

CALAKMUL COMO REFUGIO DE *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

MIRIAM GARZA-LÓPEZ¹, JUAN MANUEL ORTEGA-RODRÍGUEZ², FRANCISCO JOSÉ ZAMUDIO-SÁNCHEZ¹,
JOSÉ FRANCISCO LÓPEZ-TOLEDO³, FRANCISCO ALBERTO DOMÍNGUEZ-ÁLVAREZ¹
Y CUAUHTÉMOC SÁENZ-ROMERO^{4, 5}

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México

²Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria,
Morelia, Michoacán, México

³Instituto Tecnológico de la Zona Maya, Quintana Roo, México

⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Michoacán, México

⁵Autor para la correspondencia: csaenzromero@gmail.com.

Resumen: El modelado del hábitat climático propicio para la distribución potencial de especies es una herramienta poderosa para proyectar los impactos del cambio climático y sugerir medidas de manejo que permitan aminorar sus efectos negativos. Los objetivos del presente trabajo fueron: (1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio para *Swietenia macrophylla* primariamente para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras y (2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030. Se obtuvieron registros geográficos para *S. macrophylla* del Inventario Nacional Forestal y Suelos y *grids* climáticas para clima contemporáneo (promedio 1961-1990), y futuro (década centrada en 2030), con escenarios de concentraciones intermedias (6.0 W/m²) de gases de efecto invernadero. Se modeló la distribución potencial bajo el clima contemporáneo y futuro usando MaxEnt. Para el año 2030 se proyecta una pérdida de hábitat climático del 60 % en relación al contemporáneo para la Península de Yucatán, Guatemala, Belice y este de Honduras. El hábitat climático propicio prácticamente desaparece en Quintana Roo, desplazándose hacia la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Se propone recolectar semilla en la distribución actual en Quintana Roo y plantar en esa Reserva, con el propósito de realizar conservación ex-situ, reacoplando las poblaciones al clima futuro que les es propicio.

Palabras clave: Cambio climático, clima contemporáneo, hábitat climático, MaxEnt, Península de Yucatán.

Abstract: The suitable climate habitat modeling for the potential distribution of species is a powerful tool to project the impacts of climate change and to suggest management measures that may mitigate its negative effects. The objectives of this study were: (1) To determine the potential distribution of *Swietenia macrophylla* primarily for the Yucatan Peninsula, México and for Guatemala, Belize and eastern Honduras, and (2) to suggest management actions for recoupling the contemporary populations to their suitable climate habitat by the decade centered in the year 2030. Geographical records for *S. macrophylla* were obtained from the Mexican National Forest and Soil Inventory and the grids for contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered on 2030), with intermediate greenhouse-effect gas concentration scenarios (6.0 W/m²). Potential distribution under the contemporary and future climate was modeled using MaxEnt. For the decade of 2030 it is projected a climatic habitat loss of 60 % in relation to contemporary distribution at the Yucatan Peninsula, Guatemala, Belize, and eastern Honduras. Suitable climate habitat practically disappears in Quintana Roo, moving to the Calakmul Biosphere Reserve. It is proposed to collect seed in the current distribution in Quintana Roo and planting inside the Reserve, with the purpose of conducting ex situ conservation populations, recoupling the populations to their future suitable climate.

Keywords: Climate change, climate habitat, contemporary climate, MaxEnt, Yucatan Peninsula

Swietenia macrophylla King es una de las especies forestales más importantes en México y América Central. Desde el último siglo hasta hoy, la caoba, como se conoce

comúnmente, es una de las especies ecológicamente más importantes de las selvas altas o medianas perennifolias o subperennifolias y también ha sido una de las especies más

relevantes para el desarrollo de la industria forestal de América Latina en regiones tropicales (Vester y Navarro, 2003; André *et al.*, 2008).

La caoba ha sido fuertemente explotada y presenta lo que es probablemente uno de los casos de erosión genética más notable en una especie de árbol tropical. En Centro América, subsiste en forma de pequeñas poblaciones fragmentadas y su viabilidad probablemente dependerá del flujo adecuado de genes entre ellas (Lemes *et al.*, 2003; André *et al.*, 2008). Al deterioro causado por la deforestación y el cambio de uso de suelo, ahora es necesario añadir el desacoplamiento que habrá entre las poblaciones forestales y el clima que les es propicio, debido al cambio climático (Rehfeldt *et al.*, 2012).

La modelación del hábitat climático propicio o nicho climático, usando técnicas como GARP, MaxEnt o Random Forest, se utiliza cada vez más para examinar la vulnerabilidad de los recursos genéticos forestales ante el cambio climático (Villers y Trejo, 2004; Téllez-Valdés *et al.*, 2006; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007; Ledig *et al.*, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013) a fin de comparar la distribución geográfica del hábitat climático propicio contemporáneo con el futuro, y así poder sugerir medidas de manejo tendientes a aminorar los efectos negativos del cambio climático.

