de la precipitación), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido) y edafología (Tabla 2).

Idoneidad de hábitat

Escenario presente. El modelo de idoneidad de hábitat se realizó mediante el algoritmo *MaxEnt* (Máxima entropía, por sus siglas en inglés, Phillips *et al.*, 2006), el cual se basa en el concepto de nicho ecológico. Se utilizaron 270 registros de presencia de caoba, las variables de edafología y las seis variables bioclimáticas (Tabla 2). Las variables bioclimáticas de *Worldclim* han sido utilizadas para modelar el hábitat idóneo presente de la caoba en la Península de Yucatán (Alfaro-Reyna *et al.*, 2014; Navarro-Martínez, 2015; Navarro-Martínez *et al.*, 2018), sin embargo, en dichos estudios, el análisis se llevó a cabo a nivel de la península de Yucatán y no de México y no se realizaron proyecciones a futuro.

Para generar el modelo se utilizó el 80% de los registros de presencia seleccionados al azar, se establecieron los parámetros de modelado con un número máximo de 500 iteraciones y un límite de convergencia de 0.00001, un formato de salida lógico con valores de 0 (ausencia) y 1 (máxima idoneidad) (Alfaro-Reyna *et al.*, 2014). De los datos ingresados *MAXENT* realizó su propia validación utilizando el 95% para generar el modelo y el 5% para probarlo. Se consideró un valor mínimo de 0.8 de la prueba de *Receiver Operating Characteristic* (ROC) para tomar como válido el modelo y se utilizó la prueba de Jackknife para medir la importancia de cada variable para el modelo (Lobo *et al.*, 2007).

De manera adicional se utilizó el 20% de los registros de presencia para validar de manera independiente el modelo de salida con el programa *Partial Roc* (Osorio-Olvera *et al.*, 2018). Se establecieron los parámetros en un valor de error de omisión aceptado de $E=0.05$, 50% de datos al azar para cada submuestreo y 500 iteraciones para evaluar el área bajo la curva (AUC), donde la significancia se expresa como la razón entre el modelo predicho y el modelo aleatorio, cuyo valor debe ser mayor a 1, y se obtuvieron los valores estadísticos mínimos, máximos, media y desviación estándar, donde el modelo obtuvo valores mayores a 1 (≥ 1) (Tabla 3), lo que indica un buen ajuste del modelo de hábitat idóneo presente para la caoba.

Escenario 2050 y 2070. El método para las proyecciones en escenarios futuros 2050 y 2070 fue el mismo del escenario actual. Se utilizó el modelo de circulación general MRI-CGCM3. Puesto que la vía de concentración representativa RCP 2.6 no representan cambios muy significativos entre los escenarios, ya que asume que las emisiones mundiales anuales de GEI alcanzan su punto máximo entre 2010-2020 y luego disminuyen, y las RCP 6 y 8.5 son escenarios drásticos, nosotros utilizamos únicamente la proyección de emisiones de la vía de concentración representativa intermedia de RCP 4.5, utilizando como entrada los datos del escenario presente para generar el primer modelo y posteriormente para generar el siguiente modelo los datos del escenario futuro 2050 y 2070 respectivamente.

La proyección espacial del escenario presente, 2050 y 2070 se visualizaron con el programa *ArcMap* 10.4.1 y se utilizó el valor de máxima sensibilidad y máxima especificidad de 0.254, 0.238 y 0.275 (presente, 2050 y 2017 respectivamente), como umbral para

reclasificarlos con valores de 0 (ausencia) y 1 (presencia). A partir de la reclasificación se obtuvo un mapa con el número de píxeles con presencia, se extrajo el número de píxeles con presencia a país y estado, se convirtieron a número de hectáreas para comparar los cambios en las superficies de un escenario con respecto a otro.

Resultados

Escenario actual. El modelo generado con *MaxEnt* sugiere que las variables que presentan la mayor importancia en la idoneidad de hábitat de la caoba son la edafología (32.4%), la estacionalidad de la precipitación (Bio15, 14.7%) y la oscilación diurna de la temperatura (Bio2, 8.5%). El área idónea para *Swietenia macrophylla* en México de acuerdo al modelo fue de 8 935 108.92 ha, incluyendo los estados de Campeche, Chiapas, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán (Fig. 2A), donde Campeche (41.03%), Quintana Roo (32%) y Chiapas (8.71%) tuvieron la mayor cantidad de hábitat idóneo (Tabla 4).

Escenario futuro 2050. En el escenario 2050 se identificó una superficie de hábitat idóneo de 5 379 332.04 ha, lo que representa una pérdida de hábitat del 39.79% respecto al escenario presente (Fig. 2B). Los estados de Tabasco, Veracruz, Yucatán, Campeche y Chiapas tuvieron la mayor pérdida de hábitat idóneo con un 98.83, 90.59, 80.00, 45.48 y 34.05%, respectivamente. Sin embargo, a pesar de la pérdida de hábitat en el estado de Campeche, aún conserva el 37% de hábitat nacional idóneo en la zona sur principalmente, junto con Chiapas (9.54%) y Quintana Roo, donde el modelo señala una restricción del área de distribución significativa ya que mantiene 48.65% del hábitat idóneo para la caoba (Tabla 4).

