



ÁREAS IDÓNEAS CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE SEMILLAS DE *PINUS CHIHUAHCUANA* ENGELM. Y *PINUS LEIOPHYLLA* SCHLTDL. & CHAM. EN MÉXICO

IDEAL AREAS WITH POTENTIAL FOR THE PRODUCTION OF *PINUS CHIHUAHCUANA* ENGELM. AND *PINUS LEIOPHYLLA* SCHLTDL. & CHAM. IN MEXICO

GYORGY EDUARDO MANZANILLA-QUIJADA¹, EDUARDO JAVIER TREVINO-GARZA^{1*}, BENEDICTO VARGAS-LARRETA²,
JORGE OMAR LÓPEZ-MARTÍNEZ³, JOSÉ MANUEL MATA-BALDERAS⁴

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

²Tecnológico nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, México.

³Cátedra, CONACyT, México, México, El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Quintana Roo, México

⁴Gestión Estratégica y Manejo Ambiental SC, Nuevo León, México

*Autor para la correspondencia: eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

Resumen

Antecedentes: El modelado de nicho ecológico es una herramienta utilizada para delimitar y estimar las áreas de distribución de una especie y representarlas en forma de mapa.

Hipótesis: El modelado de nicho ecológico y los valores dasométricos proyectados a un espacio geográfico y ambiental permiten identificar áreas potenciales para la producción de semillas.

Especie de estudio: *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla*

Sitio de estudio: Provincias fisiográficas Sierra Madre Occidental, Mesa del Centro, Faja Volcánica Transmexicana, Sierra Madre del Sur y la subprovincia Carso Huasteco.

Métodos: Se utilizaron registros de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* y variables ambientales las cuales fueron procesados con el algoritmo MaxEnt, para seleccionar las áreas potenciales semilleras se usaron los datos dasométricos del Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México (SiBiFor).

Resultados: Se estimaron 3,671,978 ha como zonas de alta idoneidad para *P. chihuahuana* en la Sierra Madre Occidental y 420,860 ha para *P. leiophylla* en la Faja Volcánica Transmexicana. Las variables con mayor contribución al modelo para *P. chihuahuana* fueron la temperatura media anual y la temperatura mínima del mes más frío, para *P. leiophylla* fueron temperatura media anual y la vegetación. Las zonas con mejor calidad de sitio (relación altura-diámetro) para *P. chihuahuana* ($r^2 = 0.77, p < 0.01$) y *P. leiophylla* ($r^2 = 0.73, p < 0.01$) mostraron un coeficiente de determinación elevado.

Conclusiones: Este estudio ilustra una aproximación en la delimitación de áreas idóneas con potencial, las cuales podrían ser empleadas para la producción de semillas en México.

Palabras claves: Áreas de idoneidad, distribución de especies, hábitat, modelos de nicho ecológico, relación dasométrica.

Abstract

Background: Ecological niche modeling is a tool used to delimit and estimate the distribution areas of a species and represent them in the form of a map.

Hypotheses: The ecological niche modeling and the dasometric values projected to a geographic and environmental space allow identifying potential areas for seed production.

Study species: *Pinus chihuahuana* and *Pinus leiophylla*

Study site: Physiographic provinces Sierra Madre Occidental, Mesa del Centro, Transmexican Volcanic Belt, Sierra Madre del Sur and the Carso Huasteco subprovince.

Methods: Records of *P. chihuahuana* and *P. leiophylla* and environmental variables were used, which were processed with the MaxEnt algorithm. To select the potential seed areas, the dasometric data of the Biometric Forest System were used for the management of the forests of Mexico (SiBiFor).

Results: 3,671,978 ha were estimated as highly suitable areas for *P. chihuahuana* in the Sierra Madre Occidental and 420,860 ha for *P. leiophylla* in the Trans-Mexican Volcanic Belt. The variables with the greatest contribution to the model for *P. chihuahuana* were the mean annual temperature and the minimum temperature of the coldest month, for *P. leiophylla* were mean annual temperature and vegetation. The areas with the best site quality (height-diameter relationship) for *P. chihuahuana* ($r^2 = 0.77, p < 0.01$) and *P. leiophylla* ($r^2 = 0.73, p < 0.01$) showed a high coefficient of determination.

Conclusions: This study illustrates an approach in the delimitation of suitable areas with potential, which could be used for the production of seeds in Mexico.

Key words: Areas of suitability, dasometric relationship, ecological niche models, habitat, species distribution.



Pinus chihuahuana Engelm. y *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. tienen una amplia distribución; el primero abarca desde el sureste de los Estados Unidos de América (sur de Arizona y suroeste de Nuevo México) hasta los estados mexicanos de Chihuahua y Durango en la Sierra Madre Occidental y la segunda desde el norte de México hasta Oaxaca en las cadenas montañosas del Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del sur ([Perry 1991](#), [Farjon & Styles 1997](#), [Musálem-Santiago & Martínez-García 2003](#)). *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* son especies independientes ([Almaraz-Abarca et al. 2006](#), [Debreczy & Rácz 2011](#), [Ferguson et al. 2013](#), [Gernandt & Pérez de la Rosa 2014](#)), cuyas áreas de distribución todavía no han sido bien delimitadas, por lo que presentan vacíos ambientales y ecológicos sin estudiar y analizar, relevantes para el conocimiento biológico de ambas especies. Ambos taxa se encuentran entre los componentes más importantes de los bosques templados de la Sierra Madre Occidental y Faja Volcánica Transmexicana.

El análisis geográfico y ambiental, en conjunto con modelos de nicho o modelos del hábitat potencial, permiten estimar la distribución potencial de las especies. Los modelos de nicho ecológico (MNE), se han convertido en una de las principales técnicas para el manejo y conservación de la biodiversidad ([Sáenz-Romero et al. 2012](#), [Monterrubio-Rico et al. 2016](#)), y la mayoría de ellos se basan en la relación que existe entre variables ambientales como predictoras de la distribución de las especies. Sin embargo, hasta el momento existe un debate debido que dichos modelos no toman en cuenta el papel de la especie, ni las interacciones para la generación de la distribución potencial. En este sentido, [Soberón \(2007\)](#) hace énfasis en que los modelos de nicho ecológico pueden ser divididos en dos grandes grupos, aquellos que toman en cuenta las relaciones entre las especies y el ambiente, sin describir las interacciones (nicho grinneliano), y aquellos en donde las interacciones bióticas y las relaciones entre los recursos y las especies son tomadas en cuenta (nicho eltoniano). Entonces, el nicho ecológico de una especie se define como un espacio ambiental multidimensional (espacio ecológico y ambiental), en otras palabras, es el conjunto de características, variables ambientales o ecológicas, que describen los recursos que necesita un organismo para sobrevivir. Los diferentes métodos para generar MNE usan distintas reglas o algoritmos matemáticos de cómputo basados en los registros de recolección y variables ambientales. Una vez que el nicho se ha definido en un espacio ecológico, se proyecta a nivel geográfico, generando un mapa de distribución potencial predictivo ([Tsoar et al. 2007](#), [Peterson et al. 2011](#)). El mapa de distribución potencial puede ser proyectado a diferentes escalas temporales ([Sáenz-Romero et al. 2015](#), [Manzanilla-Quiñones et al. 2019b](#)).

