



# Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático

Actual and potential distribution of *Pinus engelmannii* Carrière under  
climate change scenarios

Miguel Ángel Jiménez Salazar<sup>1</sup> y Jorge Méndez González<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Consultor forestal. Zapopan, Jalisco, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.  
Departamento Forestal. Saltillo, Coahuila, México.

\* Autor de correspondencia. jmendezg@hotmail.com

## RESUMEN

Los modelos de nicho ecológico (MNE) son una herramienta para conocer el impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies. El objetivo de este estudio fue generar MNE para predecir la distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière. Los modelos se crearon en 'kuenm', un paquete de R que usa como algoritmo a Maxent. Se utilizaron 346 registros de presencia de la especie cuidadosamente depurados, 15 variables bioclimáticas y proyecciones climáticas de cuatro modelos de circulación general (MCGs) al 2050, bajo dos trayectorias de concentración representativas (RCPs) 4.5 y 8.5. Los MNE fueron evaluados acorde con su significancia estadística, ROC parcial, tasa de omisión (<5%), AIC y respuesta de la variable. Se generaron 1827 modelos candidatos, el que mejor desempeño mostró fue de tipo cuadrático. Bio 1 [temperatura media anual (°C)] y Bio 17 [precipitación de ¼ anual más seco (mm)], son las variables que mejor predicen la distribución de *P. engelmannii*, contribuyendo al modelo con 75.6% y 6.3%. Las áreas de idoneidad alta para esta especie ocurren de forma discontinua en Chihuahua (29 090 km<sup>2</sup>) y Durango (9310 km<sup>2</sup>), sus preferencias son entre 9 °C y 12 °C (Bio 1). Al parecer esta especie no es susceptible al cambio en el clima, pues al transferir el modelo y a pesar de un incremento de casi 2 °C (Bio 1) al 2050 en su distribución actual, no se predicen nuevas áreas idóneas, pero tampoco se pierden las existentes.

PALABRAS CLAVE: idoneidad, Maxent, modelos climáticos, MOP, nicho ecológico.

## ABSTRACT

Ecological niche models (ENMs) are a tool to understand the impact of climate change on the distribution of species. The objective of this study was to generate ENMs to predict the current and potential distribution of *Pinus engelmannii* Carrière. The models were created in 'kuenm', an R package that uses Maxent as modelling algorithm. We used 364 meticulously cleaned species occurrence records, 15 bioclimatic variables, and climatic projections from four General Circulation Models (CGMs) to 2050, under two Representative Concentration Pathways (RCPs) 4.5 and 8.5. The ENMs were evaluated according to their statistical significance, partial ROC, omission rate (<5%), AIC, and response of the variable. A total of 1827 candidate ENMs were generated, the one that showed the best performance was of quadratic type. Bio 1 [Average annual temperature (°C)] and Bio 17 [Precipitation of ¼ driest annual (mm)], are the variables that best predict the distribution of *P. engelmannii*, contributing to the model with 75.6% and 6.3%. The areas of high suitability for this species occur discontinuously in Chihuahua (29 090 km<sup>2</sup>) and Durango (9310 km<sup>2</sup>) states; their preferences are between 9 °C and 12 °C (Bio 1). Apparently, this species is not susceptible to climate change, because when transferring the model and despite an increase of almost 2 °C (Bio 1) to the year 2050 in its current distribution, no new suitable areas are predicted, but neither the existing ones are lost.

KEYWORDS: suitability, Maxent, climatic models, MOP, ecological niche.

## INTRODUCCIÓN

El incremento de temperatura global a consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, es cada vez más alto, se espera que para el siglo XXI sea de entre 1.7 °C y 4.8 °C (IPCC, 2014). Algunos autores predicen que para el 2030 la temperatura será de 1.5 °C más (Sáenz-Romero *et al.*, 2010) y se estima que para que no se rebase este umbral, las emisiones deberían reducirse en al menos 25% para ese año (Allen *et al.*, 2018).