Con base en lo anterior se plantearon los siguientes objetivos: (1) determinar la distribución potencial del hábitat climático propicio contemporáneo y futuro (década centrada en el año 2030) para *Swietenia macrophylla*, para la Península de Yucatán, México y para Guatemala, Belice y este de Honduras; así como (2) sugerir medidas de manejo para reacoplar las poblaciones contemporáneas al clima que les será propicio en la década centrada en el año 2030.

Materiales y métodos

Área de estudio. El área de estudio comprende primariamente la Península de Yucatán, ubicada en el sureste de México. La Península es una gran plataforma de rocas calcáreas y es la provincia geológicamente más joven de México; abarca los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (INEGI, 2015). El terreno de la Península de Yucatán es en general plano, con altitud promedio de 50 m s.n.m. y sólo en el centro-sur se encuentran elevaciones hasta de 350 metros. Los suelos predominantes son los leptosoles (suelos someros de escasa profundidad, escasa cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras o afloramientos de roca) (Tello, 2011; Bautista-Zúñiga, 2010). La mayor parte de la Península de Yucatán presenta un clima tropical con lluvias en verano (Aw) y seco estepario (Bs) el extremo noroeste de la Península. La vegetación de la Península de Yucatán se rige principalmente por un gradiente de humedad que se incrementa de norte a sur, lo que provoca un mayor desa-

rollo estructural, formado principalmente por selvas baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, selva baja espinosa y manglar, entre otras (Díaz, 2011; Flores-Guido *et al.*, 2010).

Obtención de datos. Los registros de presencia de *Swietenia macrophylla* para México, se obtuvieron de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) 2004-2009. Debido a que el área de interés fue primariamente la Península de Yucatán, se incluyeron presencias para la Península de Yucatán y los otros dos estados cercanos y con mayor número de presencias después de la Península: Chiapas y Tabasco. Las unidades de muestreo fueron conglomerados con 1,600 m² de superficie separados a 5 × 5 km (CONAFOR, 2009). Una vez obtenidos los registros, se procedió a la limpieza de los datos que consistió en eliminar las coordenadas geográficas duplicadas, con la finalidad de obtener las coordenadas por conglomerado (la base de datos original incluye coordenadas por parcela muestreada, pero dada la cercanía entre parcelas, las coordenadas resultan duplicadas).

Variables climáticas. Se descargaron las rejillas (*grids*) para la región estudiada (desde la Península de Yucatán hasta el este de Honduras) a una resolución de 1 km² para 17 variables climáticas (Tabla 1), disponibles en: <http://forest.moscowsl.wsu.edu/climate/customData/> (Consultado abril 2014), del denominado “clima contemporáneo” (promedio del período 1961 a 1990) y clima futuro (promedio de la dé-

Tabla 1. Variables climáticas estimadas para clima contemporáneo (1961-1990) y futuro (década centrada en el año 2030).

Abreviación	Variable
MAT	Temperatura media anual (°C)
MMP	Precipitación media anual (mm)
GSP	Precipitación de temporada de crecimiento (mm)
MTCM	Temperatura media del mes más frío (°C)
MMIN	Temperatura media mínima (°C)
MTWM	Temperatura media del mes más cálido (°C)
MMA	Temperatura media máxima (°C)
SDAY	Día juliano en la que ocurre la primera helada de primavera
FDAY	Día juliano en la que ocurre la primera helada de otoño
DD5	Grados día > 5°C a lo largo del año
GSDD5	Grados día > 5°C del periodo de crecimiento
D100	Suma de días en el que se acumulan 100 grados día > 5°C
DD0	Grados día < 0 °C respecto a la temperatura media
SMRPB	Balance de precipitación: (Julio-Septiembre) / (Abril-junio)
SPRP	Precipitación de verano (mm)
SMRP	Precipitación de otoño (mm)
WINP	Precipitación de invierno (mm)

cada centrada en el año 2030). Las estimaciones futuras se basan en el promedio de 18 modelos-escenarios climáticos, con trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero (llamadas RCP por su acrónimo en inglés), con una trayectoria intermedia (6.0 W/m², que equivale a que la concentración de CO₂ alcanzará su máximo en la década del 2080). Detalles de los modelos climáticos en Rehfeldt *et al.* (2012; 2014). Para el modelaje que dio origen a las rejillas de clima contemporáneo de México ver Sáenz-Romero *et al.* (2010).