En contraste, las unidades productoras de semillas actúan como reservas de material biológico y como materia prima para la producción de plantas destinadas a las actividades de restauración, reforestación y mejoramiento genético. La selección de estas áreas se basa en el uso de criterios fenotípicos de los mejores árboles, como diámetros y alturas dominantes, rectitud del fuste, copa redonda y bien conformada, posición de las ramas, edad reproductiva y que no presenten evidencia de daño por plagas o enfermedades ([Vallejos et al. 2010](#), [del Amo Rodríguez et al. 2017](#)). Considerando lo anterior, es importante identificar dentro del área de distribución de la especie, regiones con el mayor potencial para producir semillas de calidad.

La altura total y el diámetro normal son variables que se obtienen de árboles del mismo sitio de muestreo, los cuales se ubican en masas con distintos emplazamientos geográficos, por lo que tales datos tienen una estructura jerárquica, ya que al pertenecer a la misma unidad de muestreo tienden a parecerse más entre sí. Esta estructura estocástica anidada propicia una falta de independencia de las mediciones, dado que las observaciones de cada sitio de muestreo pueden estar correlacionadas ([Gregoire 1987](#), [Fox et al. 2001](#)). La estimación precisa de la relación alturadiámetro es importante debido a que la altura total es una variable más difícil y costosa de medir en campo que el diámetro normal, y por lo general se mide solo en una muestra de árboles ([Sharma & Breidenbach 2015](#)).

El uso de modelos de nicho ecológico en la determinación de áreas potenciales de distribución de especies es una actividad común que ha crecido exponencialmente en la última década a nivel mundial ([Morales et al. 2017](#)). Sin embargo, la integración de dicha herramienta en la evaluación de las actividades de manejo forestal, como la producción de germoplasma tiene un enfoque reciente en las especies forestales de México. De los pocos estudios, destaca el efectuado para *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl., donde se identificaron zonas con condiciones idóneas para la producción de semilla de ambos taxa en las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana ([Manzanilla-Quiñones et al. 2019a](#)).

El presente estudio propone la delimitación actual de las áreas de distribución, descripción de las variables ambientales relevantes y la identificación de zonas idóneas para la producción de germoplasma forestal de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México, dos especies independientes y taxonómicamente válidas ([Almaraz-Abarca et al. 2006](#), [Debreczy & Rácz. 2011](#), [The Plant List 2012](#), [Ferguson et al. 2013](#), [Gernandt & Pérez de la Rosa 2014](#)).

Se plantea que el modelado de nicho ecológico y los valores dasométricos proyectados a un espacio geográfico y ambiental permiten identificar las áreas idóneas potenciales

para la producción de semillas. Para comprobar dicha hipótesis, se formularon los siguientes objetivos: 1) estimar y mapear el hábitat potencial de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* e 2) identificar y proponer áreas potenciales productores de semillas en México.

Materiales y métodos

Área de estudio. El área de estudio se delimitó con base en las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental (SMOCC), Mesa del Centro (MC), Faja Volcánica Transmexicana (FVT), Sierra Madre del Sur (SMS) y la subprovincia Carso Huasteco (CH) de la Sierra Madre Oriental (SMORI) (INEGI 2001) (Figura 1), las cuales se consideraron como el límite de distribución natural de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

Obtención de datos: Se obtuvieron 4,972 registros para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* a partir de la base de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF 2019) (2,408 registros) y del proyecto “Desarrollo de un sistema biométrico para la planeación del manejo forestal de los ecosistemas con potencial maderable en México” (SiBiFor) (2,564 registros). Las bases de datos fueron depuradas eliminando los registros duplicados, ubicados dentro de zonas urbanas, cuerpos de agua y mal georreferenciados, se dejó un solo registro en una cuadrilla de 1 km² (30 segundos de arco) con ayuda de la plataforma Niche ToolBox de la

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Osorio-Olvera *et al.* 2016). De igual manera, se eliminaron los registros que no se encontraban dentro del rango altitudinal de las especies (< 1,500 y >3,000 m snm.) dde acuerdo con lo reportado en la literatura (Perry 1991, Farjon & Styles 1997). Al final del proceso de depuración se obtuvieron 2,104 registros, de las cuales 1387 corresponden a *P. chihuahuana* y 717 a *P. leiophylla*.

Variables predictoras: Se utilizaron las 19 variables bioclimáticas generadas para México del periodo 1910-2009 con una resolución espacial de 1 km² (30 segundos de arco), las cuales contienen información climática mensual de precipitación y temperatura (Cuervo-Robayo *et al.* 2014). Se incluyeron cinco variables ecogeográficas; la pendiente (%), orientación (°) y altitud (m snm.) fueron obtenidas a partir del modelo digital de elevación con resolución de 90 m en formato Geotiff (.tiff), la vegetación (tipo) se obtuvo de la serie VI “uso de suelo y vegetación” (escala 250 m) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI 2016) y la edafología (tipo) de la serie I “conjunto de datos vectoriales edafológicos” (escala 250 m) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO 1995); ambos archivos fueron descargados en formato vectorial (shapefile). Todas las variables se homogenizaron y transformaron en formato ASCII a una escala de 1 km² (30 segundos de arco) en el programa ArcMap V.10.5 (ESRI 2014). Se realizó un