Escenario futuro 2070. En el escenario 2070 se identificó una superficie de hábitat idóneo de 4 685 941.71 ha para *Swietenia macrophylla* en México, lo que representa una pérdida del 12.89% respecto al escenario 2050 y del 47.6% para el escenario presente. El modelo señala que el 90.82% del hábitat idóneo se concentra principalmente en los estados de Quintana Roo, Campeche y Chiapas con 56.89%, 24.96% y 8.97% respectivamente (Tabla 4). Lo cual indica que Quintana Roo representa un área relevante para la preservación de la caoba en México (Fig. 2C).

Discusión

En la actualidad los registros de presencia de caoba en el estado de Yucatán son prácticamente inexistentes (Patiño-Valera, 1997; Argüelles-Suárez, 1999; INFyS, 20004-2007 y 2009-2014), el modelo proyecta una pequeña área idónea hacia el noreste en el Área Natural Protegida de Ría Celestún, esto coincide con el modelo de distribución de caoba desarrollado por Argüelles-Suárez (1999) y Navarro-Martínez (2015), quienes indican que existe una pequeña población de caoba en la reserva. Asimismo, proyectó la presencia de caoba hacia la zona central de la Península de Yucatán donde converge con los estados de Quintana Roo y Campeche, en la región Calakmul-Balaam Kaax del Corredor Biológico Mesoamericano-México (CBM-M), el que mantiene zonas con un alto valor para la conservación de la biodiversidad; y que, además, constituyen importantes funciones de conectividad entre Áreas Protegidas en los estados del Sureste mexicano. El CBM-M opera desde el 2002 en 9 corredores ubicados en los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Chiapas, Tabasco y Oaxaca, áreas de gran importancia para la conservación de

los ecosistemas y su biodiversidad (CONABIO, 2018), en donde la caoba podría encontrar las condiciones adecuadas para establecerse y desarrollarse.

Los resultados de este trabajo también son similares a los modelos de hábitat idóneo presente de caoba generados para la Península de Yucatán por Alfaro-Reyna *et al.* (2014), Navarro-Martínez (2015), Navarro-Martínez *et al.* (2018), quienes sugieren, como en este caso, que el hábitat idóneo para la caoba se encuentra principalmente en los estados de Quintana Roo y Campeche, en donde los límites de distribución natural de la especie son hacia la zona centro-sur. Lo anterior, corresponde con la distribución reportada para la especie (INFyS 2014), sin embargo, el modelo señala que en Quintana Roo la distribución alcanza los límites más al norte hasta el municipio de Lázaro Cárdenas, lo cual coincide con lo reportado por Synnott (2009) para Kantunilkín (inventario de 1996).

Las variables explicativas del modelo de distribución responden a la ecología descrita para la especie, las cuales indican que la caoba se desarrolla mejor en suelos leptosoles o rendzinas (Negreros-Castillo *et al.*, 2014), en sitios con precipitación anual promedio de 1,388 mm (Vester y Navarro, 2007) y temperatura mínima promedio del mes más frío de 16.4 °C (Cordero y Boshier, 2003; CONAFOR, 2003), lo cual para este caso es coincidente con la selva mediana y baja subperennifolia, y alta subperennifolia (Vester y Navarro, 2007; INFyS, 2009-2014)..

La idoneidad de hábitat para el año 2050 disminuye en 45%, esto probablemente debido a la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura. Aunque esta pérdida de hábitat idóneo se podría incrementar si consideramos lo reportado por Calvo y Rivera (2000) en el diagnóstico de la caoba en Mesoamérica, en el que se estima que el área de

distribución natural de la caoba en la actualidad disminuye drásticamente. Por ejemplo, para México en los años 1990 se estima una pérdida del 76% de los bosques tropicales con caoba y para finales del siglo XX solo se esperaba contar con el 36% del área de distribución original de esta especie (Calvo y Rivera, 2000).

Para el escenario 2050, el modelo proyecta una reducción del 32% de hábitat idóneo para la caoba en la Península de Yucatán, contrario al estudio realizado por Garza-López *et al.*, (2016), quienes sugieren que se reducirá en un 60% para el 2030. El modelo aquí generado señala que las mejores condiciones de hábitat se encontrarán principalmente en la zona centro-sur de la Península de Yucatán, uno de los últimos grandes espacios continuos de vegetación en México y de gran riqueza biológica, motivo de integración de las regiones de Calakmul-Balaam Kaax y Sian Kaan-Balaam Kaax al proyecto CBM-México (CONABIO, 2018).

En el estado de Campeche las condiciones idóneas se presentan para la zona sur, especialmente en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, lo cual coincide con lo reportado por Garza-López *et al.* (2016). Estos mismos autores sugieren que en el estado de Quintana Roo perderá prácticamente el hábitat idóneo, sin embargo, nuestro modelo muestra que Quintana Roo mantendrá las condiciones climáticas adecuadas para la permanencia de la caoba. Lo anterior, concuerda con los patrones climáticos encontrado por Mardero-Jiménez (2011), que muestran una disminución de la precipitación promedio en la zona, con el incremento de sequías, y la mayor concentración de lluvias en los ejidos de la zona centro-sur de Quintana Roo.

La disminución del hábitat idóneo para el año 2070 es de 12.89% respecto al escenario 2050 y del 47.5% respecto al escenario presente. Aparentemente la pérdida del hábitat idóneo para la especie no es elevada debido a que las condiciones climáticas alcanzarán su punto máximo de GEI en el año 2040 e irán disminuyendo hacia el año 2070 (Hijmans *et al.*, 2005).