Es importante enfatizar la concepción subyacente bajo lo que se denominó clima “contemporáneo”. Se considera al período 1961-1990 como un clima similar al cual las poblaciones de especies forestales (inventariadas por el INFS), se adaptaron y crecieron; no se refiere al clima actual o presente (década 2000-2010 o similar), debido a que el cambio climático ha modificado el clima en las últimas décadas. En otras palabras, se asume que el clima promedio del período 1961-1990 es una estimación aceptable y a nuestro alcance de las condiciones que en su momento permitieron un equilibrio (o algo cercano a un equilibrio) entre la distribución de especies de plantas y el clima existente antes de que el cambio climático antropomórfico empezara a acumular sus efectos (Rehfeldt *et al.*, 2014; Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

Para el futuro, se eligió enfocar el análisis para el promedio de la década centrada en el año 2030, y no un horizonte más lejano, ya que para las propuestas de manejo encaminadas a promover la adaptación de las poblaciones forestales a los climas futuros, debe considerarse lo siguiente: de llegarse a reubicar genotipos, éstos necesitan reubicarse en sitios con la anticipación requerida como para que a lo largo de su vida, crezcan en un sitio suficientemente propicio climáticamente como para alcanzar al menos la edad reproductiva. De reubicarse en un sitio en donde el clima propicio ocurrirá en un horizonte demasiado lejano (2080 o 2090), se expondría en el presente a las plantas a daños por frío o heladas que podrían hacer inviable alcanzar la edad reproductiva (Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Castellanos-Acuña *et al.*, 2015).

Modelado de clima contemporáneo. La distribución del hábitat climático propicio para la especie bajo el clima contemporáneo se modeló mediante el algoritmo MaxEnt. A este proceso también se le conoce como modelado de nicho ambiental (*environmental niche modeling* ENM, por su acrónimo en inglés; Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011). En nuestro caso, se modeló únicamente el nicho ambiental, que por considerar únicamente variables climáticas (sin incluir otras tales como tipo de suelo), podría definirse como nicho climático.

Se utilizaron 513 localidades de presencia y 17 variables climáticas que representan temperatura y precipitación promedio anual, temperaturas extremas mensuales, precipitación por períodos estacionales y el balance estacional de precipitación (Tabla 1). Estas variables han sido usadas pre-

viamente en el modelaje del hábitat climático propicio de especies forestales de México para *Abies religiosa* (Sáenz-Romero *et al.*, 2012), *Pinus chiapensis* (Sáenz-Romero *et al.*, 2010) y *Pinus leiophylla* (Sáenz-Romero *et al.*, 2015). El modelo se construyó con el 75 % de los registros de ocurrencia. El umbral de convergencia manejado fue 0.00001 con 500 interacciones como límite máximo para cada corrida. El formato de salida analizado fue logístico, el cual indica un hábitat óptimo de 0 o 1, donde 0 es ausencia y 1 máxima idoneidad.

Se utilizó el método Jackknife, instrumentado en MaxEnt, el cual indica la contribución relativa de cada variable climática al modelo. La distribución espacial del hábitat climático se obtuvo mediante la herramienta ArcMap 9.3®, obteniendo el número de píxeles y transformándolos a hectáreas. Finalmente, se generaron los mapas de la distribución de la especie en clima contemporáneo y 2030.

Validación del modelo climático. La validación del modelo se llevó a cabo mediante el programa ROC parcial (Barve, 2008). Se siguieron las recomendaciones de Peterson y Soberón (2008), usando un umbral esperado de error de $E = 5\%$. Se realizaron 1000 iteraciones para el cálculo de la versión parcial del análisis del área bajo la curva (AUC) y se expresaron los resultados como la razón entre la curva ROC observada, contra la esperada al azar, en donde ambas están truncadas al área delimitada por el umbral de error. Cuando se realiza el análisis de ROC parcial, solo es usada la porción del área en la curva ROC donde las predicciones del modelo son relevantes para el cálculo de la razón. Los valores de ésta abarcan el intervalo que va de 0 a 2, donde 1 equivale a un modelo totalmente al azar. La prueba se realizó con el 25 % de los datos, que fueron separados al azar del total de las localidades de presencia de la especie.

El modelo obtenido con el 75 % de los datos, se reclasificó con valores de 0 a 1, donde 0 es menos idoneidad y 1 mayor idoneidad para la presencia de la especie. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada clase de presencia de la especie para el 25 % de los datos. Una vez generados los archivos se introdujeron al programa ROC Parcial, con 1,000 interacciones y 0.95 de tolerancia de error de omisión. Una vez generados los resultados se obtuvo la media, máximos, mínimos y desviación estándar.

Proyección de hábitat climático futuro. El hábitat climático futuro se proyectó mediante el algoritmo MaxEnt, el cual se alimentó con los registros geográficos, las *grids* de clima contemporáneo y clima futuro (2030). Esta herramienta, primeramente modela el hábitat climático propicio bajo el clima contemporáneo. Una vez terminado el modelaje construido con el clima contemporáneo, se repitió la proyección pero esta vez alimentando el modelo con las rejillas de variables climáticas para la década centrada en 2030, estimadas con el ensamble de 18 modelos-escenarios con trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero intermedias (RCP 6.0 Watts/m²), disponibles

en: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/customData/> (Consultado abril 2014).