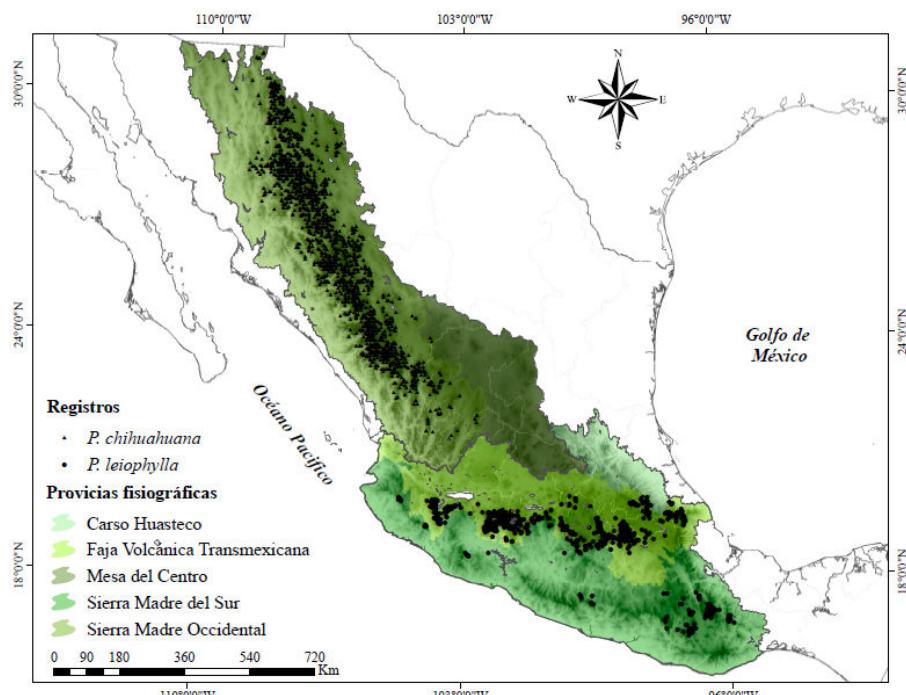


Figura 1. El mapa representa los registros de presencia de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* (datos del GBIF y SiBiFor), así como las provincias fisiográficas utilizadas para la delimitación de las áreas de modelamiento espacial ecológico-dasométrico.

Áreas idóneas para *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla* en México

análisis de colinealidad en el lenguaje estadístico R ([R Core Team 2016](#)) que permitió descartar las variables redundantes (coeficientes de correlación de Pearson de $\geq \pm 0.85$) con el fin de evitar el efecto de la multicolinealidad y maximizar la contribución de las variables en los modelos ([Peterson & Nakazawa 2008](#), [Monterrubio-Rico et al. 2016](#)). Finalmente, se seleccionaron 12 variables para *P. chihuahuana* y 14 para *P. leiophylla* de las 24 variables ambientales analizadas ([Tabla 1](#)).

Delimitación de área M: El área accesible M se ha descrito como el espacio donde una especie está o se supone que podría estar, dado el conocimiento biológico que se tiene de ella y de su capacidad de dispersión por no existir barreras ambientales que pudieran limitar su establecimiento ([Soberón & Peterson 2005](#), [Martínez-Méndez et al. 2016](#)). Se delimitaron dos áreas de modelación, una para cada taxon analizado, utilizando las provincias fisiográficas de México ([INEGI 2001](#)), empleando aquellas que coincidieran con la ubicación de los registros seleccionados, así como las contiguas a ellas, donde en teoría se presenta el rango de distribución de la especie ([Martínez-Meyer 2005](#)). La primera área M se creó con las provincias de la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre del Sur y la subprovincia Carso Huasteco; la segunda se elaboró con las

provincias de la Sierra Madre Occidental y Mesa del Centro. A partir de la delimitación del área M, se recortaron y ajustaron las variables ambientales a un mismo tamaño de pixel de 1 km² (30 segundos de arco) en el programa ArcMap V.10.5 ([ESRI 2014](#)).

Generación de los modelos: Para la modelación de la distribución potencial se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt V.3.3.3k), una de las ventajas de utilizar MaxEnt es que el modelo de probabilidad puede ser construido a partir de datos de solo presencia, sin que necesariamente se especifiquen los datos de ausencia; en vez de ello, usa los datos ambientales proporcionados por el área de modelamiento espacial como complemento de los datos de pseudoausencias ([Phillips et al. 2006](#)).

Con el uso de los registros de presencia y las variables ambientales seleccionadas a partir del análisis de multicolinealidad, se generaron y probaron 10 modelos de distribución a partir de diferentes criterios de aplicación de umbral ([Tabla 2](#)). Los modelos M5 y M10 se generaron a partir de los parámetros que vienen por omisión en el algoritmo MaxEnt ([Phillips et al. 2006](#)) pero con diferente replicado interno. Se aplicó un máximo de 1,000 iteraciones y un límite de convergencia de 10^{-5} (valor por omisión) ([Phillips et al. 2006](#), [Garza-López et al. 2016](#), [Manzanilla-](#)

Tabla 1. Variables ambientales empleadas en la modelación de la distribución potencial de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México (correlaciones < 0.85).

Clave	Variables bioclimáticas	Especie
	Unidad (en paréntesis)	
Bio01	Temperatura media anual (°C)	Ambas
Bio02	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máx. - Temp. Mín.) (°C)	Ambas
Bio03	Isotermalidad (Bio2 / Bio7) ($\times 100$) (°C)	<i>P. leiophylla</i>
Bio04	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar $\times 100$) (°C)	<i>P. leiophylla</i>
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Ambas
Bio12	Precipitación total anual (mm)	Ambas
Bio13	Precipitación del mes más húmedo (mm)	<i>P. chihuahuana</i>
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)	<i>P. chihuahuana</i>
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) (mm)	Ambas
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	<i>P. leiophylla</i>
Bio18	Precipitación del trimestre más caliente (mm)	<i>P. leiophylla</i>
Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)	Ambas
Eda	Edafología (tipo)	Ambas
Or	Orientación (%)	Ambas
Pnd	Pendiente (°)	Ambas
Veg	Vegetación (tipo)	Ambas

Tabla 2. Configuración de parámetros empleados en la generación de los modelos de nicho ecológico para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*.

Número de modelo	Tipo de réplica interna	Aplicación de regla de umbral	Número de interacciones máximas
M1	<i>Bootstrap</i>	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1,000
M2	<i>Bootstrap</i>	Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1,000
M3	<i>Bootstrap</i>	Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1,000
M4	<i>Bootstrap</i>	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1,000
M5	<i>Bootstrap</i>	Sin aplicación de regla de umbral	500
M6	<i>Validación cruzada</i>	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1,000
M7	<i>Validación cruzada</i>	Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1,000
M8	<i>Validación cruzada</i>	Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1,000
M9	<i>Validación cruzada</i>	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1,000
M10	<i>Validación cruzada</i>	Sin aplicación de regla de umbral	500

[Quiñones *et al.* 2019a](#)) con el fin de determinar cuál modelo se ajusta y explica mejor la distribución actual de las especies.

