

Efectos del cambio climático en la distribución de *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla*: una propuesta para la conservación en México

Effects of climate change on the distribution of *Pinus chihuahuana* and *Pinus leiophylla*: a proposal for the conservation of both species in Mexico

Recepción del artículo: 30/05/2023 • Aceptación para publicación: 10/09/2023 • Publicación: 05/01/2024

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.322>

Gyorgy Eduardo Manzanilla-Quijada*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Morelia, Michoacán, México.

Ulises Manzanilla-Quñones

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Uruapan, Michoacán, México.

Eduardo Javier Treviño-Garza

Eduardo Alanís-Rodríguez

Edgar Silva-González

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

*Autor para correspondencia: gmanzanilla_quijada@hotmail.com

Resumen

El uso de los modelos de distribución es una herramienta utilizada para la solución de problemas de carácter biológico y ambiental. Se analizaron datos geográficos y variables ambientales con el objetivo de probar la hipótesis de que la distribución de *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla* se mantendrá para 2050 y 2080 en México. Se utilizaron registros de ambas especies y variables ambientales para el periodo 1910-2009 y Modelos de Circulación Global (GFDL-CM3 y CNRM-CM5) bajo dos escenarios RCP 4.5 y 8.5 proyectados a 2050 y 2080. Se empleó el algoritmo MaxEnt. Los resultados fueron evaluados y validados mediante las pruebas de AUC, Roc parcial y el estadístico Z. La contribución de cada variable en los modelos fue determinada a través de la prueba de Jackknife. Los modelos estimaron un área de distribución potencial actual para *P. chihuahuana* de 81,614.8 km² y de 15,105.3 km² en *P. leiophylla*. Las variables relevantes en el periodo actual para *P. chihuahuana* fueron Bio1, Bio6, Bio13 y Bio19, mientras que para *P. leiophylla* fueron Bio1, Veget y Edaf. Sin embargo, para el periodo futuro fueron Bio1, Bio19 y Bio13 para *P. chihuahuana*, y Bio1, Bio14 y Bio4 para *P. leiophylla*. Las proyecciones de los MCG CNRM-CM5 y GFDL-CM3 estimaron una reducción en las áreas de distribución de ambas especies a partir de 2080. Se estimaron superficies de conservación de 79,078.12 km² para *P. chihuahuana* y de 10,517.8 km² para *P. leiophylla* a finales de siglo. Se identificaron y propusieron áreas idóneas para la conservación de *P. chihuahuana* (Chihuahua y Durango) y *P. leiophylla* (Michoacán) en México.

Palabras clave: Áreas de idoneidad, análisis ambiental, distribución potencial, escenarios climáticos, modelos de distribución.

Abstract

The use of distribution models is a tool used to solve biological and environmental problems. Geographic data and environmental variables were analyzed to test the hypothesis that the distribution of *Pinus chihuahuana* and *Pinus leiophylla* will be maintained by 2050 and 2080 in Mexico. Records of both species and environmental variables for the period 1910-2009 and Global Circulation Models (GFDL-CM3 and CNRM-CM5) were used under two RCP 4.5 and 8.5 scenarios projected to 2050 and 2080. The MaxEnt algorithm was used. The results were evaluated and validated using AUC, partial Roc and Z-statistic tests. The contribution of each variable in the models was determined using the Jackknife test. The models estimated a current potential distribution area for *P. chihuahuana* of 81,614.8 km² and 15,105.3 km² for *P. leiophylla*. The relevant variables in the current period for *P. chihuahuana* were Bio1, Bio6, Bio13 and Bio19, while in *P. leiophylla* they were Bio1, Veget and Edaf. However, for the future period they were Bio1, Bio19 and Bio13 for *P. chihuahuana*, and Bio1, Bio14 and Bio4 for *P. leiophylla*. The CNRM-CM5 and GFDL-CM3 GCM projections estimated a reduction in the ranges of both species from 2080 onwards. Conservation areas of 79,078.12 km² for *P. chihuahuana* and 10,517.8 km² for *P. leiophylla* were estimated at the end of the century. Areas suitable for the conservation of *P. chihuahuana* (Chihuahua and Durango) and *P. leiophylla* (Michoacán) in Mexico were identified and proposed.

Keywords: Areas of suitability, climate scenarios, distribution models, environmental analysis, potential distribution.

Introducción

El cambio climático es un fenómeno global que provoca diferentes efectos, de entre los cuales, los más severos afectan de manera negativa la distribución de diversos grupos taxonómicos (IPCC 2014). De acuerdo con las proyecciones del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2014), las zonas con los rangos extremos altitudinales serían las que se verán mayormente afectadas. Las consecuencias del cambio climático, tales como aumento en la temperatura y la disminución en las precipitaciones afectarán de diversas maneras la distribución, diversidad y abundancia de la biodiversidad en el futuro (IPCC 2014, Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

La evidencia científica indica que las especies siempre han estado expuestas a lo largo de su historia de vida evolutiva a los cambios en el clima global, sin embargo, en la actualidad tales afectaciones han sido aceleradas por la actividad antropogénica, lo que ha propiciado que el ritmo de dichos cambios sea más acelerado y con un impacto mayor (IPCC 2014). De acuerdo con el IPCC (2018) durante el periodo de 1880 a 2017 la temperatura media global aumentó en 1.1 °C, a un ritmo de 0.2 °C por cada década. Por lo tanto, si este escenario se mantiene, la temperatura promedio global aumente de 3 a 5 °C para finales del 2100. Sin embargo, de acuerdo con Sáenz-Romero *et al.* (2010) para México se prevé un aumento en temperatura promedio anual de 0.5 a 2 °C para 2030, de 2.3 °C para 2060 y hasta de 3.7 °C para 2090.