En los tres escenarios, más del 60% de la superficie idónea proyectada cae dentro del Corredor Biológico Mesoamericano-México (CBM-M) (CONABIO, 2018), zona de gran importancia para la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas tropicales. Sin embargo, hay que considerar que no se tomó en cuenta la pérdida de cobertura vegetal por causas antropogénicas y naturales, principalmente porque se pretende que la utilidad de este estudio incluya la toma de decisiones sobre el manejo de las poblaciones comerciales naturales que favorezcan la recuperación de las mismas. En este contexto para el 2010 ya se había perdido el 50% de la vegetación del CBM-M. En México la CONAFOR reporta un promedio de pérdida anual de 155 000 ha del 2005-2010 (Programa Nacional Forestal 2014), *Global Forest Watch* señala que México perdió en 2016, 274 mil 183 hectáreas de bosques, principalmente por el cambio de uso de suelo para expandir la frontera agrícola y ganadera, siendo Chiapas, Campeche, Quintana Roo, Oaxaca, Yucatán y Veracruz las entidades más afectadas y en las que la caoba se distribuye de manera natural.

Adicionalmente, hay que considerar que en la Península de Yucatán, particularmente en Quintana Roo y Campeche se conservan las mejores poblaciones de caoba, a pesar de la larga historia de aprovechamiento, de alrededor de 300 años de la especie y la presencia de poblaciones de origen maya que siguen haciendo uso de este recurso (Rancancoj, 2006;

Hammond, 1982) y que a través de las prácticas tradicionales de Roza-Tumba-Quema (RTQ) realizan un manejo de la selva que favorece su regeneración (Negreros-Castillo *et al.*, 2003). Además, hay ejidos forestales en donde la caoba sigue siendo la base de la industria forestal y la economía familiar (Pennington y Sarukhán, 1998; SIRE, 2003), lo cual puede ser un factor importante para fomentar el manejo sostenible de la especie y asegurar su permanencia en el corto, mediano y largo plazo.

Conclusiones

El área de hábitat idóneo para la caoba en México tiene una superficie de 8 935 108.92 ha, el escenario para 2050 indica una superficie de hábitat idóneo de 5 379 332.04 ha, lo que representa una pérdida de hábitat del 39.79% respecto al escenario presente, y en el escenario para 2070 se muestra una superficie de hábitat idóneo de 4 685 941.71 ha, lo que representa una pérdida de hábitat del 12.89% respecto al escenario 2050 y del 47.6% respecto al presente. En los tres escenarios las mejores condiciones para la caoba permanecerán en la Península de Yucatán, principalmente en los estados de Campeche y Quintana Roo; siendo este último en el que se conservará prácticamente el 50% del hábitat idóneo para los escenarios 2050 y 2070. La Península de Yucatán representa uno de los últimos espacios continuos de vegetación en México, lo que implica un reto para su permanencia en el futuro dada la presión sobre los recursos naturales, a causa de cambio de uso de suelo, deforestación e incendios. Si sumamos a lo anterior las proyecciones de disminución de hábitat idóneo en México, se vislumbra un panorama poco alentador para la caoba y otras especies forestales tropicales con requerimientos ecológicos similares. Sin embargo, con este trabajo, se presenta una oportunidad para dirigir el manejo de las

poblaciones naturales y la restauración de sitios transformados utilizando como especie focal a la caoba, que tiene un alto potencial de uso sostenible por comunidades y ejidos.

Agradecimientos

A la beca 278323 otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la presente investigación. A la Comisión Nacional Forestal por los registros de caoba otorgados para la realización de la presente investigación.

Referencias

Alfaro, R.T., Rodríguez, S.B., Maya, M.A., García, C.X., Lomas, B.C.T, Ramírez, M.G.M., & Murrieta, B.J.L. (2014). Árboles de importancia económica para la Península de Yucatán. INIFAP. CIRSE. Quintana Roo México. 23 p.

Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T. & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819.

Benito Garzón, M., Ruiz-Benito, P., & Zavala, M.A. (2013). Interspecific inferences in tree growth and mortality responses to environmental drivers determine potential species distributional limits in Iberian forests. *Global Ecology and Biogeography*, (*Global Ecol. Biogeogr.*) 22, 1141–1151. DOI: 10.1111/geb.12075

- Benito Garzón, M., Sánchez de Dios, R., & Sainz Ollero, H. (2008). Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied Vegetation Science* doi: 10.3170/2008-7-18348.
- Calvo, J. & Rivera H. (2000). El estado de la caoba en Mesoamérica. Memorias de Taller Regional. PROARCAS/CAPAS. 49p.
- Casas-Andreu, G., & T. Reyna-Trujillo. (1990). Provincias herpetofaunísticas. Mapa IV.8.6, en *Atlas Nacional de México*, vol. III, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Chávelas P., J. & Contreras G. J. A. (1999). Fenología de diez especies forestales del Estado de Quintana Roo. CIFAP Q. Roo Informa. Chetumal, Q. Roo. s/p.
- Cordero, J. & Boshier, D. H. (2003), Árboles de Centroamérica: un Manual para Extensionistas (Trees of Central America: a Manual for Extentionists).
- Deschenes, O. & Greenstone, M. (2004). Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the U.S. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
- Escalante, P., A.G. Navarro & A.T. Peterson. (1993). A geographic, ecological, and historical analysis of land birds diversity in Mexico, en T.P. Ramamoorthy, R. Bye y A. Lot (eds.), *Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution*. Oxford University Press, Nueva York, p. 281-307.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1990). Provincias biogeográficas con base en rasgos