Se proyectó con la opción “Do clamping” de MaxEnt, el cual reduce la predicción en cada punto en las proyecciones por la diferencia entre la salida aparente y la no sujeta a ese punto. Es decir, que las variables ambientales y funciones se encuentran restringidas a la gama de valores encontrados durante el entrenamiento. Además se compararon la similitud ambiental de las variables contemporáneas con las variables futuras (2030). Esto para obtener las áreas que deben

ser tratadas con precaución al momento de interpretar el modelo y las variables más disímiles con el clima futuro.

Resultados

Clima contemporáneo. Se generó un mapa de distribución potencial para *S. macrophylla* King en la Península de Yucatán. Se obtuvo un área con clima óptimo para el desarrollo de Caoba de 10'681,065 ha con clima contemporáneo. Para los estados de Quintana Roo, Campeche, Yucatán y Chiapas

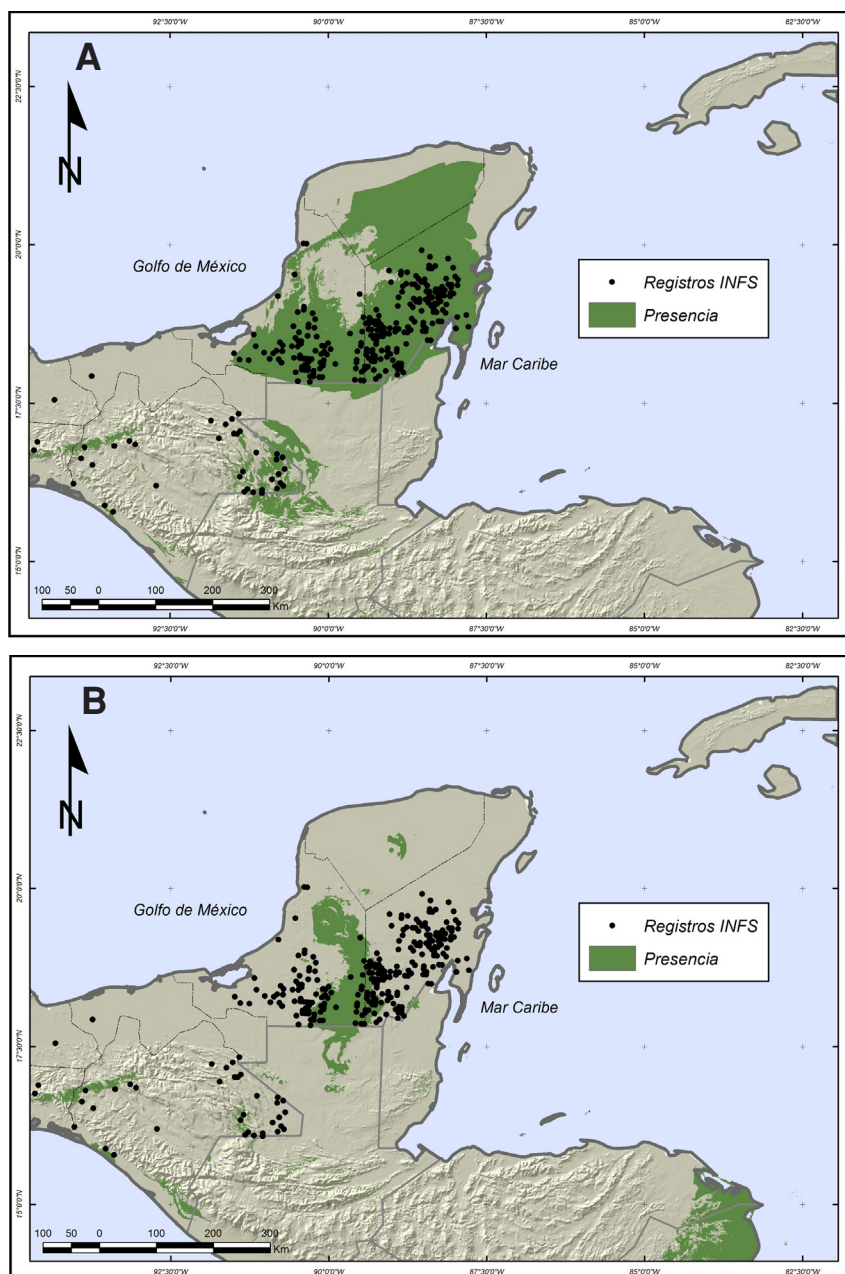


Figura 1. Mapa del hábitat climático propicio (área en rojo) de *Swietenia macrophylla* para (A) clima contemporáneo (1961-1990), y (B) futuro (década centrada en el año 2030). Símbolos indican registros de presencia según el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2004-2009).