Por lo general, las investigaciones sobre escenarios de cambio climático en México indican una tendencia hacia la disminución en las áreas de distribución de los ecosistemas forestales de clima templado debido al incremento de la temperatura promedio anual (Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). También se prevén alteraciones en la dinámica y frecuencia de los incendios forestales, así como aumento en la incidencia de plagas y enfermedades; lo que podría ocasionar una mayor mortandad de los bosques y selvas (Ibarra y Huerta 2016).

Se estima que los efectos del cambio climático en las comunidades forestales exijan un mayor proceso de adaptabilidad de las mismas, lo que podría conllevar a un distanciamiento de algunas poblaciones hacia entornos en los que están adaptadas (Davis y Shaw 2001). Este proceso que podría modificar su distribución actual y/o provocar la desaparición parcial o total de algunas de ellas. Dichos efectos representan un gran desafío para el manejo de recursos naturales en el presente siglo, lo cual pudiera implicar ajustes en los sistemas ecológicos, sociales y económicos, así como actividades de adaptación y mitigación (IPCC 2014).

Actualmente, con el desarrollo de numerosas bases de datos y de novedosas herramientas y técnicas los investigadores pueden predecir los efectos del cambio climático en la distribución de las especies (IPCC 2014, Sáenz-Romero *et al.*, 2015). Por medio de los Sistemas de Información Geográficas (SIG), y a través de diversos algoritmos de modelación de la distribución de especies, se ha logrado estimar el nicho ecológico y las áreas de distribución de especies de interés, en función de la combinación de variables ambientales (Soberón *et al.*, 2017).

El modelado de la distribución potencial de especies es una herramienta que se emplea de manera constante en los trabajos de manejo y conservación de los recursos forestales, en especial para diversos taxa de la familia Pinaceae en México, en condiciones de clima actual (Martínez-Méndez *et al.*, 2016) y bajo escenarios de cambio climático (Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016, Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). A través de este tipo de estudios es posible predecir, estimar y delimitar la distribución actual de las especies y como ésta se modifica o se mantiene en su espacio ambiental durante diferentes escalas temporales. Más allá de solamente conocer las condiciones ambientales que moldean el nicho ecológico y de delimitar las áreas de distribución de especies de interés ecológico, la aplicación de los modelos de distribución permite delimitar zonas potenciales para la producción de semillas (Manzanilla-Quijada *et al.*, 2020), así como la

elección de zonas aptas para la conservación in situ de especies de la familia Pinaceae en México (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020).

Pinus chihuahuana Engelm. y *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. son dos especies de pino de clima templado que se distribuyen en el norte y centro del país de México, de las cuales se conoce poco acerca de sus requerimientos ambientales y de la extensión de sus áreas de distribución en México (Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Manzanilla-Quijada *et al.*, 2020). Al igual que la mayoría de los taxa pertenecientes a la familia Pinaceae, se piensa que estas especies pueden ser vulnerables a los efectos del cambio climático en el futuro. Por lo que el presente estudio plantea la hipótesis de que el análisis del nicho ecológico actual y futuro permitiría identificar áreas aptas para la conservación de ambas especies a través del tiempo (2050 y 2080). Para contestar esta hipótesis se formularon los objetivos siguientes: modelar la distribución potencial actual y futura, identificar las variables ambientales relevantes en el nicho ecológico de cada periodo analizado y delimitar zonas aptas para la conservación de *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla* dentro de sus áreas de distribución natural en México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se delimitó con base en las provin-

cias fisiográficas de INEGI (2001) Sierra Madre Occidental (SMOCC) y Mesa del Centro (MC) para *P. chihuahuana* y Faja Volcánica Transmexicana (FVT), Sierra Madre del Sur (SMS) y la subprovincia Carso Huasteco (CH) de la Sierra Madre Oriental (SMORI) para *P. leiophylla* (figura 1).

Obtención de los datos

Se obtuvieron 4,972 registros para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*, de las cuales 2,408 registros corresponden a la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org 2019) y 2,564 del proyecto "Desarrollo de un sistema biométrico para la planeación del manejo forestal de los ecosistemas con potencial maderable en México" (SiBiFor). Se integró una base de datos de cada especie en la cual se eliminaron los registros duplicados, ubicados dentro de zonas urbanas y georreferenciados erróneamente, dejando un solo registro por cada 1 km² (~30 segundos de arco). También, se eliminaron registros con problemas de identificación y que estuvieran fuera del intervalo altitudinal de cada especie (Farjon y Styles, 1997). Los procesos de depuración y limpieza de datos fueron efectuados en la plataforma Niche ToolBox de la Comisión Na-