Con el aumento de temperatura, se modifica el sistema climático afectando tanto a la población humana como a la biodiversidad de flora y la fauna de todo el mundo; entre los problemas más notables están la migración de especies vegetales hacia nuevas áreas (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Allen, 2018), otras especies modificarán su intervalo altitudinal (Lenoir, Gégout, Marquet, De Ruffray y Brisse, 2008) mientras que otras, aumentarán su área de distribución (Cruz-Cárdenas, López, Silva, Bernal, Estrada y López, 2016).

Se ha demostrado a través el diagrama «BAM» que la distribución de las especies depende de varios factores (Soberón y Nakamura, 2009): i) deben existir las condiciones abióticas necesarias («A»), ii) condiciones bióticas favorables («B») y iii) hayan estado accesibles a la dispersión de la especie desde la región de su origen histórico («M»). Actualmente existen diferentes algoritmos para modelar la distribución de especies destacando BIOCLIM (Busby, 1991), GARP (Stockwell y Peters, 1999) y Maxent (Phillips, Dudík y Schapire, 2004), etc., considerado este último como uno de los mejores predictores de la idoneidad de las especies (Elith *et al.*, 2006; Phillips, Anderson y Schapire, 2006).

Los bosques contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático al almacenar el CO<sub>2</sub> atmosférico a través del proceso de la fotosíntesis (Alberto, 2010), en México estos cubren aproximadamente 17% del territorio nacional, equivalente a 10 millones de hectáreas (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2008), sin embargo, las especies de estos ecosistemas también son susceptibles al cambio

climático (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). *Pinus engelmannii* Carrière, una especie de gran importancia comercial en el país (Bustamante-García, Prieto-Ruíz, Merlín-Bermudes, Álvarez-Zagoya, Carrillo-Parra y Hernández-Díaz, 2012), es característica de las zonas montañosas de México y se distribuye en la Sierra Madre Occidental (SMOc) (Martínez, 1948) y en algunas poblaciones aisladas al sureste de Arizona y Nuevo México (Farjón, Pérez y Styles, 1997).

Los modelos de nicho ecológico son una herramienta importante para evaluar la respuesta de las especies al cambio climático (Soberón y Nakamura, 2009; Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Así mismo, se han optimizado los parámetros de los algoritmos de modelación y con ello, las predicciones son cada vez mejor (Cobos, Townsend, Barve y Osorio, 2019), se están actualizando los modelos de circulación general (MCGs) (Karger *et al.*, 2017) permitiendo predecir la distribución futura de las especies bajo diferentes niveles de concentración de CO<sub>2</sub> (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016), no obstante, la distribución futura de las especies a causa del incremento de temperatura por el cambio en el clima, es incierta y debe ser cuantificada a nivel especie.

## OBJETIVOS

i) Modelar la distribución actual y potencial de *P. engelmannii* Carrière, usando variables bioclimáticas, cuatro MCGs: HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4 y CNRM-CM5, en dos trayectorias de concentración representativas (RCPs) 4.5 y 8.5 al año 2050; ii) conocer las variables climáticas que mayor influencia poseen sobre la distribución de la especie; y iii) determinar nuevas áreas idóneas y áreas de alto impacto (áreas idóneas más vulnerables al cambio climático) de *P. engelmannii*. La hipótesis es que las áreas idóneas actuales de *P. engelmannii* podrían ser afectadas en los próximos años, debido al cambio climático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio y especie

El estudio consideró el área de distribución de *P. engelmannii*, la cual se sitúa en la Sierra Madre Occidental; ahí, las



temperaturas promedio varían entre 13 °C y 28 °C (García, 1998) y la precipitación varía entre 500 mm y 800 mm anuales (Descroix, González y Estrada, 2004). En México esta especie se encuentra en altitudes que van desde 1200 m a 3000 m s.n.m (Martínez, 1948, Farjón *et al.*, 1997) y puede desarrollarse en suelos profundos (Perry, 1991; González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González y López-Enríquez, 2012). Se le conoce como ‘pino real’ (Martínez, 1948) y es la única especie en la SMOc con fascículos muy largos y hojas muy gruesas (Farjón *et al.*, 1997).