Tabla 2. Razón de curva ROC Parcial con 75 % de localidades al azar

Validación de curva ROC parcial	
Máximo	1.86
Mínimo	1.20
Media	1.82
Desviación estándar	0.05

en México, además el modelo logró proyectar distribución potencial para Belice, Honduras y Guatemala (Figura 1A). *Validación del modelo.* Mediante el análisis de la curva ROC parcial se obtuvieron valores superiores al umbral (≥ 1) para el clima contemporáneo (Tabla 2). Lo que nos indica que el modelo tuvo una buena predicción del hábitat climático óptimo para el desarrollo de la especie (Peterson *et al.*, 2008). Mediante el método Jackknife instrumentado en MaxEnt se obtuvieron las variables de mayor contribución para la predicción del modelo, las cuales fueron MTCM (30.2 %), MMIN (20.8 %) y GSP (15.7 %).

Proyección para el clima futuro (2030). La proyección para 2030 (Figura 1B), estima un área con hábitat climático propicio de 4,249,017 ha. Esto implica una reducción del hábitat climático, respecto al contemporáneo, del 60 %. La distribución se reduce dentro de la Península de Yucatán, confinándose principalmente al estado de Campeche, disminuyendo drásticamente en los estados de Chiapas y Yucatán. Para Quintana Roo, prácticamente desaparece el hábitat climático de la especie, que notablemente se desplaza hacia el Oeste, hacia el estado de Campeche. La distribución para Guatemala y Belice se reduce drásticamente y para Honduras proyecta nuevas zonas (en el extremo noroeste del país, en el Departamento de Gracias a Dios) que en la distribución contemporánea no aparecían (Figura 1A).

Es importante resaltar que la mayor parte del hábitat climático que se mantiene dentro de la Península de Yucatán para la década centrada en el 2030, se distribuye en lo que actualmente es la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Figura 2).

Discusión

Clima contemporáneo. La distribución contemporánea modelada coincide con otros trabajos realizados por medio de colectas y muestreo de campo (Bauer y Francis, 1998; CATIE, 2003; CONAFOR, 2003 y Vester y Navarro, 2007).

Las variables obtenidas con mayor contribución para el modelo (MTCM, MIN y GSP) son congruentes con el hecho de que es una especie de zonas tropicales donde prácticamente no existe época de frío. Además la especie se desarrolla mejor con estación seca no mayor de cuatro meses, en extremos de humedad, aparentemente tolera extremos de sequía únicamente de corta duración, temperatura media anual de 24 - 28 °C, temperatura máxima media del mes

más cálido de 24-32 °C y temperatura media mínima del mes más frío de 11-22 °C (Bauer y Francis, 1998; Cordero y Boshier, 2003; CONAFOR, 2003; Vester y Navarro, 2007; Grogan y Schulze, 2012).

Proyección para el clima futuro (2030). Es de esperar que la combinación de mayores temperaturas y menores precipitaciones, sean la causa de la desaparición del hábitat climático para caoba en gran parte de la distribución contemporánea en la Península de Yucatán. La disminución drástica del hábitat climático propicio para *Swietenia macrophylla* coincide con otras proyecciones para biomas de México con diferentes modelos de circulación global y escenarios de emisiones de gases invernadero. Por ejemplo, Rehfeldt *et al.* (2012) proyecta para la Península de Yucatán climas propicios para biomas sin un análogo contemporáneo (en otras palabras, climas que no existen en la actualidad), debido a la interacción del incremento de las temperaturas y disminución de la precipitación debido al cambio climático. La predicción de climas no análogos en el futuro ha sido predicha también para el norte de Eurasia –debido a la prolongación de la temporada de crecimiento (Reu *et al.*, 2014), y para diversos biomas de los Andes Tropicales (Tovar *et al.*, 2013), con pérdidas de más del 30 % de la superficie actual.

Reserva de la Biosfera Calakmul como refugio ex situ. La orografía con mayores elevaciones en la región de Calakmul, al crear un clima más húmedo y menos cálido que el resto de la Península, compensará en alguna medida el cambio climático, haciendo de Calakmul una región propicia como refugio para esa especie en la década centrada en el año 2030. La topografía mayormente plana de la zona norte de la Península de Yucatán hace que el relieve altitudinal tenga poca influencia sobre los patrones climáticos de la mayor parte de esa región, en donde los vientos provenientes del Caribe producen un gradiente de precipitaciones de noroeste a sureste, factor que aparentemente es el decisivo para la distribución de la vegetación. En cambio, en la región de Calakmul, con altitudes promedio de 250-350 m s.n.m. (altitudes modestas pero muy superiores al promedio de la Península de Yucatán), el relieve crea una sombra orográfica en las laderas y planicies occidentales, al interceptar los vientos húmedos dominantes provenientes del sureste (Martínez y Galindo-Leal, 2002). Esto es congruente con Orellana *et al.* (2009), quien a partir gráficas ombrotérmicas de 48 estaciones meteorológicas, proyecta para el año 2020 una sequía relativa más pronunciada y visible, con los máximos promedio de precipitación en septiembre, además menciona que las mayores cantidades de lluvia estarán presentes en el sur de Campeche y Quintana Roo.