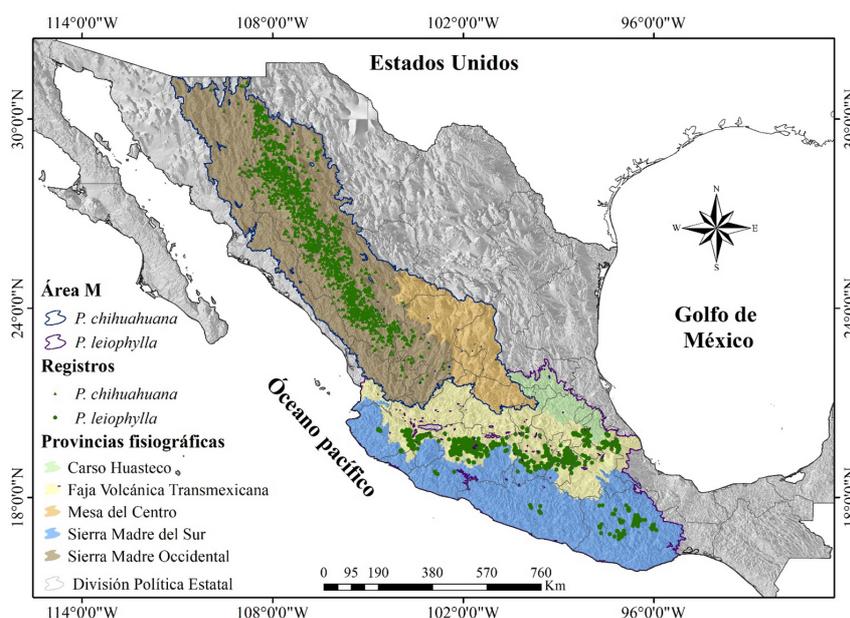


Figura 1. Área de estudio.

cional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Osorio-Olvera *et al.*, 2020) y en el programa ArcMap versión 10.5 (ESRI 2016). Posterior a ello, se obtuvo un total de 2,104 registros, de las cuales 1,387 corresponden a *P. chihuahuana* y 717 a *P. leiophylla*.

Variables ambientales. Las variables ambientales empleadas en la generación de los modelos de distribución corresponden a las 19 variables bioclimáticas disponibles para México para el periodo 1910-2009 (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014) (<http://idrisi.uaemex.mx/distribucion/superficies-climaticas-para-mexico>). Las variables tienen resolución espacial de 1 km² (~30 segundos de arco).

Las variables bioclimáticas futuras se obtuvieron de los Modelos de Circulación Global (MCG) del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL-CM3) y del Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia (CNRM-CM5). Estos modelos se descargaron del Programa de Investigaciones de CGIAR sobre el Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) (http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/).

Se optó por utilizar estos modelos, ya que presentan condiciones particulares del clima y pues son los recomendados para México por (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015). Los modelos futuros se descargaron bajo dos escenarios de trayectorias de concentración representativas de gases de efecto invernadero (RCP por sus siglas en inglés), RCP 4.5 y 8.5 para los horizontes climáticos 2050 y 2080. El RCP 4.5 representa un forzamiento radiativo de condiciones actuales similares a las proyectadas a futuro (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015). Por otra parte, el RCP 8.5 proyecta condiciones donde las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentran en constante aumento (Van Vuuren *et al.*, 2011, IPCC 2014).

Se eliminaron las variables que presentaron alta multicolinealidad con el programa R versión 4.0 (R Core Team 2020), con la finalidad de descartar las variables redundantes (correlación de Pearson de $\geq \pm 0.85$) y evitar el efecto de la colinealidad entre variables en los modelos. Dicho análisis permitió seleccionar 0 variables ambientales para *P. chihuahuana* y 10 para *P. leiophylla* de las 19 variables analizadas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas empleadas en la modelación de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

Clave	Variables bioclimáticas Unidad (en paréntesis)	Especie	
		<i>P. chihuahuana</i>	<i>P. leiophylla</i>
Bio1	Temperatura media anual (°C)	*	*
Bio2	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máx. - Temp. Mín.) (°C)	*	*
Bio3	Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (* 100) (°C)	-	*
Bio4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100) (°C)	-	*
Bio5	Temperatura máxima del mes más caliente	-	-
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	*	*
Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5 - Bio6)	-	-
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	-	-
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco	-	-
Bio10	Temperatura media del trimestre > más caliente	-	-
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío	-	-
Bio12	Precipitación total anual (mm)	*	*
Bio13	Precipitación del mes más húmedo (mm)	*	-
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)	*	-
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) (mm)	*	*
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	-	*
Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)	-	-
Bio18	Precipitación del trimestre más caliente (mm)	-	*
Alt	Altitud (m.s.n.m.)	-	-
Eda	Edafología (tipo)	*	*
Or	Orientación (%)	*	*
Pnd	Pendiente (°)	*	*
Veg	Vegetación (tipo)	*	*

* Variables utilizadas en cada especie (correlación de Pearson de $\geq \pm 0.85$).

Área de calibración y delimitación del área accesible (M)

La delimitación del área de calibración, denotada por «M» en el diagrama de «BAM», es fundamental en la modelación de nichos y distribución de especies, así como en la generación y transferencia del modelo (Soberón *et al.*, 2017) ya que se describe como el espacio donde una especie está o se asume que podría estar, con base en el conocimiento biológico y su capacidad de dispersión. La primera área M (*P. chihuahuana*) se delimitó mediante las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y Mesa del Centro y la segunda área M (*P. leiophylla*) con las provincias Faja Volcánica Transmexicana, Sierra Madre del Sur y la subprovincia Carso Huasteco (INEGI, 2001).

Generación de modelos de distribución

La modelación de la distribución potencial de cada especie se desarrolló con el programa MaxEnt versión 3.3.3 (Phillips *et al.*, 2006). Los parámetros empleados en la modelación de cada especie se describen en el Cuadro 2, se aplicó un valor máximo de 1,000 interacciones, un límite de convergencia de 0.00001 (Phillips *et al.*, 2006) y se desactivaron las opciones de “clamping” y “extrapolate”, para evitar extrapolaciones artificiales en los valores extremos de las variables bioclimáticas. Se empleó el 75 % de los registros de cada especie para entrenar los modelos y el 25 % restante para validarlos. La salida fue del tipo logística, la cual representa un índice con valores de 0 a 1, donde los valores más

próximos a 1 indican las áreas con mayor idoneidad ambiental para la especie (Phillips *et al.*, 2006). La contribución relativa (%) de las variables ambientales a los modelos de distribución se determinó mediante la prueba de Jackknife. La generación de los modelos de distribución proyectados a futuro (periodos 2050 y 2080) se efectuó al transferir los parámetros del modelo de distribución actual con el mejor ajuste y desempeño estadístico al programa MaxEnt. Posteriormente, se aplicaron los mismos criterios de evaluación y validación efectuados en los modelos actuales a los modelos futuros. Sin embargo, para este análisis se descartaron las variables tipo de vegetación y la edafología.