- morfotectónicos. Mapa IV.8.10, en *Atlas Nacional de México*, vol. III, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Galletti, H. (1994). Actividades forestales y su desarrollo histórico. Estudio integral de la frontera México-Belice. *Análisis socioeconómico*. Tomo I. CIQRO. Chetumal, Quintana Roo. pp. 131-198.
- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J.M., Zamudio-Sánchez, F.J., López-Toledo, J.F., Domínguez-Álvarez, F.A. & Sáenz-Romero, Cuauhtémoc (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King Ante el cambio climático. *Botanical Sciences* 94 (1): 43-50, 2016. DOI: 10.17129/botsci.500
- Grogan, J. & Barreto, P. (2005). Big-leaf mahogany on CITES Appendix II: big challenge, big opportunity. *Conservation Biology* **19**(3), 973-976.
- Guisan, A., Zimmermann, N.E., Elith, J., Graham, C.H., Phillips, S. & Peterson, A.T. (2007). What the matter for predicting the occurrences of trees: techniques, data or species' characteristics? *Ecological Monographs*, **77**(4), 615-630.
- Gutiérrez, E. & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **85**, 179-188. DOI: 10.7550/rmb.37737
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones & A. Jarvis, (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276.

- Hof, C. (2010). Species distributions and climate change: current patterns and future scenarios for biodiversity. Department of Biology Faculty of Science University of Copenhagen.
- Hutchinson, G.E. (1957). Population studies-animal ecology and demography-concluding remarks. In: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22, 415-427.
- Ibañez-Campos, D. (2011). Efectos del cambio climático en las actividades agrarias y forestales.
- Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), 2009-2014. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- Jarvis, A., Yeaman, S., Guarino, L., Tohme, J. (2005). The role of geographic analysis in locating, understanding and using plant genetic diversity. *Methods in enzymology* 395, 279-298.
- Juárez G., V. A. Espinoza B. & Cedeño S. O. (1989). Observaciones fenológicas en 70 especies forestales tropicales y su importancia en la producción. In Memoria: Congreso Forestal Mexicano. Tomo II. Toluca, Edo. México. pp. 874 – 882.
- Leguía, E.J., Locatelli, B. & Imbach, P. (2009). Impacto del cambio climático en plantaciones forestales en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* 56-57, 150-159.

- Lobo, J.M., Jiménez-Valverde A., & Real, R. (2007). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez & C. Gay. (2000). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. *In: C. Gay, ed. 2003. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, U.S. Country Studies Program, México. 18 p.*
- Morales-Ortiz, E.R. & Herrera-Tuz, L. G. (2009). Cedro (*Cedrela odorata* L.) protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje. CONAFOR. REGIÓN XII Península de Yucatán. Programa de germoplasma forestal.
- Navarro-Martínez, M.A. (2015). Diagnóstico del estado actual de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en los bosques manejados de Quintana Roo, México: perspectivas para su manejo. Tesis de doctorado. Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. 132 p.
- Negreros-Castillo, P., Cámara-Cabrales, L., Devall, M.S., Fajvan, M.A., Mendoza-Briseño, M.A., Mize, C.W. & Navarro-Martínez, A. (2014). Silviculture of the Mahogany forest of Quintana Roo, Mexico, Criteria and recommendations. 93 p.
- Osorio-Olvera L., Barve, V., Barve, N., Soberón, J., & Falconi, M. (2018). ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distribution models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4. <https://github.com/luismurao/ntbox>

- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **37**, 637–69. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Patiño Valera, F. (1997). Recursos genéticos de *Swietenia* y *Cedrela* en los neotrópicos: Propuesta para acciones coordinadas. Roma, IT, V. 58p.
- Pennington, T.D. & J. Sarukhán K. (2005). Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Ediciones Científicas Universitarias, 3da. Ed. UNAM-FCE. México. 535 p. 266.
- Pennington, T.D. & J. Sarukhán. (1998). Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Fondo de cultura economía México, D. F.
- Peterson, A.T. (2003). Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology* 78: 419-433.
- Romo, H., Sanabria, P., & García-Barros, E. (2012). Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución de lepidópteros del género *Boloria* Moore, en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae)
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa, México.
- Rzedowski, J., & T. Reyna-Trujillo. (1990). Provincias florísticas. Mapa IV.8.3, en *Atlas Nacional de México*, vol. III, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Synnott, T.J. (2009). La caoba en la península de Yucatán: ecología y regeneración.

Comisión Nacional para el Uso del Conocimiento y la Biodiversidad. Corredor Biológico Mesoamericano México.

Tinoco-Rueda, J. A., Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29 (2), 161-168.

Tabla 1. Principales características de las provincias biogeográficas en México. En paréntesis se indica el porcentaje del tipo de vegetación de cada provincia.