### Variables bioclimáticas y modelos de circulación general

Para modelar la distribución actual de la especie se utilizaron 15 variables bioclimáticas (Tabla 1), obtenidas de: <http://chelsea-climate.org/downloads> (Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas), son cubiertas geográficas del periodo actual (1979-2013) en formato raster de 1 km<sup>2</sup> de resolución (Karger *et al.*, 2017) y re muestreadas a 5 km<sup>2</sup> para este análisis; estos autores han demostrado que con estas variables se predice mejor que modelar con variables de WorldClim. Para modelar la distribución futura (2050), se utilizaron las mismas variables bioclimáticas, de cuatro modelos de circulación general: HadGEM2-AO (Martin *et al.*, 2011), CSIRO-MK3-6-0 (Collier *et al.*, 2011), CCSM4 (Gent *et al.*, 2011) y CNRM-CM5 (Voltaire *et al.*, 2013), utilizando los RCPs 4.5 y 8.5, para el periodo 2041-2061. Aquí, se omitieron las variables Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 por combinar información de precipitación y temperatura en la misma capa (Escobar, Lira-Noriega, Medina-Vogel y Townsend, 2014), por lo que su uso en modelos de nicho trae consigo predicciones erróneas.

### Obtención de registros y limpieza

Los registros de presencia de la especie fueron obtenidos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS, 2009), Naturalista, Artículos Científicos y Tesis y de la Red Mundial de Información Sobre Biodiversidad (REMIB),

Conabio, estos fueron depurados, eliminando duplicados, fuera del área de distribución en altitud, latitud y longitud, siguiendo la propuesta por algunos autores (Méndez, Méndez, Mendieta, López y Nájera, 2021). Registros atípicos o ‘outliers’ fueron identificados y eliminados realizando el espacio ambiental con Bio 1 y Bio 12 (Owens *et al.*, 2013) y a través de Análisis de Componentes Principales (ACP), usando 15 variables bioclimáticas (estandarizadas), descartando aquellos fuera de la elipse de 99%, para después eliminar otros registros por autocorrelación a través del paquete SpThin aplicando una distancia de 5 km (Aiello-Lammens, Boria, Radosavljevic, Vilela y Anderson, 2015).

### Área de calibración (M)

La delimitación del área de estudio, «M» del diagrama BAM es importante para la calibración del modelo y en lo sucesivo, para transferirlo a nuevas áreas y tiempos (Soberón, Osorio-Olvera y Peterson, 2017), esta se generó aplicando un búfer de 70 km de radio a cada registro y su delineación final fue después de pasar el proceso de depuración de los registros y eliminación de ‘outliers’, incluyendo todos los registros, antes del proceso de autocorrelación para captar toda la variabilidad climática de la especie.

### Selección de variables bioclimáticas

La selección de variables predictivas, se basó en los siguientes criterios: 1) las de mayor contribución acorde a la prueba de jackknife, haciendo una modelación preliminar (Ávila, Villavicencio y Ruiz, 2014; García-Aranda, Méndez-González y Hernández-Arizmendi, 2018; Aceves-Rangel, Méndez, García y Nájera *et al.*, 2018), 2) las de mayor contribución relativa obtenida de un ACP realizado según lo propuesto por Méndez *et al.* (2021), 3) de acuerdo con la biología de la especie, 4) no correlacionadas ( $r \leq 0.8$ ) (Elith *et al.*, 2006; Cruz-Cárdenas, Villaseñor, López-Mata, Martínez-Meyer y Ortiz, 2014; Martínez-Méndez Aguirre-Planter, Eguiarte y Jaramillo-Correa, 2016), 5) que tuvieran una distribución normal o sesgada (Méndez *et al.*, 2021) y 6) por el tipo de respuesta de la variable bioclimática. De esta

selección preliminar, se organizaron tres grupos (sets) con diferentes variables bioclimáticas, utilizados para calibrar el modelo para predecir la distribución de *P. engelmannii* (Cobos *et al.*, 2019).