Manejo y conservación de germoplasma. Con base en los resultados obtenidos, se recomienda establecer zonas productoras de germoplasma de caoba en el centro-sur del estado de Quintana Roo. Sin embargo, plantaciones de conservación *ex situ* e inclusive plantaciones comerciales forestales deberán establecerse en el hábitat climático predicho para el

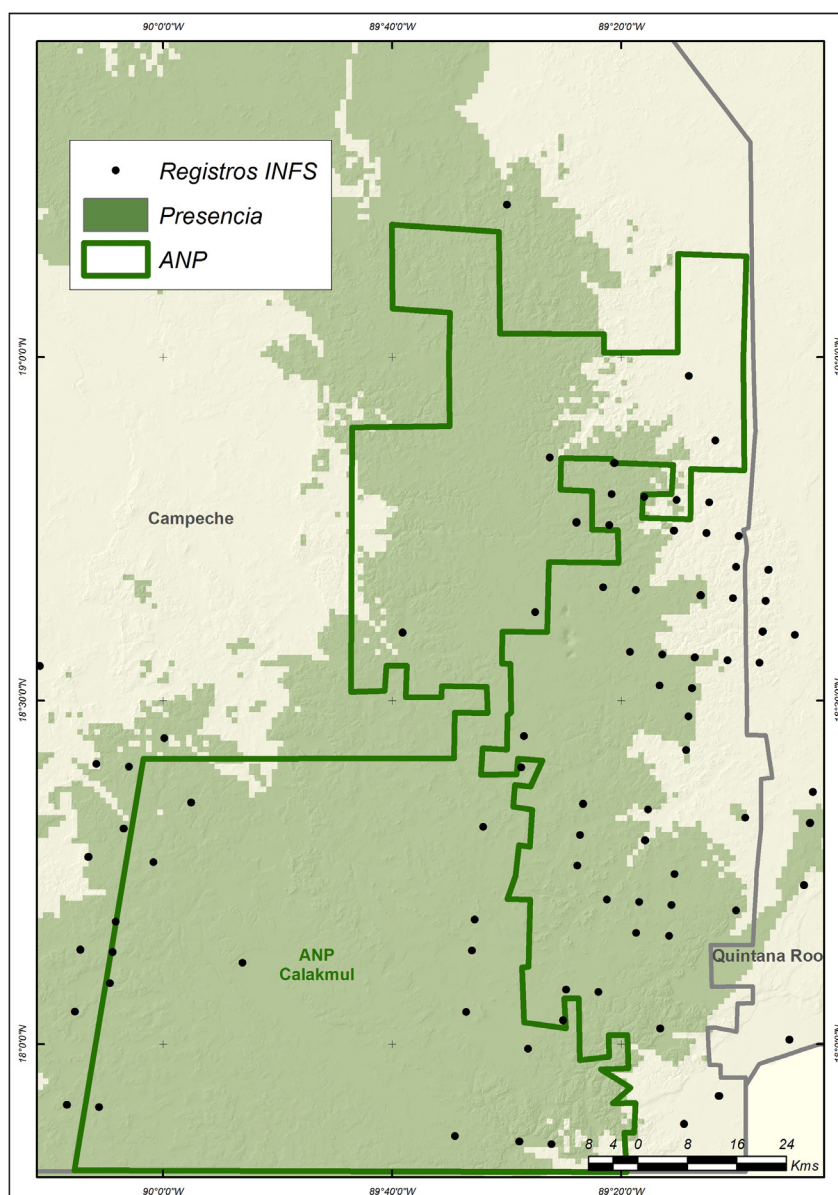


Figura 2. Hábitat climático propicio para la década centrada en el año 2030 dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche

año 2030, lo que incluiría áreas de la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Figura 2). Dicho de otra manera, sería necesario coleccionar semilla en las poblaciones actuales de Quintana Roo, producir planta en vivero, y plantar en Campeche.

Sin embargo, establecer plantaciones comerciales, e incluso de conservación in situ, sería una medida muy deseable de manejo adaptativo ante el cambio climático (en función de la evidencia aquí presentada), pero que entraría en contradicción con el marco regulatorio actual. De acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (SEDUE, 1988), Artículo 45, el segundo objetivo de un Área Natural Protegida (ANP) es “*Salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la prevención y el*

aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial”. Pero, en el Artículo 49, inciso II, menciona que en las zonas núcleo de las ANP’s queda expresamente prohibido “*Introducir ejemplares o poblaciones exóticas de la vida silvestre, así como organismos genéticamente modificados*”.