Provincia	Zona	Clima	Tipo de vegetación (%)
Oaxaca (Oax)	Sierra Madre de Oaxaca Sierra de Zongolica, Ver.		Bosque Mesófilo de montaña (44)
			Selva perennifolia (17)
			Bosque de coníferas (15)
			Bosque de encinos (11)
			Selva caducifolia (10)
P. Los Altos de Chiapas (Chi)	Mesetas y serranías del N de Chiapas Sierra de Cuchumatanes (Guatemala)	Templado-húmedo 1 000 mm precipitación promedio anual	Matorral xerófito (3)
			Bosque de coníferas (47)
			Bosque de encinos (21)
P. Soconusco (Soc)	Sierra Madre de Chiapas-Guatemala	+ 1 500 mm precipitación promedio anual	Bosque Mesófilo de montaña (20)
			Bosque de coníferas (35)
P. Pacífico	Río Piaxtla – Chiapas	Cálidos-subhúmedos 500-1500 mm año ⁻¹ 0-400 m.s.n.m.	Bosque Mesófilo de montaña (31)
			Selva alta perennifolia (25)
P. Golfo de México	Río San Fernando – Río Candelaria	1 000 – 2 000 mm Precipitación promedio anual	Selva caducifolia (60)
			Selvas alta y mediana perennifolia (57)
P. Yucateca	Península de Yucatán	Tropical húmedo (95) semiárido (5)	Vegetación hidrófila (8)
			Selva baja caducifolia (85)
P. Peten	SE Península de Yucatán – Petén (Guatemala) y Belice Sierra de los Cuchumatanes hasta la Bahía de Amatique		Selva lata perennifolia (72)
			Selva baja espinosa (17)

Tabla 2. Variables bioclimáticas consideradas para la proyección de los períodos de condiciones presentes (1960-1990) y futuros (2050, promedio de 2041 a 2060; y 2070, promedio de 2061-2080), y edafología. Todas las variables fueron obtenidas de Worldclim, excepto edafología cuya fuente es la CONABIO.

Clave	Variable	Utilizada
BIO1	Temperatura media anual.	No
BIO2	Oscilación diurna de la temperatura.	Si
BIO3	Isotermalidad.	No
BIO4	Temperatura estacional.	Si
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido.	No
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío.	Si
BIO7	Oscilación térmica anual.	No
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo.	Si
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco.	No
BIO10	Temperatura promedio del trimestre más cálido.	No
BIO11	Temperatura promedio del trimestre más frío.	No
BIO12	Precipitación anual.	No
BIO13	Precipitación del mes más lluvioso.	No
BIO14	Precipitación del mes más seco.	No
BIO15	Estacionalidad de la precipitación.	Si
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo.	No
BIO17	Precipitación del trimestre más seco.	No
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido.	Si
BIO19	Precipitación del trimestre más frío.	No
Edafología		Si

Tabla 3. Estadísticos de *Partial ROC* para estimar la diferencia entre el modelo predicho y el modelo aleatorio.

Mínimo	1.60
Máximo	1.95
Media	1.82
Desviación estándar	0.06

Tabla 4. Superficies estimadas en porcentaje y ha de *Swietenia macrophylla* King. en escenarios de hábitat idóneo presente y futuros (2050 y 2070) en México.

Estado	Escenario Actual		Estado	Escenario 2050		Estado	Escenario 2070	
	% Superficie	ha		% Superficie	ha		% Superficie	ha
Campeche	41.037	3,666,743.55	Quintana Roo	48.651	2,617,100.91	Quintana Roo	56.893	2,665,967.76
Quintana Roo	32.009	2,860,051.32	Campeche	37.160	1,998,956.88	Campeche	24.965	1,169,863.74
Chiapas	8.713	778,496.49	Chiapas	9.544	513,404.64	Chiapas	8.970	420,341.40
Veracruz	5.853	523,005.03	Yucatán	1.823	98,079.66	Veracruz	4.236	198,494.55
Yucatán	5.487	490,311.81	Oaxaca	1.576	84,760.20	Yucatán	2.748	128,783.61
Tabasco	4.631	413,768.16	Veracruz	0.915	49,212.81	Oaxaca	2.047	95,917.41
Oaxaca	2.136	190,883.43	Guerrero	0.196	10,551.78	Tabasco	0.103	4,843.44
Michoacán	0.130	11,589.66	Tabasco	0.090	4,843.44	Puebla	0.028	1,297.35
Puebla	0.003	259.47	Michoacán	0.035	1,902.78	Michoacán	0.007	345.96
			Puebla	0.010	518.94	Guerrero	0.002	86.49
México	100.00%	8,935,108.92	México	100.00%	5,379,332.04	México	100.00%	4,685,941.71