Validación de los modelos

La evaluación de los modelos se realizó a través de los valores del área bajo la curva (AUC), de la Curva Característica Operativa del Receptor (ROC) (Phillips *et al.*, 2006). Sin embargo, el uso del AUC como parámetro de evaluación en modelos de distribución y nicho ecológico no es suficiente, debido a que no considera datos de ausencias verdaderas, además de ponderar errores de omisión y comisión por igual, por lo tanto, fue necesario subsanar las deficiencias inherentes del AUC mediante una prueba de ROC-parcial en la plataforma Niche ToolBox (Osorio-Olvera *et al.*, 2020 <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>). Para efectuar dicho análisis se empleó el 50 % de los registros de presencia de cada especie y se aplicaron 1,000 interacciones mediante un

Cuadro 2. Parámetros empleados en la generación de los modelos de distribución de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

Modelo	Replicado interno	Modelo	Replicado interno	Regla de aplicación de umbral	Replicas
M1	Bootstrap	M6	Validación cruzada	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1000
M2	Bootstrap	M7	Validación cruzada	Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1000
M3	Bootstrap	M8	Validación cruzada	Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1000
M4	Bootstrap	M9	Validación cruzada	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1000
M5	Bootstrap	M10	Validación cruzada	Sin aplicación de regla de umbral	500

remuestreo por *Bootstrap*, un límite de confiabilidad del 95 % y un error de omisión del 5%. Finalmente, se realizó una prueba de Z con las proporciones AUC de ROC parcial.

Mapas de distribución

Las salidas de los modelos de distribución fueron reclasificadas en tres categorías de idoneidad ambiental (baja, media y alta) con intervalos iguales con ayuda de la herramienta reclass en el programa *ArcMap* versión 10.5 (ESRI, 2016). Posteriormente, se transformaron los valores continuos a binarios (apto-no apto) mediante el corte del valor de la categoría de idoneidad alta.

Zonas aptas para la conservación

Las áreas de conservación de cada especie analizada se identificaron mediante la aplicación de un intersección entre las áreas de distribución actual y las áreas proyectadas a futuro en el programa *ArcMap* versión 10.5 (ESRI 2016). Se optó por emplear los resultados de los MCG que mayor superficie reducida estimada para cada especie y periodo analizado, esto con la finalidad de identificar zonas mínimas de persistencia de nicho ecológico, las cuales pudieran ser utilizadas como zonas de conservación de cada especie evaluada (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). Acorde a lo obtenido en los resultados, se

se propusieron zonas aptas para la conservación y restauración de cada especie.

Resultados

La selección de los modelos con los mejores desempeños fueron el resultado de la combinación de los parámetros de un remuestreo por *Bootstraps*, la aplicación del umbral de igual sensibilidad y especificidad de prueba y 1.000 réplicas para *P. chihuahuana*. Para *P. leiophylla* fue a través de un remuestreo por *Bootstraps*, sin aplicación de regla de umbral y 1.000 réplicas.

Modelado de distribución potencial

De los 10 modelos generados, aquel con replicado interno por *Bootstrap* (M3B) y la aplicación del umbral de igual sensibilidad y especificidad de prueba y 1,000 réplicas fue el que presentó el mejor desempeño para *P. chihuahuana*, mientras que el modelo con replicado interno por *Bootstrap* (M5B) fue el que mejor ajuste tuvo para *P. leiophylla* (Cuadro 3). Los resultados de los modelos bajo escenarios de cambio climático que mejor desempeño presentaron para *P. chihuahuana* fueron los resultados del MCG GFDL-CM3 (RCP 4.5 y 8.5) proyectados a 2050 y 2080, mientras que para *P. leiophylla* fue el MCG GFDL-CM3 (RCP 4.5) proyectado a 2050 y MCG CNRM-CM5 (RCP 4.5) proyectado a 2080 (Cuadro 3).

Cuadro 3: Resultados estadísticos de los modelos de distribución potencial actual y futuro de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

Especie	Período	Año	Modelos	Escenarios RCP	Valor de AUC		ROC parcial	Desviación estándar	Prueba Z Valor P	
					training	test				
<i>P. chihuahuana</i>	Actual	1910-2009	M3B	-	0.847	0.846	1.764	±0.0082	<0.01	
	Futuro	2050	GFDL_CM3	4.5	0.843	0.838	1.769	±0.0081	<0.01	
				8.5	0.842	0.838	1.768	±0.0085	<0.01	
			CNRM_CM5	4.5	0.842	0.839	1.765	±0.0081	<0.01	
				8.5	0.843	0.839	1.764	±0.0084	<0.01	
		2080	GFDL_CM3	4.5	0.845	0.839	1.769	±0.0081	<0.01	
				8.5	0.844	0.838	1.769	±0.0083	<0.01	
			CNRM_CM5	4.5	0.841	0.837	1.767	±0.0081	<0.01	
				8.5	0.842	0.841	1.769	±0.0086	<0.01	
	<i>P. leiophylla</i>	Actual	1910-2009	M5B	-	0.910	0.907	1.928	±0.0082	<0.01
		Futuro	2050	GFDL_CM3	4.5	0.910	0.906	1.929	±0.0079	<0.01
					8.5	0.908	0.903	1.927	±0.0083	<0.01
CNRM_CM5				4.5	0.908	0.904	1.925	±0.0084	<0.01	
				8.5	0.909	0.905	1.930	±0.0078	<0.01	
2080			GFDL_CM3	4.5	0.909	0.903	1.928	±0.0084	<0.01	
				8.5	0.908	0.903	1.927	±0.0085	<0.01	
			CNRM_CM5	4.5	0.912	0.906	1.931	±0.0082	<0.01	
				8.5	0.908	0.903	1.929	±0.0076	<0.01	