La calibración de los modelos se realizó con el 75 % de los registros de presencia de las especies en formato csv para entrenar los modelos y 25 % para validarlos ([Phillips *et al.* 2006](#), [Miranda-Sierra *et al.* 2016](#)). Se usó la prueba de Jackknife para determinar la contribución relativa de cada variable al modelo ([Phillips *et al.* 2006](#), [Shcheglovitova & Anderson 2013](#)). La salida de los modelos fue del tipo logística, el cual representa un índice con valores de 0 a 1, donde el valor más próximo a 1 indica condiciones ambientales idóneas para el crecimiento y desarrollo de la especie ([Phillips *et al.* 2006](#), [Coitiño *et al.* 2013](#), [Miranda-Sierra *et al.* 2016](#)).

Validación de los modelos: Los modelos se evaluaron mediante el área bajo la curva AUC de ROC estándar ([Phillips *et al.* 2006](#)); sin embargo, la validación de los modelos por medio del AUC ha sido cuestionada por no considerar datos de ausencia y por ponderar del mismo modo los errores de omisión y de comisión ([Lobo *et al.* 2007](#), [Peterson *et al.* 2008](#)). Por tal motivo los modelos fueron evaluados con la prueba de ROC parcial en el programa *Tool for Partial-ROC* V.1.0 ([Barve 2008](#)). Esta técnica se desarrolló para contrarrestar las deficiencias del AUC ([Peterson *et al.* 2008](#)).

Se ejecutaron los análisis ROC parcial para cada uno de los modelos generados utilizando el 50 % de los registros, con una confiabilidad del 95 %, con un número de 1,000 réplicas mediante un remuestreo por *Bootstrap* y fijando un error de omisión del 5 %. La prueba genera valores de 1 a 2, donde un valor con promedio de radio de 1 representa un modelo igual a uno generado al azar ([Peterson *et al.* 2008](#), [Garza-López *et al.* 2016](#)). Además, se realizó una prueba de Z donde el valor de Z calculado de las proporciones AUC de

ROC parcial debe ser mayor al valor de Z de tablas para que los modelos sean estadísticamente válidos ($Z > 2.303 = 99\%$ de confiabilidad) ([Martínez-Méndez *et al.* 2016](#)).

Con base en el mejor ajuste estadístico del modelo, la calidad de hábitat se clasificó en tres categorías con intervalos iguales (alto, moderado y nulo). Se utilizó el valor de la categoría de calidad de hábitat alta para transformar el modelo de continuo a binario (apto-no apto), la razón de utilizar los valores de la categoría alta fue debido a que éstos representan las máximas condiciones ambientales ideales desde el punto de vista biológico y ecológico para una especie. Dicha transformación ayudó a estimar y delimitar las áreas con potencial para la producción de semillas de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México. Al final, las proyecciones de los modelos fueron visualizadas con el programa ArcMap V.10.5 ([ESRI 2014](#)) a manera de mapas de distribución.

Áreas productoras de semillas: La selección de las áreas productoras de semillas se basó en la evaluación de la calidad de estación de los rodales ([Huang *et al.* 1992](#)). Los cuales reflejan la capacidad productiva de los sitios a través de la altura dominante de los árboles y de la relación alométrica con base en lo propuesto por [Huang *et al.* \(1992\)](#), [Lappi \(1997\)](#) y [Yuancai & Parresol \(2001\)](#), con un incremento proporcional entre la altura y el diámetro normal del arbolado, de manera que, sitios con árboles que presenten valores altos de estas variables suelen presentar una mayor calidad de sitio.

Se crearon las capas en formato *raster* de dichas variables (altura-diámetro), realizando un análisis de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW), dicha técnica estima el valor de una variable desconocida a través de la ponderación inversa de la distancia de valores cercanos

conocidos. Usando los registros ambientales que definieron la distribución de los taxa y los datos dasométricos de altura total y diámetro normal del SiBiFor. Se utilizó el área M para delimitar las capas *ráster*, las cuales contienen datos de alturas y diámetros en metros para cada árbol de cada especie. A partir de esta información se clasificaron los valores en tres categorías para identificar zonas de diferente calidad de sitio (alto, moderado y bajo). Finalmente, para corroborar los resultados de los mejores sitios (calidad de sitio alto), se realizó un análisis de regresión lineal simple para definir la correlación entre los valores totales de las alturas (variable dependiente) y los diámetros (variable independiente) para cada árbol en el programa *Statgraphics Centurion v. 15.2.06* ([StatPoint Inc. 2007](#)).

Resultados

Los resultados basados en el área bajo la curva (AUC) obtuvieron valores superiores a 0.8, lo que significa un desempeño bueno para ambos taxa, *P. chihuahuana* presentó valores del AUC de 0.857 para los datos de

entrenamiento y 0.842 en las pruebas de validación, mientras que *P. leiophylla* obtuvo valores del AUC de 0.961 en los datos de entrenamiento y 0.904 para la validación. El análisis de la prueba de Z corrobora estos resultados, lo que indica que los modelos son estadísticamente significativos ($p < 0.01$). Sin embargo, al realizar la prueba de ROC parcial, el modelo 3 con tipo de réplica interna Bootstrap (Regla de aplicación de umbral de Igual sensibilidad y especificidad de prueba) presentó los valores más altos en el AUC y ROC parcial para *P. chihuahuana*, mientras que el modelo 5 con tipo de réplica interna Bootstrap (sin aplicación de regla de umbral) fue el que presentó mejor ajuste para *P. leiophylla* ([Tabla 3](#)). Lo anterior indica que los modelos generados para ambos taxa son estadísticamente mejores que los generados al azar.

Las variables con mayor contribución para *P. chihuahuana* fueron la temperatura media anual ([Bio1], 44.3 %), la temperatura mínima del mes más frío ([Bio6], 29.5 %), la precipitación del mes más húmedo ([Bio13], 9.1 %) y la precipitación del trimestre más frío ([Bio19],

Tabla 3. Resultados estadísticos de los modelos de nicho ecológico para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*.

Especie	Modelo	ROC parcial	Desviación estándar	Prueba de Z
				Valor de P
<i>P. chihuahuana</i>	M1B	1.793	± 0.359	< 0.01
	M2B	1.780	± 0.266	< 0.01
	M3B	1.809	± 0.266	< 0.01
	M4B	1.805	± 0.427	< 0.01
	M5B	1.786	± 0.374	< 0.01
	M6CV	1.798	± 0.384	< 0.01
	M7CV	1.804	± 0.437	< 0.01
	M8CV	1.805	± 0.426	< 0.01
	M9CV	1.781	± 0.289	< 0.01
	M10CV	1.774	± 0.289	< 0.01
<i>P. leiophylla</i>	M1B	1.527	± 0.024	< 0.01
	M2B	1.528	± 0.024	< 0.01
	M3B	1.528	± 0.024	< 0.01
	M4B	1.528	± 0.024	< 0.01
	M5B	1.530	± 0.023	< 0.01
	M6CV	1.528	± 0.023	< 0.01
	M7CV	1.528	± 0.024	< 0.01
	M8CV	1.527	± 0.023	< 0.01
	M9CV	1.527	± 0.023	< 0.01
	M10CV	1.528	± 0.023	< 0.01

8.7 %) ([Figura 2A](#)). Para *P. leiophylla* fue la temperatura media anual ([Bio1], 52.9 %), la vegetación ([Veget], 20.2 %), la edafología ([Edaf], 9.6 %) y la precipitación total anual ([Bio12], 5.9 %) ([Figura 2B](#)). La Bio1 fue la variable climática más importante en ambos taxa, lo que indica que es relevante en el nicho ecológico de ambas especies.