Lo anterior ilustra plenamente que el marco regulatorio actual se diseñó sin considerar los efectos del cambio climático, como si el clima fuera esencialmente estático. Por lo anterior, se propone realizar una modificación en el Artículo 49, que flexibilice el uso de reforestación con semilla no local. Ello permitiría realizar una acción de mitigación a los

efectos del cambio climático, medida en realidad encaminada a cumplir el objetivo último de la ley actual, que es lograr el manejo sustentable de los recursos genéticos forestales.

No hay duda que tales cambios en el marco normativo y el llevar a la práctica lo aquí propuesto, requerirá de una profunda modificación conceptual que sea socialmente aceptada de lo que es conservar un recurso natural para el futuro. Mayor es el reto considerando que la Reserva de Calakmul recientemente fue declarada Patrimonio de la Humanidad Mixto por la UNESCO, mixto por su elevada biodiversidad y sus sitios arqueológicos de la Cultura Maya (UNESCO, 2014). Pero justamente, un Patrimonio de la Humanidad merece ser conservado, sólo que la conservación en los tiempos del cambio climático, requiere de medidas impenables en el pasado.

Se sugiere: (1) Realizar ensayos de procedencia, a fin de limitar el movimiento de poblaciones dentro del espacio climático que le será propicio, dependiendo del grado de diferenciación genética. (2) Monitorear (tal vez en parcelas permanentes) los ataques de plagas y enfermedades, tales como el barrenador *Hypsipyla grandella*; es de esperar que el desfaseamiento entre las poblaciones actuales y el clima para el cual se han adaptado, inducirá un estrés y debilitamiento de los árboles, lo cual facilitará el ataque de plagas y enfermedades, tales como se ha documentado para otras especies forestales (Allen *et al.*, 2010; Sturrock *et al.*, 2011; Alfaro *et al.*, 2014).

Conclusiones

El hábitat climático propicio contemporáneo para *Swietenia macrophylla* (caoba) se estima en 10,681,065 ha en la Península de Yucatán, Belice, Guatemala y Honduras. La proyección del hábitat para la década centrada en el año 2030, estima una pérdida del 60 % respecto al área total contemporánea. El hábitat propicio en el futuro se distribuye dentro de la Reserva de la Biosfera Calakmul (en el centro-sur de la Península de Yucatán) y aparecen nuevas áreas propicias en el noreste de Honduras (Departamento de Gracias a Dios). Se propone recolectar semilla en el centro-sur de Quintana Roo, producir planta en vivero y plantar en Calakmul, con el propósito de conservación genética y reacoplamiento climático de las poblaciones naturales de caoba. Esto requeriría flexibilizar el marco regulatorio de las Áreas Naturales Protegidas, que actualmente impiden establecer especies en sitios en los que no son originarias.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada a MGL durante sus estudios de maestría, incluyendo una estancia de intercambio académico en la UMSNH y una beca de estancia sabática en el extranjero (232838) a CSR. A la Coordinación de la Investigación Cien-

tífica de la UMSNH. Comentarios de tres revisores anónimos contribuyeron a mejorar substancialmente el manuscrito.

Literatura citada

- Alfaro R.I., Fady B., Vendraminc G.G., Dawson I.K., Fleming R.A., Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R., Murdock T., Vinceti B., Navarro C.M., Skroppa T., Baldinelli G.K., El-Kassaby Y.A. y Loo J. 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management* **333**:76-87.
- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A. y Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* **259**:660-684.
- André T., Lemes M.R., Grogan J. y Gribel R. 2008. Post-logging loss of genetic diversity in a mahogany (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae) population in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* **255**:340-345.
- Barve N. 2008. Tool for Partial-ROC (Biodiversity Institute, Lawrence, KS), ver 1.0.
- Bauer G.P. y Francis J.K. 1998. *Swietenia macrophylla* King. Honduras mahogany, caoba. USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Rio Piedras.
- Bautista-Zúñiga F. 2010. El suelo. En: Durán-García R. y Méndez-González M. Eds. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*, pp 14-16, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)/PPF-FMAM/ Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Seduma, Mérida.
- Castellanos-Acuña D., Lindig-Cisneros R.A. y Sáenz-Romero C. 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* **6**:art2.
- Cordero J. y Boshier D.H. eds. 2003. *Árboles de Centroamérica*. Oxford Forestry Institute (OFI)-Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba.
- CONAFOR. 2003. SIRE-Paquete Tecnológico. *Swietenia macrophylla* King, Comisión Nacional Forestal. Disponible en: <<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1005Swietenia%20macrophylla.pdf>> (Consultado abril 2014).
- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelo 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/component/phocadownload/category/149-2004-2009?download=770:manual-y-procedimientos-para-el-muestreo-de-campo-2004-2009>
- Díaz A.E. 2011. Vegetación. En: Pozo C., Armijo N. y Calmé S. Eds. *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación.*, pp. 62-72, El Colegio de la Frontera Sur/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/ Gobierno del Estado de Quintana Roo/Programa de Pequeñas Donaciones (PPD), México D.F.
- Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudík M., Chee Y.E. y Yates C.J. 2011. A statistic explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* **17**:43-57.
- FAO. 2014. The state of the World's Forest Genetic Resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Commission