Se estimó un área de distribución potencial actual para *P. chihuahuana* de 81,614.8 km² (Cuadro 4), con una importante presencia en los estados de Chihuahua y Durango (Figura 2). Por otra parte, el modelo para *P. leiophylla* estimó 15,105.3 km² (Cuadro 4), distribuyéndose principalmente en Jalisco, Michoacán, México, Ciudad de México, Puebla e Hidalgo (Figura 2). Los resultados bajo cambio climático indicaron que las especies estudiadas se verían afectadas negativamente en sus áreas de distribución natural (Figura 3), dicho cambio sería más notorio en el escenario RCP 8.5 para ambos horizontes (Cuadro 4).

resultados del MCG GFDL-CM3 proyectaron reducciones de 3,142.7 a 6,027.2 km² para el 2050 y de 5,504.1 a 6,165.2 km² para el 2080 (Figura 3A). En el caso de *P. leiophylla* los modelos proyectaron reducciones de 555.1 a 1,961.8 km² en las áreas de distribución de esta especie para el 2050 y de 2,700.6 a 1,688.5 km² para 2080 (MCG CNRM-CM5) (Figura 3B).

VARIABLES AMBIENTALES RELEVANTES

De acuerdo con la prueba de Jackknife, las variables con mayor contribución relativa (%) en el periodo actual para *P. chihuahuana* fueron la temperatura

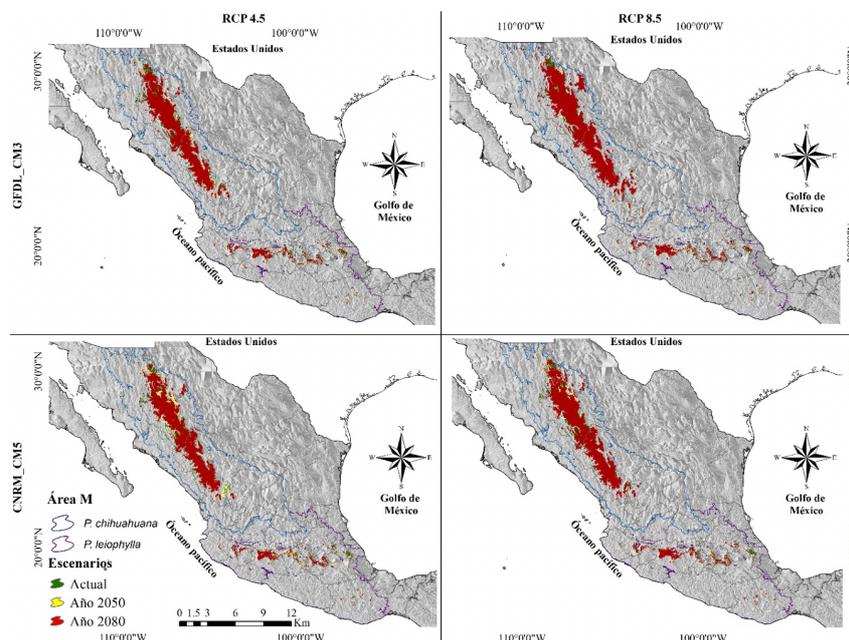


Figura 2. Distribución potencial actual de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* para 2050 y 2080 bajo dos escenarios de cambio climático: moderado (RCP 4.5) y pesimista (RCP 8.5).

Las proyecciones de los MCG CNRM-CM5 y GFDL-CM3 estimaron una reducción en las áreas de distribución de ambas especies a partir del año 2080; los cambios más notables se apreciaron en *P. leiophylla*, con una reducción estimada en el escenario RCP 4.5 de hasta el 17.88 %. Para el caso de *P. chihuahuana* se observó una reducción en sus áreas de distribución en el escenario RCP 8.5, respectivamente (Figura 3). Así mismo, se observó una ligera disminución en las áreas de distribución de *P. chihuahuana* en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (MCG CNRM-CM5) durante el periodo 2050 y 2080, mientras que

media anual (Bio1) con una contribución de (44.3 %) con requerimiento fundamental de 8 a 17 °C para el desarrollo de la especie, seguido de la temperatura mínima del mes más frío (Bio6) con 29.5 %, la precipitación del mes más húmedo (Bio13) con (9.1 %) con un requerimiento óptimo de 293 mm durante todo el año y la precipitación del trimestre más frío (Bio19) con (8.7 %) con requerimiento deseable de -6 a 5 °C (Figura 4A y 4B). Para el caso de *P. leiophylla* la temperatura media anual (Bio1) tuvo una contribución de (52.9 %) con requerimientos de temperatura que varíen entre los 9 a 21 °C y precipitaciones de 1,068 mm durante todo el año, seguido del tipo de vegetación