### Calibración, generación, validación y transferencia

La calibración, creación, evaluación y transferencia del modelo se realizó en R, utilizando el paquete 'kuenm' (Cobos *et al.*, 2019). Se evaluaron 21 multiplicadores de regularización, 29 tipos de respuesta y tres grupos de variables ambientales, en tres modalidades: extrapolación libre (EL), extrapolación clamping (EC) y no extrapolación (NE). El formato de salida fue de tipo logístico, donde los modelos resultantes (mapas en formato raster) representan valores de idoneidad (0-1) de la especie (Phillips *et al.*, 2006). Los modelos generados fueron evaluados a través de su significancia estadística, ROC parcial (curvas operadas por el receptor), tasa de omisión, criterio de información Aikake o complejidad del modelo (AICc) (Phillips *et al.*, 2006) y pruebas jackknife (Cobos *et al.*, 2019). Se empleó ROC parcial para determinar el ajuste del modelo, descartando el estadístico AUC (Area Under Curve) ya que no predice en todo el espectro de área predicha presente de la curva ROC (Peterson, Papeş y Soberón, 2008). El riesgo de extrapolación (transferencia) se evaluó a través de MOP (Mobility- Oriented Parity) que identifica zonas de extrapolación estricta (Owens *et al.*, 2013).

Los mapas de idoneidad actual se estratificaron en alta, media y baja, utilizando cuantiles relativos (Instituto Nacional de Estadística Geografía en Informática [Inegi], 2010). Los modelos al futuro se promediaron y binarizaron al umbral de 10 percentil y a través de álgebra de rasters se identificaron: i) nuevas áreas idóneas, NA (áreas idóneas en el futuro, pero que no existen actualmente), ii) áreas de alto impacto, AAI (áreas idóneas que existen actualmente pero que podrían no serlo en el futuro), y iii) áreas de bajo impacto, ABI (áreas idóneas que existen actualmente y en el futuro). Todo este proceso metodológico, desde la descarga de los registros hasta la validación de la transferencia del modelo, se ilustra en la figura 1.

## RESULTADOS

### El modelo de nicho de *Pinus engelmannii* Carrière

De un total de 507 registros de *P. engelmannii*, resultaron útiles solo 346 (68.2%), 241 para modelación y 105 (independientes) para evaluación. Se generaron 1827 modelos candidatos, el modelo seleccionado fue de un regularizador de 3.5, quadratic + threshold (qt), con ROC parcial de 1.3, tasa de omisión de 0.05% y AICc de 3107. Las variables que mejor predicen la distribución actual de *P. engelmannii* son: Bio 1 [temperatura media anual (°C)] y Bio 17 [precipitación de 1/4 anual más seco (mm)], contribuyendo al modelo con 75.6% y 6.3%. El resto, Bio 16, 15 y 5 representaron solo 18.1% de la contribución.

Según el espacio ambiental construido con Bio 5, 6 y 12 (Fig. 2), los registros de *P. engelmannii* se distribuyen de 20 °C a 37 °C (Bio 5, temperatura máxima), de -3.6 °C a 15 °C (Bio 6, temperatura mínima) y de 313 mm a 1682 mm (Bio 12, precipitación); el elipsoide (nicho fundamental) se inclina ligeramente sobre Bio 6, revelando que la especie prefiere climas semisecos y fríos (Fig. 2), ocupando una pequeña porción del espacio ambiental y pocos de los múltiples climas existentes en el país (círculos verdes).