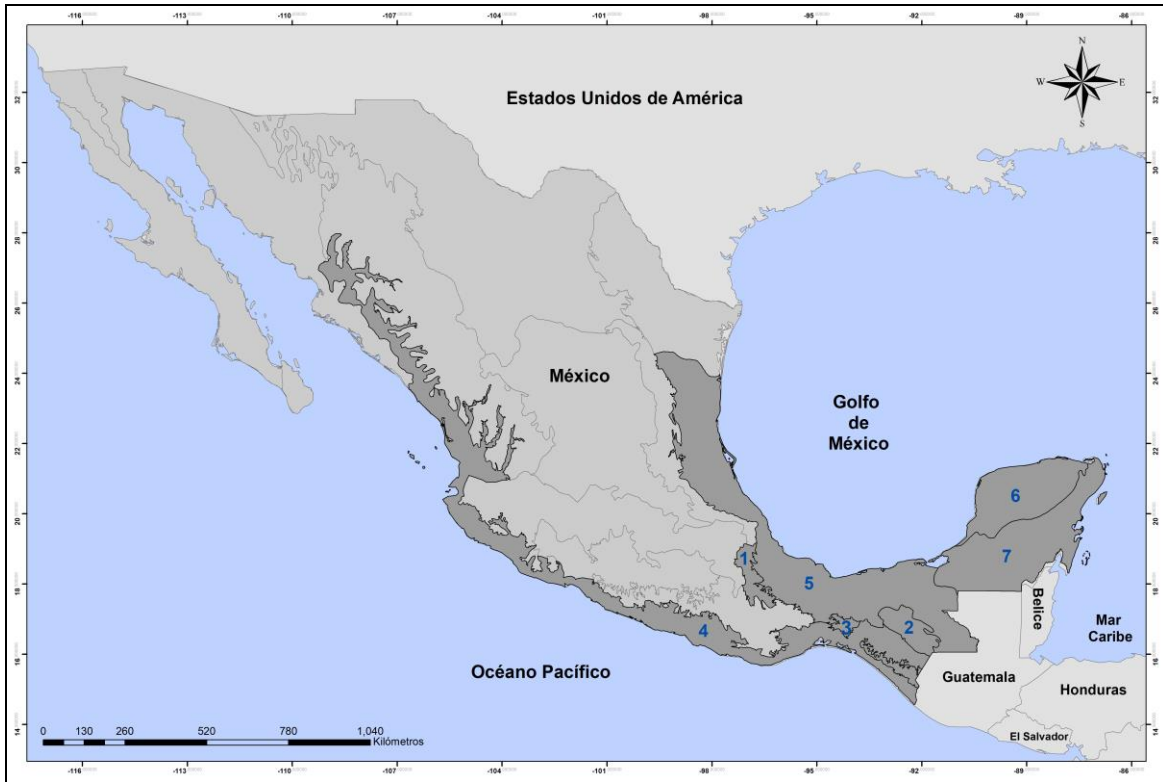


Figura 1. Mapa de provincias biogeográficas de México. Las áreas en color gris oscuro indican las provincias utilizadas para determinar el área de extensión del modelado (movilidad (M)). Los números indican cada provincia: 1. Provincia de Oaxaca (Oax), 2. Provincia de Los Altos de Chiapas (Chi), 3. Provincia del Soconusco (Soc), 4. Provincia del Pacífico, 5. Provincia del Golfo de México, 6. Provincia Yucateca, y 7. Provincia del Petén.