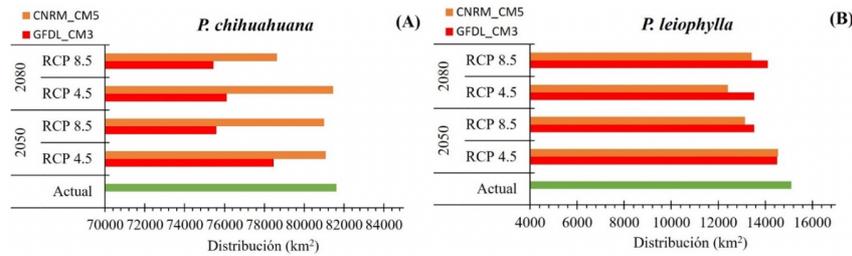


Figura 3. Estimaciones de las áreas de distribución actuales y futuras para *P. chihuahuana* (A) y *P. leiophylla* (B).

con (20.2 %), por lo tanto, la vegetación es relevante en su distribución actualmente, debido a la coexistencia natural de bosques de coníferas, bosques de pino-encino y bosques mixtos, mientras que el tipo de suelo contribuyó con (9.6 %) creciendo en suelos Regosoles, Andosoles y Cambisoles, preferentemente limosos a arenosos y moderadamente ácidos, con abundante materia orgánica (Figuras 4C y 4D).

Con respecto a la contribución de las variables del periodo futuro para *P. chihuahuana* fue la temperatura media anual (Bio1), seguida de la precipitación del trimestre más frío (Bio19) y la precipitación del mes más húmedo (Bio13) en ambos MCG. Sin embargo, para *P. leiophylla* las variables con mayor contribución fue la temperatura media anual (Bio1), seguido de la

precipitación total anual Bio12, y la estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100) Bio4 en ambos MCG. Por lo tanto, se proyecta que para el 2050 las condiciones de habitat de *P. chihuahuana* cambien en temperatura promedio anual a valores de 13.7 a 19.37 °C, con precipitaciones del mes más húmedo de 250 mm y precipitaciones durante el trimestre más frío de 159 mm. Mientras que para *P. leiophylla* a futuro serían de temperaturas que varíen de 11.79 a 19.55 °C. Hacia 2080 se proyecta que para *P. chihuahuana* la temperatura promedio anual cambie a valores de 16.92 a 21.51 °C, con precipitaciones del mes más húmedo de 226 mm y precipitaciones durante el trimestre más frío de 152 mm. Por otra parte, los requerimientos de *P. leiophylla* a futuro serían

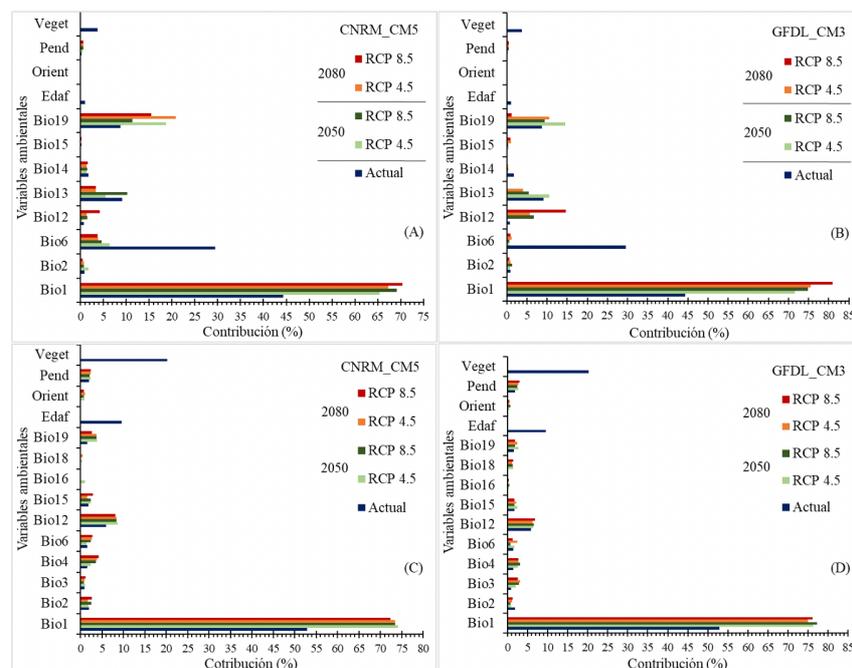


Figura 4. Contribución de las variables en ambos periodos analizados para *P. chihuahuana* (A) MCG CNRM_CM5, (B) MCG GFDL_CM3 y *P. leiophylla* (C) MCG CNRM_CM5 y (D) MCG GFDL_CM3.

de temperaturas que varíen de 15.2 a 23.8 °C.

Zonas aptas para la conservación

Las superficies estimadas con las condiciones ambientales idóneas en el futuro para que *P. chihuahuana* prevalezca, fueron 97.02% para 2050 y de 93.35% para 2080 al considerar el MCG GFDL-CM3 con un RCP 8.5; estas áreas se localizan en los estados de Chihuahua (37,278.6 km²) y Durango (36,611.3 km²) (Figura 5). Mientras que para *P. leiophylla* las áreas estimadas para su conservación fueron del 73.64% para 2050 mediante el MCG CNRM-CM5 RCP 8.5 y de 69.62 % para 2080 con el MCG CNRM-CM5 RCP 4.5; estas se localizan en los estados de Michoacán (5349.7 km²), México (1585.5 km²), Jalisco (1291.1 km²) y Ciudad de México (510 km²) (Figura 5).