### Distribución actual de *Pinus engelmannii* Carrière

En el área de calibración «M», los tres tipos de modelación (EL, EC y NE) predicen idoneidad similar de *P. engelmannii*, solo se presenta la modalidad NE (Fig. 3a). La incertidumbre del modelo representada aquí por el Coeficiente de Variación, es baja en las áreas de alta idoneidad (Fig. 3b). La idoneidad alta de *P. engelmannii* ocurre de forma discontinua en Chihuahua (29 090 km<sup>2</sup>), Durango (9310 km<sup>2</sup>) y Sonora (2080 km<sup>2</sup>) y representa 12.82% total del «M», esta 'discontinuidad' podría indicar una fragmentación del hábitat más que una posible dispersión (migración) de la especie hacia nuevas áreas (Saltré, Duputié, Gaucherel y Chuine, 2014) por efectos del aprovechamiento inadecuado o del cambio climático. El estrato con idoneidad media (51 080 km<sup>2</sup>) constituye 15.75% de «M» y el bajo (231 570 km<sup>2</sup>) 71.42%.



TABLA 1. Variables bioclimáticas empleadas para generar modelos de nicho ecológico para modelar la distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière.

Variable	Descripción
Bio 1	Temperatura media anual (°C)
Bio 2	Intervalo medio diario (Media por mes [Temp. Max -Temp. Min])
Bio 3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100)
Bio 4	Temporalidad de la temperatura (desviación)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio 7	Intervalo de temperatura anual (Bio5-Bio6)
Bio 10	Temperatura media del 1/4 más cálido (°C)
Bio 11	Temperatura media del 1/4 más frío (°C)
Bio 12	Precipitación anual (mm)
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Bio 14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio 15	Temporalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)
Bio 16	Precipitación del 1/4 anual más húmedo (mm)
Bio 17	Precipitación del 1/4 anual más seco (mm)