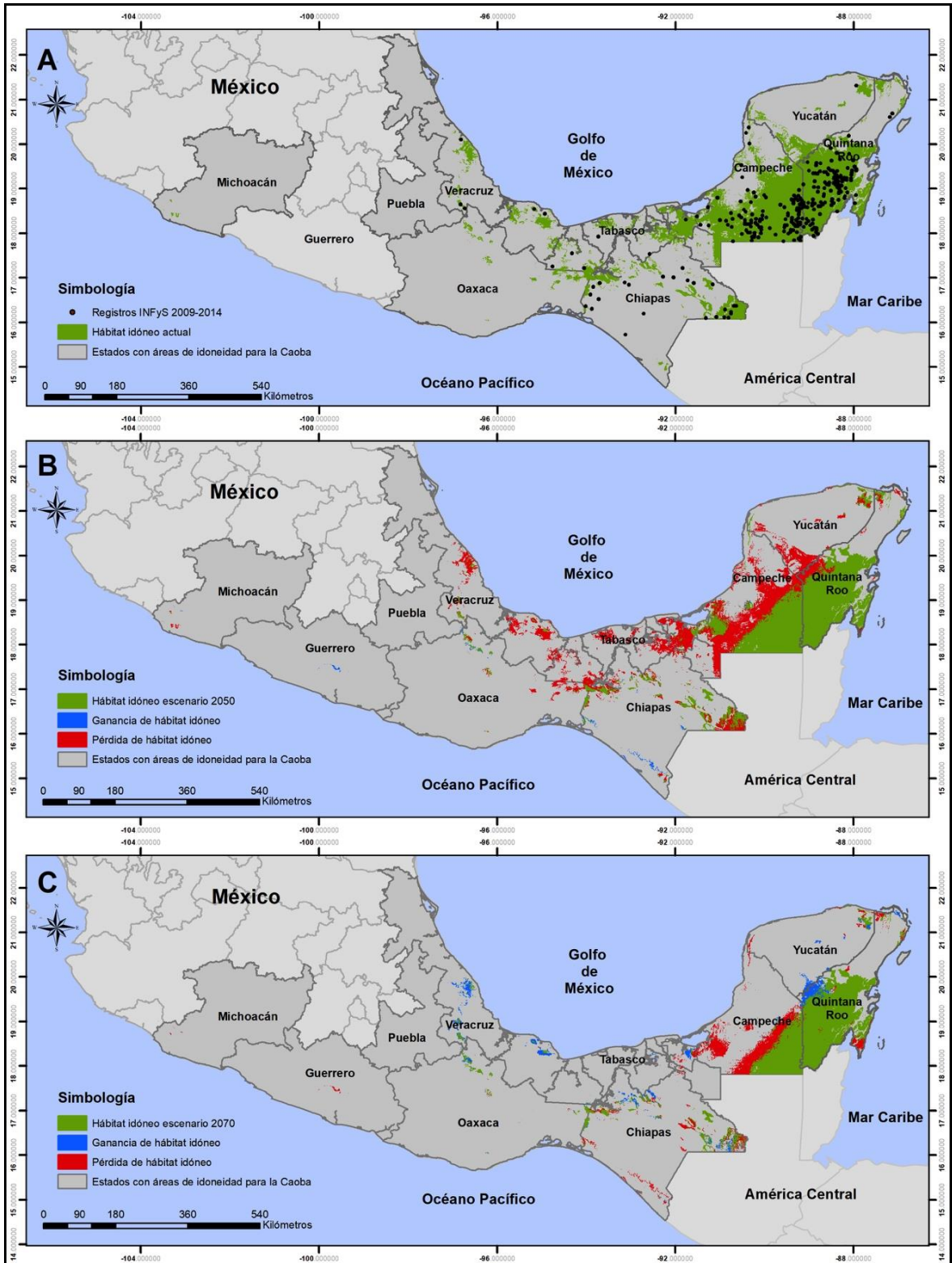


Figura 2. Mapa de idoneidad de *Swietenia macrophylla* King en México: (A) escenario presente (1960-1990), (B) escenario 2050 (promedio de 2041 a 2060) y (C) escenario 2070 (promedio de 2061-2080). Los puntos indican los registros de presencia del INFyS 2009-2014.

4. Conclusiones generales

El modelo de nicho generado con MaxEnt predijo para el escenario presente un área de hábitat idóneo para la caoba en México de 8 935 108.92 ha, para el escenario 2050 una superficie de hábitat idóneo de 5 379 332.04 ha, lo que representa una pérdida de hábitat del 39.79% respecto al escenario presente, y para el escenario 2070 muestra una superficie de hábitat idóneo de 4 685 941.71 ha, lo que representa una pérdida de hábitat del 12.89% respecto al escenario 2050 y del 47.6% para el presente. En los tres escenarios, las mejores condiciones de hábitat para la caoba permanecerán en la Península de Yucatán; mientras que en el escenario presente el estado de Campeche mantendrá el 41% de hábitat idóneo, Quintana Roo conservará prácticamente el 50% para los escenarios 2050 y 2070.

La historia de la caoba aprovechamiento comprende desde la época prehispánica y, comercialmente desde el siglo XIX, En este trabajo se predice una disminución del hábitat original de la caoba, por lo que será necesario desarrollar investigaciones que permitan dirigir los esfuerzos al manejo de las poblaciones naturales en áreas de su hábitat idóneo, permitiendo que la especie continúe siendo un recurso importante en la industria forestal maderable de comunidades y ejidos de la península de Yucatán.

MaxEnt resultó ser una herramienta adecuada para proyectar la dinámica de la distribución de las poblaciones de caoba en México y con ello, contribuir con información básica para el manejo, conservación y permanencia de la especie a largo plazo en su hábitat natural.

5. Literatura citada

- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ. 1984. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, Belmont, CA, USA.
- Clark DA, Piper SC, Keeling, CD, Clark DB. 2003. Tropical rainforest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100: 5852- 5857.
- Gómez Díaz JD, Monterroso Rivas AI, Tinoco Rueda JÁ. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*.
- Grogan J, Barreto P. 2005. Big-leaf mahogany on CITES Appendix II: big challenge, big opportunity. *Conservation Biology* 19(3), 973-976.
- Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8, 993-1009.
- Guisan A, Zimmermann NE, Elith J, Graham CH, Phillips S, Peterson AT. 2007. What the matter for predicting the occurrences of trees: techniques, data or species' characteristics? *Ecological Monographs*, 77(4), 615-630.
- Gutiérrez E, Trejo I. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 179-188. DOI: 10.7550/rmb.37737
- Hammond N. (1982). *Ancient Maya civilization*. New Brunswick, New Jersey, USA. Rutgers University Press.
- Hastie T, Tibshirani RJ. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall, London.

- Hirtzel AH, Hausser J, Chessel D, Perrin N. 2002. Análisis de factor ecológico-nicho: ¿cómo computar mapas de hábitat-convección sin datos de ausencia?. DOI: 10.1890 / 0012-9658 (2002) 083 [2027: ENFAHT] 2.0.CO; 2
- Hof C. 2010. Species distributions and climate change: current patterns and future scenarios for biodiversity. Department of Biology Faculty of Science University of Copenhagen. 220 p.
- Hutchinson GE. 1957. Population studies-animal ecology and demography-concluding remarks. In: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22, 415-427.
- Ibañez-Campos D. 2011. Efectos del cambio climático en las actividades agrarias y forestales.
- ITTO (International tropical timber organization). 2005. "Elements for the Annual Review and Assessment of the World Timber Situation 2005". ISBN 4 902045 27 3.
- Juárez G, Espinoza B, Cedeño SO. 1989. Observaciones fenológicas en 70 especies forestales tropicales y su importancia en la producción. In Memoria: Congreso Forestal Mexicano. Tomo II. Toluca, Edo. México. pp. 874-882.
- Kammesheidt L, Torres LA, Franco W, Plonczac M. 2001. History of logging and silviculture treatments in the Western Venezuela plain forest and prospect for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 148, 1-20.
- Lamb FB. 1966. Mahogany of Tropical America: its ecology and management. University of Michigan, *Ann. Arbor*. 220p.
- Magaña V, Conde C, Sánchez O, Gay C. (2000). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. In: C. Gay, ed. 2003. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, U.S. Country Studies Program, México. 18 p.