Investigaciones sobre modelos de distribución de especies bajo escenarios de cambio climático indican una tendencia general hacia una reducción importante en la superficie de distribución a futuro en las especies de la familia Pinaceae en México (Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016, Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). Los resultados en las proyecciones bajo escenarios de cambio climático revelaron tendencia hacia una reducción en su distribución potencial en ambas especies. Por otra parte, el MCG GFDL-CM3 estimó una reducción de 3,142.7 a 6,027.2 km² en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 para el 2050 y de 5,504.1 a 6,165.2 km² para el 2080 en las áreas de distribución de *P. chihuahuana*; resultados que concuerdan con lo reportado para especies de la familia Pinaceae en México (Sáenz-Romero *et al.*, 2015, Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016, Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). Mientras que los resultados

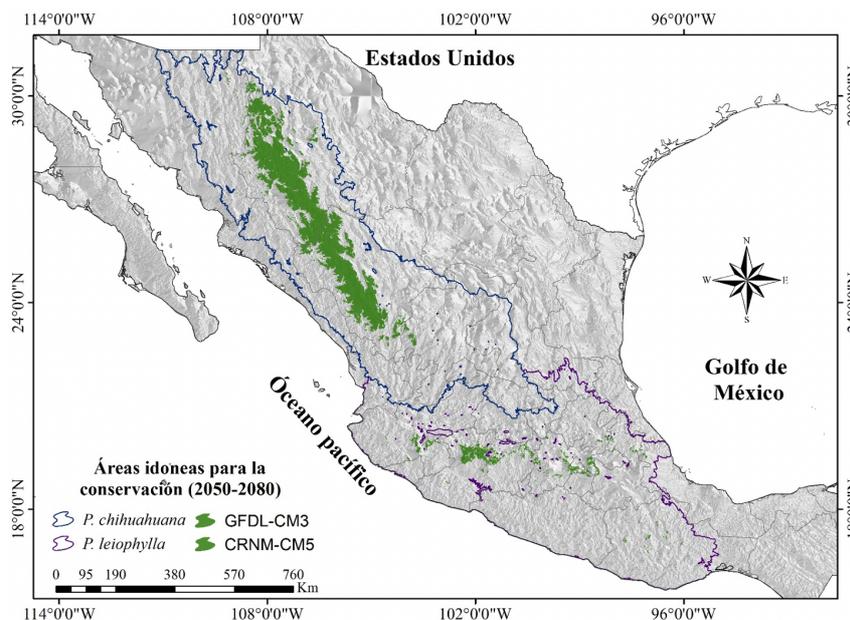


Figura 5. Áreas aptas para la conservación in situ de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México.

Discusión

Modelado de distribución potencial

Los resultados del AUC obtenidos para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* fueron mayores a 0.8 y 0.9 respectivamente, lo que indica que el desempeño de los modelos fue de bueno a excelente (Coitiño *et al.*, 2013). Las pruebas de Roc parcial (>1.7) y Z ($p < 0.01$) respaldaron estos resultados al presentar un desempeño excelente (Peterson *et al.*, 2011).

de los MCG (CNRM-CM5) obtenidos para *P. leiophylla* indicaron una ligera tendencia hacia la disminución de sus áreas de distribución en los escenarios RCP 4.5. y 8.5 para el 2050 y 2080, lo cual concuerda con lo reportado por la literatura para las especies de pino del centro de México (Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

Variables ambientales relevantes

Se prevé que una combinación de altas temperatu-

ras y una disminución en los regímenes de precipitación serán la principal causa en la reducción de la distribución de *P. leiophylla*, dicha combinación, haría más vulnerable a la especie a los incendios forestales y al ataque de plagas y enfermedades (Ibarra y Huerta 2016). Debido al calentamiento global, se están registrando modificaciones en la distribución actual de las especies del mundo, las cuales tendrían que desplazarse altitudinalmente para subsistir (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Por lo que, la subsistencia de *P. leiophylla* ante el cambio climático estaría condicionada a su capacidad de resiliencia.

Zonas aptas para la conservación

Los estudios realizados referentes a las zonas aptas para la conservación indican que las especies tienden a conservar su nicho ecológico, y proporcionan información relevante sobre el entorno donde habitan. Sin embargo, este tipo de estudios son escasos para las coníferas mexicanas y apenas comienza a ser estudiado en el país. Autores como Martínez-Méndez *et al.*, (2016) mencionaron sin probar dicha hipótesis, que el nicho ecológico de los taxa del género *Abies* reconocidas para México, han permanecido estables a través del tiempo. A su vez Manzanilla-Quñones *et al.* (2019) encontraron que el nicho ecológico de *Abies religiosa* [Kuth] Schldl & Cham ha cambiado muy poco (persistencia del nicho ecológico > 95%) desde hace \pm 6,000 años (Holoceno medio), permaneciendo estable hasta la fecha, hacia las partes altas y húmedas de la Faja Volcánica Transmexicana. Proyecciones de escenarios de cambio climático realizadas a 2050 por Martínez-Sifuentes *et al.* (2020) reportan áreas de conservación de nicho ecológico del 75.6% en *Pinus greggii* Engelm., donde el estado de Hidalgo fue una de las áreas identificadas de mayor conservación en el futuro.

Los resultados obtenidos en este estudio estimaron una superficie 97.02% a 69.62% de conservación de nicho para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* respectivamente, los cuales son ligeramente menores a los hallados por Manzanilla-Quñones *et al.* (2019) y Martínez-Sifuentes *et al.* (2020) en *A. religiosa* y *P. greggii*. De acuerdo con el análisis de la interacción de las variables relevantes en la distribución actual y futura fue posible delimitar una zona de conserva-

ción para *P. chihuahuana*, localizada de manera continua a través de los estados de Chihuahua y Durango. Mientras que para *P. leiophylla* se identificaron algunas zonas en el estado de Michoacán.