- on Genetic Resources Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3825e.pdf> (Consultado diciembre 2014).
- Flores-Guido J.S., Durán-García R. y Ortiz-Díaz J.J. 2010. Comunidades vegetales Terrestres. En: Durán R. y Méndez M. Eds. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. pp 14-16, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)/PPF-FMAM/ Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Seduma, Mérida.
- Gómez-Mendoza L. y Arriaga L. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* **6**:1545-1555.
- Gómez-Díaz J., Monterroso-Rivas A., Tinoco-Rueda J., Toledo-Medrano M., Conde-Álvarez C. y Gay-García C. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* **24**:31-52.
- Grogan J. y Schulze M. 2012. The impact of annual and seasonal rainfall patterns on growth and phenology of emergent tree species in southeastern Amazonia, Brazil. *Biotropica* **44**:331-340.
- INEGI. 2015. Características edafológicas, fisiográficas e hidrológicas de México, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADDEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf> (consultado marzo 2015).
- SEDUE [Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología]. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988.
- Ledig F.T., Rehfeldt G.E., Sáenz-Romero C. y Flores-López C. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany* **97**:970-987.
- Lemes M.R., Gribel R., Proctor J. y Grattapaglia D. 2003. Population genetic structure of mahogany (*Swietenia Macrophylla* King, Meliaceae) across the Brazilian Amazon, based on variation at microsatellite loci: implications for conservation. *Molecular Ecology* **12**:2875-2883.
- Martínez E. y Galindo-Leal C. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **71**:7-32.
- Monterroso-Rivas A., Gómez-Díaz J.D. y Tinoco-Rueda J.A. 2013. Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **19**:29-43.
- Orellana R., Espadas C., Conde C. y Gay C. 2009. *Atlas Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida.
- Peterson A. T. y Soberón J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, **213**:63-72.
- Phillips S.J., Anderson R.P. y Schapire R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**:231-259.
- Rehfeldt G.E., Crookston N.L., Sáenz-Romero C. y Campbell E.M. 2012. North American vegetation model for land use planning in a changing climate: a statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications* **22**:119-141.
- Rehfeldt G.E., Jaquish B.C., López-Upton J., Sáenz-Romero C., StClair J.B., Leites L.P. y Joyce D.G. 2014. Comparative genetic responses to climate for the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: Realized climate niches. *Forest Ecology and Management* **324**:126-137.
- Reu B., Zaehle S., Bohn K., Pavlick R., Schmidtlein S., Williams J.W. y Kleidon A. 2014. Future no-analogue vegetation produced by no-analogue combinations of temperature and insolation. *Global Ecology and Biogeography* **23**:156-167.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G.E., Crookston N.L., Duval P., St-Amant R., Beaulieu J. y Richardson B.A. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-plant impacts on vegetation. *Climate Change* **102**:595-623.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G.E., Duval P. y R.A. Lindig-Cisneros. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, **275**:98-106.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G.E., Ortega-Rodríguez J.M., Marín-Togo M.C. y Madrigal-Sánchez X. 2015. *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences* **93**:709-718.
- Sturrock R.N., Frankel S.J., Brown A.V., Hennon P.E., Kliejunas J.T., Lewis K.J., Worrall J.J. y Woods A.J. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology* **60**:133-149.
- Téllez-Valdés O., Dávila-Aranda P. y Lira-Saade R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandiflora* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern México. *Biodiversity and Conservation* **15**:1095-1107.
- Tello-Taracena H.A. 2011. Suelo. En: Pozo C., Armijo N. y Calmé S. Eds. *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un Análisis para su Conservación*. pp. 57-61, El Colegio de la Frontera Sur/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Gobierno del Estado de Quintana Roo/Programa de Pequeñas Donaciones (PPD), México D.F.
- Tovar C., Arnillas C.A., Cuesta F. y Buytaert W. 2013. Diverging responses of tropical Andean biomes under future climate conditions. *PLOS ONE* **8**:e63634.
- UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2014. Tres sitios de América Latina y Alemania inscritos en la Lista del Patrimonio Mundial. Disponible en: <<http://es.unesco.org/news/tres-sitios-am%C3%A9rica-latina-y-alemania-inscritos-lista-del-patrimonio-mundial>>(consultado octubre 2014).
- Vester F.M. y Navarro-Martínez M.A. 2007. *Árboles Maderables de Quintana Roo*. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica. Quintana Roo.
- Villers-Ruiz L. y Trejo-Vázquez I. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En: Martínez J., Fernández-Bremauntz A. y Osnaya P. comp. *Cambio Climático: Una Visión desde México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología, pp. 239-254, México D.F.

Recibido: 16 de diciembre de 2014

Aceptado: 8 de abril de 2015