El nicho ecológico de *P. chihuahuana* presentó un área amplia de alta idoneidad de 3,671,978 ha ([Figura 3](#)), con alturas (> 30 m) y diámetros máximos (> 50 cm) en las subprovincias Gran Meseta y Cañadas Chihuahuenses y Duranguenses de la Sierra Madre Occidental ([Figura 4](#)). *P. leiophylla* presentó un área de idoneidad de 420,860 ha ([Figura 3](#)), con diámetros y alturas mayores las cuales se encuentran en pequeños manchones en las subprovincias Sierras de Jalisco, Chapala, Neovolcánica Tarasca y Lagos y Volcanes Anáhuac de la Faja Volcánica Transmexicana ([Figura 4](#)). Por lo tanto, *P. chihuahuana* presenta la superficie con mayor calidad de sitio.

Se observa una relación importante entre las variables dasométricas del diámetro normal y altura total de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*, con coeficientes de determinación de $r^2 = 0.77$ y $r^2 = 0.73$, respectivamente y un nivel de confiabilidad del 99 % ($p = 0.001$). Los valores máximos de diámetro y altura se presentaron en la Sierra Madre Occidental para *P. chihuahuana* y en la Faja Volcánica Transmexicana para *P. leiophylla*.

Discusión

Los modelos seleccionados para las especies obtuvieron un buen desempeño predictivo en las pruebas de AUC, ROC parcial y de Z. El modelo 3 fue el que presentó el mejor desempeño para *P. chihuahuana* con un valor promedio de 1.809 en la prueba de ROC parcial, mientras que el para *P. leiophylla* fue el modelo 5 con un valor

promedio de 1.530 en la prueba de ROC parcial. Lo anterior indica que los modelos generados para ambos taxa son estadísticamente confiables ($p < 0.01$, radios > 1) ([Peterson et al. 2011](#), [Garza-López et al. 2016](#), [Manzanilla-Quiñones et al. 2019a](#)).

La modelación indica que las especies ocupan áreas geográficas con climas templados subhúmedos C(w₂) y C(w₁) en 14 de las 34 subprovincias incluidas en las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental, Faja Volcánica Transmexicana y Sierra Madre del Sur. De acuerdo a las variables ambientales *P. chihuahuana* requiere de temperaturas más frescas de 8 a 17 °C durante todo el año, con una temperatura mínima del mes más frío de -6 a 5 °C, precipitaciones de mes más húmedo de 293 mm y 178 mm en la precipitación del trimestre más frío, mientras que *P. leiophylla* requiere temperaturas constantes de 9 a 21 °C y precipitaciones de 1,068 mm durante todo el año. Por lo que estas variables son de importancia para el nicho ecológico de ambos taxa. Los resultados son comparables con lo obtenido por algunos autores como [Bannister & Neuner \(2001\)](#) quienes reportan temperaturas promedio anuales entre -6.6 a 11 °C, condiciones más frías con lo obtenido en el presente estudio para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*. [Cruz-Cárdenas et al. \(2016\)](#) modelaron la distribución potencial de Pináceas en Michoacán, donde incluyeron a *P. leiophylla*, la cual tuvo presencia en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana, mostrando condiciones ambientales idóneas en la precipitación del trimestre más frío (Bio6). [Sáenz-Romero et al. \(2015\)](#) señalan que las provincias fisiográficas de mayor distribución potencial para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* se encuentran dentro de la Sierra Madre Occidental, Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur. A pesar de que los autores integraron todos los registros del grupo taxonómico *Leiophylla*

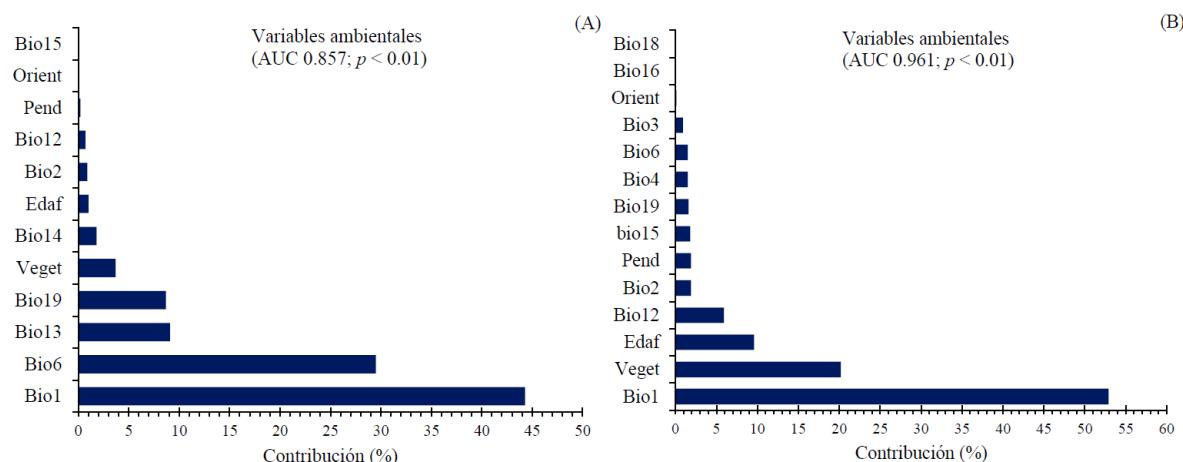


Figura 2. Contribuciones porcentuales de las variables ambientales en los modelos de distribución de *P. chihuahuana* (A) y *P. leiophylla* (B) en México

Áreas idóneas para *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla* en México