- Márdero-Jiménez SS. 2011. Sequías y efectos en las prácticas agrícolas de familias campesinas del Sur de la Península de Yucatán. Tesis de Maestría. El colegio de la Frontera Sur. Chetumal Quintana Roo, México.
- Martínez-Meyer E, Díaz-Porras DF, Peterson AT, Yañez-Arenas CA. 2012. Ecological niche structure and range wide abundance patterns of species. *Biology Letters*, doi: 10.1098/rsbl.2012.0637
- Mateo R, Felicísimo A, Muñoz J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*. Pág. 217-240.
- McCullagh P, Nelder JA. 1989. *Generalized Linear Models*, 2nd edn. Chapman & Hall, London.
- McCulloch W, Pitts W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Originally published in: *Bulletin of mathematical biophysic*. Vol 5. 1943. p 115-133.
- Méndez-González J, Nívar-Cháidez J, González-Ontiveros V. 2007. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 01884611. 65:38-55.
- Monterrubio-Rico TC, De Labra-Hernández MA, Ortega-Rodríguez JM, Cansino-Murillo R, Villaseñor-Gómez JF. 2011. Distribución actual y potencial de la guacamaya verde en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 1311-1319
- Morales Ortiz ER, Herrera Tuz LG. 2009. Cedro (*Cedrela odorata* L.) protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje. CONAFOR. Región XII Península de Yucatán. Programa de Germoplasma Forestal.
- Naoki K, Gómez MI, López RP, Meneses RI, Vargas J. 2006. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia* 4(1), 65-78.

- Navarro-Martínez MA. 2015. Diagnóstico del estado actual de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en los bosques manejados de Quintana Roo, México: perspectivas para su manejo. Tesis de doctorado. Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. 132 p.
- Negreros-Castillo, P., Cámara-Cabrales, L., Devall, M.S., Fajvan, M.A., Mendoza-Briseño, M.A., Mize, C.W. y Navarro-Martínez, A. (2014). Silviculture of the Mahogany forest of Quintana Roo, Mexico, Criteria and recommendations. 93 p.
- Nix HA. 1986. "BIOCLIM — a Bioclimatic Analysis and Prediction System". Research report, CSIRO Division of Water and Land Resources. 1983–1985: 59–60.
- Orellana R, Espadas C, Gay C. 2009., Atlas Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán y Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, Mérida, Yucatán, México.
- Oswald Spring U. 2008. *Globalization and New Environmental Challenges*, Springer Verlag, Berlin.
- Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37:637–69.
- Patiño Valera F. 1997. Recursos genéticos de *Swietenia* y *Cedrela* en los neotrópicos: Propuesta para acciones coordinadas. Roma, IT, V. 58 p.
- Pennington TD, Styles BT. 1981. Meliaceae. Flora Neotropica Monografía 28. The New York Botanical Garden. Bronx, New York. pp. 395-400.
- Pennington TD, Sarukhán J. 1998. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Fondo de cultura economía México, D. F.
- Peterson AT. 2003. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology.* 78: 419-433.

- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Modelos de máxima entropía de distribuciones geográficas de especies. *Ecological Modeling*, 190:231-259.
- Racancoj VM. 2006. Socio economía maya precolonial. ISBN 9992256605, 9789992256602. Cholsamaj Fundacion. 106 p.
- Romo H, Sanabria P, García-Barros E. 2012. Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución de lepidópteros del género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae)
- Sánchez-Cordero V, Peterson AT, Escalante-Pliego P. 2000. El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. pp. 359-375.
- Sharafi S, Jou PH, Tabae NA. 2014. Impacts of climate change on biodiversity. *International Journal of Farming and Allied Sciences*. Intl J Farm & Alli Sci. Vol., 3 (7): 811-818. ISSN 2322-4134.
- SIRE. 2003. Sistema de Información para la Reforestación. Paquetes Tecnológicos
- Snook LK. 1994. Regeneración y crecimiento de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en las selvas naturales de Quintana Roo, México. *Revista Ciencia Forestal en México*. Vol. 25. Núm. 87. pp. 59-76.
- Stockwell D. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction, *International Journal of Geographical Information Science*, 13:2, 143-158, DOI: 10.1080/136588199241391
- Stockwell DRB, Noble IR. 1991, Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of data analysis. *Mathematics and Computers in Simulation*, **32**, 249-254.
- Stockwell, D. R. B., 1992. Machine learning and the problem of prediction and explanation in ecological modelling. Doctoral Thesis, Australian National University, Australia.

- Taylor PD, Fahrig L, With K. 2006. Landscape connectivity: A return to basics. In K. R. Crooks, y M. Sanjayan (Eds.). En: connectivity conservation (pp. 29–43). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tinoco-Rueda JA, Gómez-Díaz JD, Monterroso-Rivas AI. 2011. Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de jalisco, México.
- Torres R, y Jayat JP. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical*, 17(2):335-352.
- Vester FM, Navarro-Martínez MA. 2007. Árboles Maderables de Quintana Roo. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica. Quintana Roo. 139 p.
- Vieira D, Lima V, Sevilha A, Scariotm A. 2008. Consequences of dry-season seed dispersal on seedling establishment of dry forest trees: Should we store seeds until the rains? *Forest Ecology and Management* 256:471-481.