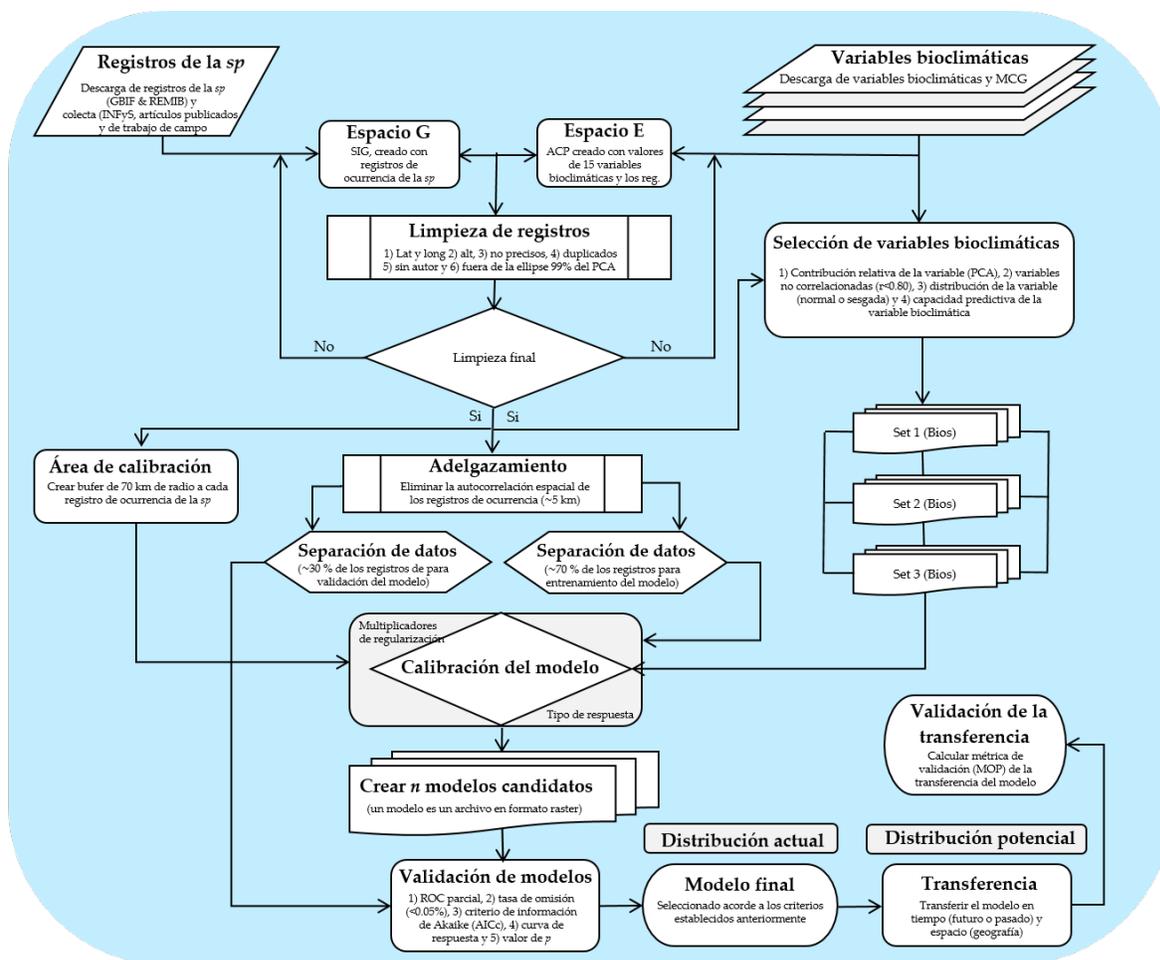


FIGURA 1. Esquema general de pasos y procedimientos para la generación, validación, transferencia de modelos de nicho ecológico. (modificado de Méndez et al., 2021).

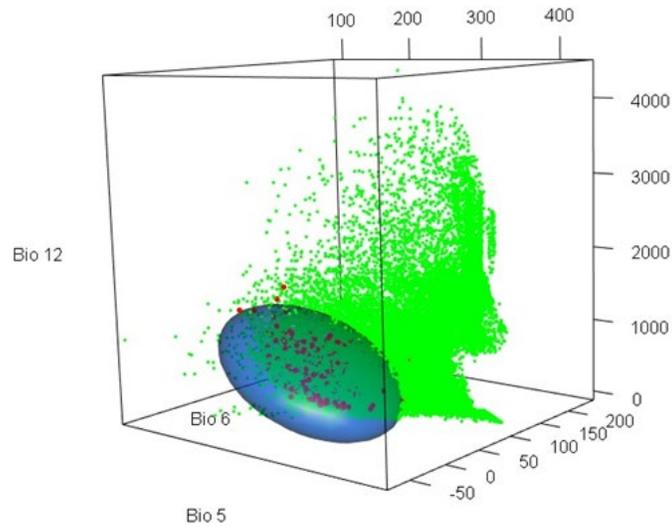


FIGURA 2. Espacio ambiental indicando el nicho fundamental (elipsoide al 99%) de *Pinus engelmannii* Carrière, elaborado con Bio 5, Bio 6 y Bio 12, utilizando 346 registros y 50 000 puntos de *background* distribuidos en todo México. Puntos rojos representan los registros de la especie y puntos verdes indican valores de las Bios; es decir, los climas del país).