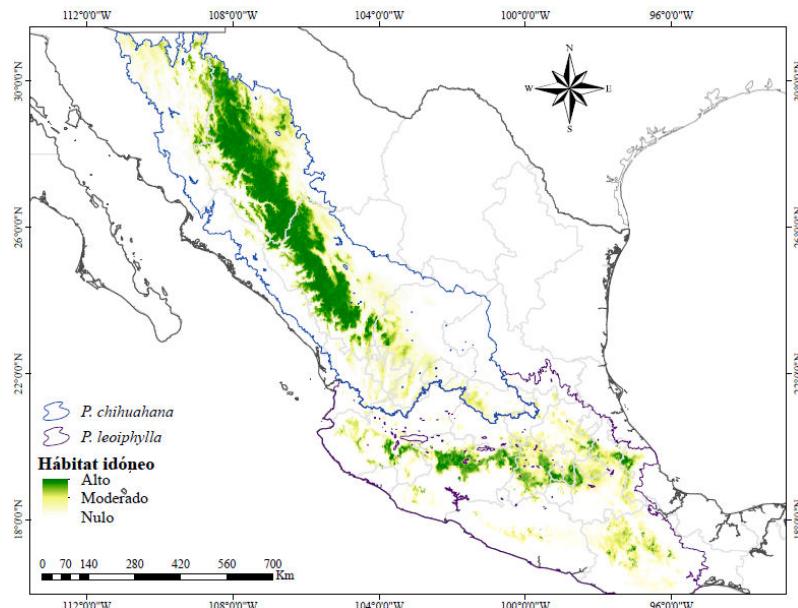


Figura 3. Clasificación del hábitat idóneo para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

(*P. leiophylla*, *P. leiophylla* var. *leiophylla* [sinonimia con *P. leiophylla*] y *P. chihuahuana* [antes *P. leiophylla* var. *chihuahuana*]) en su modelación de nicho, los resultados son similares a los obtenidos en el presente estudio. Los taxa se presentan principalmente en las ecorregiones de Sierras templadas, la cual comparten naturalmente bosques de coníferas, bosque de encinos y bosques mixtos ([INEGI-CONABIO-INE. 2008](#)).

Los resultados obtenidos de la modelación del nicho ecológico y calidad de sitio permitieron identificar zonas para el desarrollo de áreas productoras de semillas y su posible protección. [Navarro-Cerrillo et al. \(2016\)](#) mencionan que definir áreas productoras de germoplasma ayudaría a la conservación y salvaguardarían material genético de las especies estudiadas.

Las áreas que presentan el nicho ecológico idóneo, y que contienen los individuos con las características dasométricas adecuadas para la producción de semillas de *P. chihuahuana*, se ubican principalmente en las subprovincias Sierra y Cañadas del Norte, Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses y Duranguenses de la Sierra Madre Occidental, donde la mayor superficie idónea se localiza en el estado de Durango. Para el caso de *P. leiophylla*, las áreas con mayor idoneidad dasométrica y ambiental se localizan en pequeñas porciones dentro de las subprovincias de la Sierra de Jalisco, Chapala, Neovolcánico tarasca, Mil Cumbre y Lagos y Volcanes de Anáhuac de la Faja Volcánica Transmexicana. Por lo anterior, se puede considerar estas provincias fisiográficas como áreas prioritarias para la conservación de especies de coníferas con distribución similar. La distribución de ambos taxa, se debe a su alta producción de semillas y tolerancia a la

sequía, por lo que *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* son especies con buena adaptación en México ([Musálem-Santiago & Martínez-García 2003](#), [Sáenz-Romero et al. 2015](#)).

En general, *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* no se encuentran dentro de alguna categoría de riesgo; sin embargo, de acuerdo con [Frankham et al. \(2002\)](#) y [Sáenz-Romero et al. \(2015\)](#) las altas tasas de deforestación, el cambio de uso del suelo y el cambio climático han provocado la fragmentación y degradación del hábitat de manera drástica, el cual está reduciendo sus poblaciones, no solo de estos taxa, sino también otras especies de pinos como *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* ([Delgado-Valerio et al. 2015](#)) asociadas con *P. leiophylla*. Por lo anterior, se sugiere el desarrollo de estrategias y aplicación de programas de rescate de las poblaciones que se encuentren dentro de las subprovincias fisiográficas obtenidas con los modelos de nicho ecológico.

Se observaron coeficientes de determinación altos y significativos entre la altura y el diámetro normal de cada árbol de *P. chihuahuana* ($r^2 = 0.77, p < 0.01$) y *P. leiophylla* ($r^2 = 0.73, p < 0.01$), resultados mayores a los obtenidos por [Manzanilla-Quiñones et al. \(2019a\)](#) para *P. montezumae* ($r^2 = 0.63$) y *P. pseudostrobus* ($r^2 = 0.53$), especies de clima similar y que suelen coexistir con *P. leiophylla*, principalmente en el centro del país. Los valores obtenidos de los coeficientes de determinación permiten corroborar que la calidad de sitio es un factor importante que influye en las características dasométricas de las especies. De acuerdo con [Corral-Rivas et al. \(2014\)](#) y [Sharma & Breidenbach \(2015\)](#), la estimación precisa en la relación de estas variables es importante, ya que la altura total de los árboles