Aunque *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* no se encuentran dentro de alguna categoría de riesgo, no quiere decir que estén exentos de actividades antropogénicas, como el aprovechamiento excesivo, el cambio del uso del suelo y la tala clandestina. Por lo que, el presente estudio propone zonas idóneas que podrían ser destinadas a la conservación in situ de *P. chihuahuana*, localizadas en Chihuahua y Durango, y para *P. leiophylla* en Michoacán, donde sus condiciones ambientales persistirían en el futuro. Por último, conforme a los objetivos planteados en el presente estudio, se logró delimitar y estimar la distribución natural actual de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* en México, así también se analizaron las variables ambientales relevantes que moldean la distribución de ambas especies, y a partir del análisis de distribución se proponen áreas de conservación para *P. chihuahuana* y *P. leiophylla*, en las cuales no comprometen la subsistencia de las especies, ya que estarían bajo condiciones ambientales actuales-futuras similares.

Conclusiones

Se acepta la hipótesis planteada, puesto que el análisis espacial de los modelos actuales y futuros permitió identificar áreas potencialmente aptas para actividades de conservación in situ de las especies tratadas a través del tiempo. A partir del análisis de las variables ambientales se observa que *P. chihuahuana* requiere de una estable temperatura media anual, con abundantes precipitaciones durante el trimestre más frío (diciembre, enero y febrero) y el mes más húmedo (septiembre), las cuales son fundamentales para desarrollo y subsistencia de la misma. Mientras que *P. leiophylla* requiere de una constante temperatura promedio anual. El análisis de conservación permitió identificar zonas que en el futuro presentarán condiciones ambientales similares, ideales para la subsistencia de *P. chihuahuana* y *P. leiophylla* y las cuales se dividen en norte (Chihuahua y Durango) y centro (Michoacán). Dichas zonas resultan potencialmente aptas para fines de conservación forestal.

Literatura citada

- Coitiño, H., Montenegro, F., Fallabrino, A., González, E. y 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(1), 23-34. DOI:10.553/020.014.0104
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F. y López-Sandoval, J. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135-148. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027
- Cuervo Robayo, A., Téllez Valdés, O., Gómez Albores, M., Venegas Barrera, C., Manjarrez, J. y Martínez Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International journal of climatology*, 34(7), 2427-2437. DOI: 10.1002/joc.3848
- Davis, M. y Shaw, R. (2001). Range shifts and adaptive response to Quaternary climate change. *Science*, 292, 673-679. DOI: 10.1126 / science.292.5517.673
- Environmental Scientific Research Institute. (2016). ArcGIS 10.5. Software diseñado para análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica. Redlands, California, USA.
- Farjon, A. y Styles, B. (1997). *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph* 75. New York Botanical Garden, New York.
- Fernández, A., Zavala, J., Romero, R., Conde, A. y Trejo, I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. Mexico D.F.: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. DOI: 10.7818/ecos.2016.25-1.20
- Global Biodiversity Information Facilit. (2020). Bases de datos geográficos disponibles para *Pinus chihuahuana* Engelm. y *Pinus leiophylla* Schltld. & Cham en México. Recuperado de <http://www.gbif.org>
- Ibarra, M. y Huerta, M. (2016). Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 39-50. DOI: 10.29298/rmcf.v7i37.50
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2001). Provincias fisiográficas. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html#Descargas>.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2016). *Modelo Digital de Elevación. Aguascalientes. México*. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionmex/index.jsp>
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2014). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2018). Global Warming of 1.5°C. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Manzanilla-Quijada, G., Treviño-Garza, E., Vargas-Larreta, E., López-Martínez, J. y Mata-Balderas, J. (2020). Ideal areas with potential for the production of *Pinus chihuahuana* Engelm. and *Pinus leiophylla* Schltld. & Cham. in Mexico. *Botanical Sciences*, 98(2), 305-316. DOI: 10.17129/botsci.2514
- Manzanilla-Quiñones, U., Martínez-Adriano, C. y Aguirre-Calderón, O. (2019). Modelado espacial histórico y actual del oyamel (*Abies religiosa* [Kuth] Schltld. & Cham.) en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 201-217. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2018.10.0706

- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, E. y Jaramillo-Correa, J. (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: 10.17129/botsci.508
- Martínez-Sifuentes, A., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J. y Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(5), 426-434. DOI: 10.3832/ifor3491-013
- Osorio-Olvera, L., Lira-Noriega A., Soberón J., Peterson A. T., Falconi M., Contreras-Díaz, R., Barve, V. y Barve, N. (2020). ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*. DOI: 10.1111/2041-210X.13452
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araujo, M. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton: Princeton University Press.
- Phillips, S., Anderson, R. y Schaphire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- R Core Team. (2020). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. Versión 4.0. Consultado 02 de abr. 2020. Recuperado de <http://www.r-project.org>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Crookston, N., Pierre, D., St-Amant, R., Beaulieu, J. y Richardson, B. (2010). Contemporary and projected Spline Climate surfaces for Mexico and their use in understanding Climate-plant relationships. *Climatic Change*, 102(3-4), 595-623. DOI: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G., Ortega-Rodríguez, J., Marín-Togo, M. y Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* hábitat adecuado para 1961-1990 y el clima futuro. *Botanical Sciences* 93, 709-718. DOI: 10.17129/botsci.86
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A. y Hibbard, K (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z