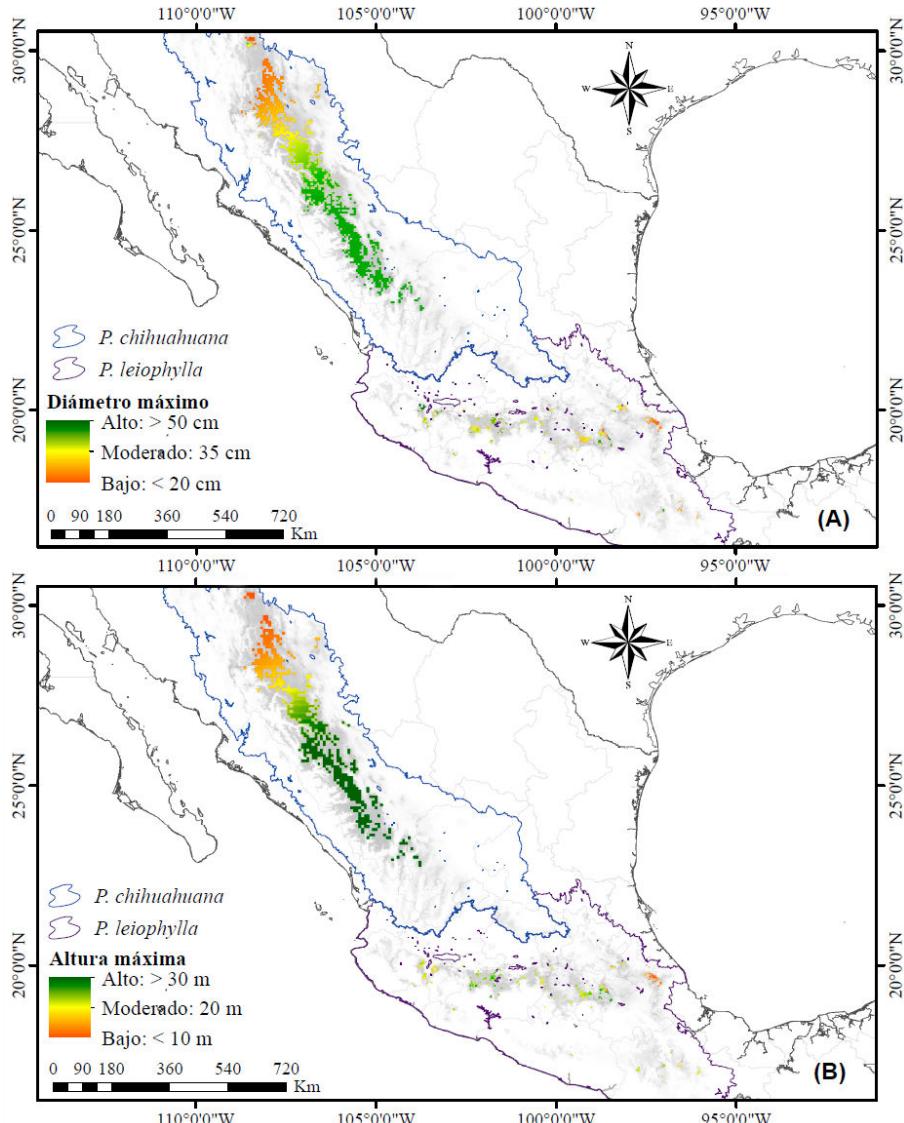


Figura 4. Mapas de calidad de sitio para el diámetro máximo (A) y altura máxima (B) de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

es más difícil y costosa de medir en campo que el diámetro normal; además de que es común su integración dentro de los modelos de crecimiento y producción usados en el manejo forestal.

Este estudio representa una primera aproximación en la delimitación de áreas con características ambientales y morfológicas, idóneas para la producción y recolección de semillas de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México, en las cuales se pueden iniciar ensayos de colonización o reintroducción de poblaciones al clima para el cual están adaptadas. De igual manera, estos resultados servirían como base en actividades de migración asistida con fines de conservación y restauración de los bosques, como lo sugieren [Sáenz-Romero *et al.* \(2009\)](#), la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica ([SCDB 2009](#)) y

[Castellanos-Acuña *et al.* \(2018\)](#) en sus estudios sobre migración de especies y cambio climático para especies de clima templado. Además, el adecuado manejo de estas áreas beneficiará directamente a la conservación y protección de estas especies.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca de posgrado No. 469568 al primer autor. Al Laboratorio de Geomatica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Al Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT (proyecto: 209772-2013-C01).

Literatura citada

- Almaraz-Abarca N, González-Elizondo MS, Tena-Flores JA, Ávila-Reyes JA, Herrera-Corral J, Naranjo-Jiménez N. 2006. Foliar flavonoids distinguish *Pinus leiophylla* and *Pinus chihuahuana* (Coniferales: Pinaceae). *Proceedings of the Biological Society of Washington* **119**: 426-436. DOI: [https://doi.org/10.2988/0006-324X\(2006\)119\[426:FFDPLA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2988/0006-324X(2006)119[426:FFDPLA]2.0.CO;2)
- Bannister P, Neuner G. 2001. Frost resistance and the distribution of conifers. In: Bigas FJ, Colombo SJ. *Conifer Cold Hardiness*. Dordrecht: Springer. pp. 3-21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_1; ISBN: 978-90-481-5587-3
- Barve N. 2008. Tool for Partial-ROC. V.1. Biodiversity Institute. Lawrence, USA. <http://nicho.conabio.gob.mx/home/proposito-y-guia-del-usuario/validacion-del-modelo> (accessed July 15, 2019).
- Castellanos-Acuña D, Vance-Borland KW, Clair JBS, Hamann A, López-Upton J, Gómez-Pineda E, Ortega-Rodríguez JM, Sáenz-Romero C. 2018. Climate-based seed zones for Mexico: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New Forests* **49**: 297-309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9620-6>
- SCDB [Secretariat of the Convention on Biological Diversity]. 2009. *Relación entre la Diversidad Biológica y la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*. Montreal, Canadá: Secretariat of the Convention on Biological Divers. ISBN: 92-9225-176-7
- Coitiño HI, Montenegro F, Fallabrino A, González EM, Hernández D. 2013. Distribución actual y potencial de *Cabassous tatouay* y *Tamandua tetradactyla* en el límite sur de su distribución: implicancias para su conservación en Uruguay. *Edentata* **14**: 23-34. DOI: <https://doi.org/10.5537/020.014.0104>
- CONABIO [Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad]. 1995. Edafología. Escalas 1:250,000 y 1:1, 000,000. México. Archivo vectorial shapefile. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (accesssed May 21, 2019).
- Corral-Rivas S, Álvarez-González JG, Crecente-Campo F, Corral-Rivas JJ. 2014. Local and generalized height-diameter models with random parameters for mixed, uneven-aged forests in Northwestern Durango, Mexico. *Forest Ecosystems* **1**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/2197-5620-1-6>
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva JT, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval JA 2016. Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **22**: 135-148. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Cuervo-Robayo AP, Téllez-Valdés O, Gómez-Albores MA, Venegas-Barrera CS, Manjarrez J, Martínez-Meyer E. 2014. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* **34**: 2427-2437. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Debreczy Z, Rácz I. 2011. Conifers around the world. Vol. 1-2. Budapest: DendroPress Ltd. ISBN: 9789632190631
- del Amo Rodríguez S, Tenorio CV, Prado JMR, Romero EH, Rodríguez JR. 2017. Guía para el establecimiento y manejo de unidades de producción de germoplasma forestal de especies nativas. *Cuadernos de la BioRed* **2**: 75-96.
- Delgado-Valerio P, Rebolledo-Camacho V, Flores-López C, García-Magaña JJ, Piñero D, González-Rodríguez A, Vázquez-Lobo, AY. 2015. Aproximación molecular para la evaluación genética de áreas productoras de semillas y de conservación en especies del género *Pinus*. México, DF: Proyecto CONAFOR-2012-C01-176167.
- ESRI [Environmental Scientific Research Institute]. 2014. ArcGIS 10.3. Análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica. California, USA: Redlands.
- Farjon A, Styles BT. 1997. *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph* 75. New York: Botanical Garden
- Ferguson GM, Flesch AD, Van Devender TR. 2013. Biogeography and diversity of pines in the Madrean Archipelago. In: Gottfried GJ, Ffolliott PF, Gebow BS, Eskew LG, Collins LC, comp. *Merging Science and Management in a Rapidly Changing World*: pp. 197-203. Tucson, Arizona: Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago III and 7th Conference on Research and Resource Management in the Southwestern Deserts. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p067.pdf
- Fox JC, Ades PK, Bi H. 2001. Stochastic structure and individual-tree growth models. *Forest Ecology and Management* **154**: 261-276. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00632-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00632-0)
- Frankham R, Briscoe DA, Ballou JD. 2002. *Introduction to conservation genetics*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808999>; ISBN: 0-521-63014-2
- Garza-López M, Ortega-Rodríguez JM, Zamudio-Sánchez FJ, López-Toledo JF, Domínguez-Álvarez FA, Sáenz-Romero C. 2016. Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences* **94**: 43-50. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.500>
- GBIF [Global Biodiversity Information Facility]. 2019 Bases de datos geográficos disponibles para *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham en México. <http://www.gbif.org> (accesssed May 01, 2019).
- Gernandt DS, Pérez de la Rosa JA. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de*

- Biodiversidad **85**: 126-133. <https://dx.doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Gregoire TG. 1987. Generalized error structure for forestry yield models. *Forest Science* **33**: 423-444. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestscience/33.2.423>
- Huang S, Titus SJ, Wiens DP. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research* **22**: 1297-1304. DOI: <https://doi.org/10.1139/x92-172>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática]. 2001. Provincias fisiográficas. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html#Descargas> (accessed May 21, 2019).
- INEGI. 2016. Modelo Digital de Elevación. Aguascalientes. México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/index.jsp> (accesssed May 21, 2019).
- INEGI-CONABIO-INE [Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Instituto Nacional de Ecología]. 2008. Ecorregiones terrestres de México. Escala 1:1,000,000. México. <http://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aecort08gw> (accessed February 04, 2020).
- Lappi J. 1997. A longitudinal analysis of height/diameter curves. *Forest Science* **43**: 555-570.
- Lobo JM, Jiménez-Valverde A, Real R. 2007. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography* **17**: 145-151. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>
- Manzanilla-Quiñones U, Delgado-Valerio P, Hernández-Ramos J, MolinaSánchez A, García-Magaña JJ, Rocha-Granados MDC. 2019a. Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botanica Mexicana* **126**: e1398. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>
- Manzanilla-Quiñones U, Martínez-Adriano CA, Aguirre-Calderón OA. 2019b. Modelado espacial histórico y actual del oyamel (*Abies religiosa* [Kuth] Schltdl. & Cham.) en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **25**: 201-217. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.10.076>
- Martínez-Méndez N, Aguirre-Planter E, Eguiarte EL, Jaramillo-Correa JP. 2016. Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences* **94**: 5-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez-Meyer E. 2005. Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics* **2**: 45-55 DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.8>
- Miranda-Sierra CA, Geda-López G, Sotolongo-Sospedra R. 2016. Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Revista Científica Avances* **18**: 28-35.
- Monterrubio-Rico TC, Charre-Medellín JF, Pacheco-Figueroa C, Arriaga-Weiss S, Valdez-Leal JD, Cancino-Murillo R, Escalona-Segura G, Bonilla-Ruz C, Rubio-Rocha Y. 2016. Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **87**: 1103-1117. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.004>
- Morales NS, Fernández IC, Baca-González V. 2017. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review. *PeerJ*, **5**, e3093.
- Musálem-Santiago MA, Martínez-García S. 2003. Monografía de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. México, DF.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Chapingo (México). Centro Experimental del Valle de México. ISBN: 9685580049
- Navarro-Cerrillo RM, Clavero-Rumbaó I, Lorenzo-Vidaña A, Quero-Pérez JL, Duque-Lazo J. 2016. Integración de datos de inventario y modelos de hábitat para predecir la regeneración de especies leñosas mediterráneas en repoblaciones forestales. *Ecosistemas* **25**: 6-21. DOI: <https://dx.doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.02>
- Osorio-Olvera L, Barve V, Barve N, Soberón J, Falconi M. 2016. Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distributions models in a friendly GUI environment. R package versión 0.2.5.4. <https://github.com/luismurao/ntbox> (accessed June 03, 2019).
- Perry JP. 1991. *The Pines of México and Central America*. Portland: Timber Press. ISBN: 0881921742
- Peterson AT, Nakazawa Y. 2008. Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography* **17**: 135-144. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x>
- Peterson AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Martínez-Meyer E, Nakamura M, Araújo MB. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. DOI: <https://doi.org/10.1644/1545-1542-94.1.241>
- Peterson AT, Papes M, Soberón J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* **213**: 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>

Áreas idóneas para *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla* en México
"

- Phillips SJ, Anderson RP, Schaphire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Crookston NL, Duval P, Beaulieu J. 2009. Estimaciones de cambio climático para Michoacán: Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservación de la Mariposa Monarca. *Cuadernos de Divulgación Científica y Tecnológica del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán* **3**: 21 pp.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P, Lindig- Cisneros RA. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* **275**: 98-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Ortega-Rodríguez JM, Marín-Togo MC, Madrigal-Sánchez X. 2015. *Pinus leiophylla* hábitat adecuado para 1961-1990 y el clima futuro. *Botanical Sciences* **93**: 709-718. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.86>
- Sharma RP, Breidenbach J. 2015. Modeling height-diameter relationships for Norway spruce, Scots pine, and downy birch using Norwegian National Forest Inventory data. *Forest Science and Technology* **11**: 44-53. DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.957354>
- Shcheglovitova M, Anderson RP. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small simple sizes. *Ecological Modelling* **269**: 9-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011>
- Soberón J, Peterson AT. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distribution areas. *Biodiversity Information* **2**: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Soberón J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters* **10**: 1115-1123. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- StatPoint INC. 2007. STATGRAPHICS Centurion XV, V15.2.06. Warrenton, USA.
- The Plant List. 2012. *Pinus leiophylla* var. *leiophylla*. <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/tro-24901809> . (accessed February 02, 2020).
- Tsoar A, Allouche O, Steinitz O, Rotem D, Kadmon R. 2007. A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution. *Diversity and Distributions* **13**: 397-405. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00346.x>
- Vallejos J, Badilla Y, Picado F, Murillo O. 2010. Metodología para la selección e incorporación de áboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense* **34**: 105-119.
- Yuancai L, Parresol BR. 2001. Remarks on height-diameter modeling. USDA Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC. Research Note SRS-10

Associate editor: Edilia de la Rosa

Contribución de los autores: GEMQ diseño, estructura del estudio, análisis estadístico, generación de los modelos de nicho ecológico, elaboración de mapas de nicho ecológico y redacción del manuscrito. EJTG diseño, estructura del estudio, revisión y redacción del manuscrito. BVL, JOLM y JMMB revisión y redacción del manuscrito.