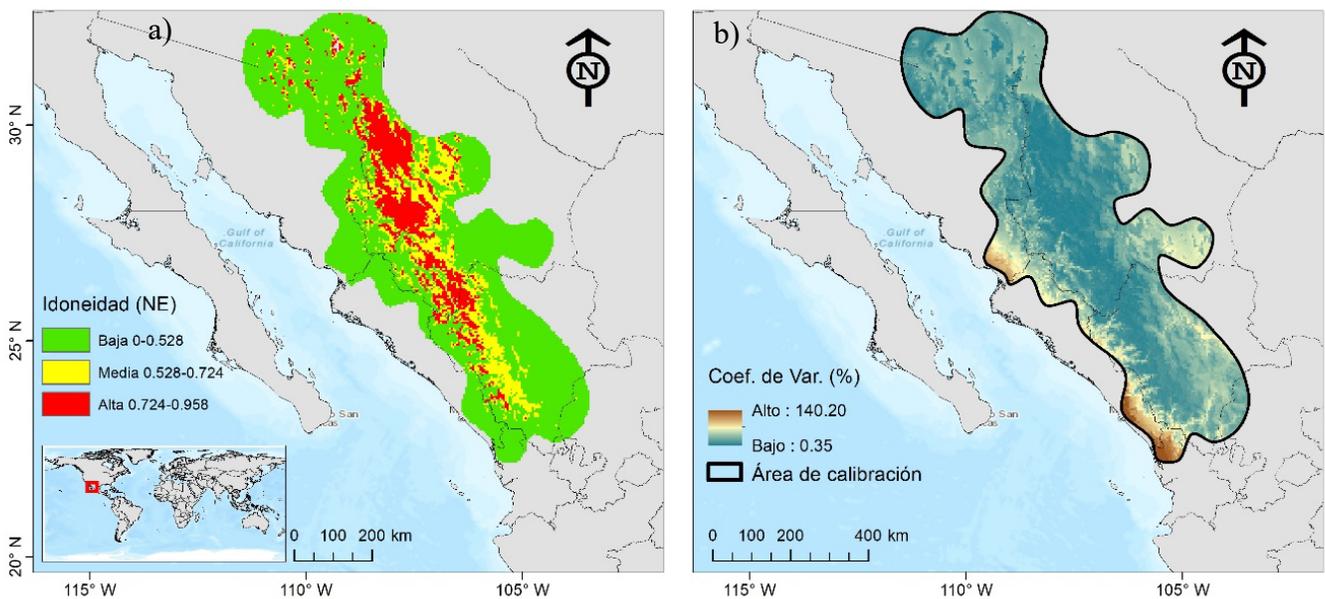


FIGURA 3. Modelo de idoneidad actual de *Pinus engelmannii* Carrière, modalidad sin extrapolación, estratificada en alta, media y baja (a), e incertidumbre del modelo, expresada a través del coeficiente de variación (b).



## Transferencia del modelo y el riesgo de extrapolación

El análisis de resultados demostró que al transferir el modelo de nicho de *P. engelmannii* al 2050, las áreas idóneas predichas para la especie (Fig. 4b-4c), son similares en extensión a la distribución actual (Fig. 4a), independientemente, si el escenario de emisiones de CO<sub>2</sub> es bajo, RCP 4.5 (Fig. 4b) o alto, RCP 8.5 (Fig. 4c). Sin embargo; no es posible sugerir las áreas predichas si el riesgo de transferencia del modelo no es evaluado (Owens *et al.*, 2013). Por ejemplo, el modelo (elegido de entre 1827 candidatos por su mejor desempeño) predice una extrapolación irrazonable de áreas de idoneidad al modelar con EL y EC (resultados no presentados) que al no extrapolar (Fig. 4a-4c), por lo que es crucial probar las diferentes modalidades de transferencia de un modelo para elegir la adecuada.

En este trabajo se eligió la modalidad no extrapolación (Fig. 4a-4c), por presentar predicciones razonables. El análisis del riesgo de transferencia del modelo indicó similitud ambiental entre las áreas idóneas actuales predichas dentro del área de calibración y las áreas idóneas estimadas al 2050 (Fig. 4d-4f). Las grandes regiones idóneas predichas en las modalidades EL y EC (mapas no mostrados aquí), el MOP las clasificó a como extrapolación estricta; es decir, no todas las áreas idóneas predichas por un modelo de nicho son adecuadas para la especie.

## Distribución potencial de *Pinus engelmannii* Carrière

Una vez validada la transferencia del modelo, se observa que dentro del área de calibración (Fig. 5), independientemente de si las emisiones de CO<sub>2</sub> al 2050 sean altas (RCP 8.5) o bajas (RCP 4.5) no se predicen nuevas áreas idóneas para la especie, pero tampoco se pierden las áreas idóneas existentes (Fig. 5a y 5b). Fuera de «M», (pero dentro del país) el modelo de nicho predice, pequeñas nuevas áreas idóneas en Nuevo León, Puebla, Tlaxcala y Ciudad de México (Fig. 5a y 5b).

Es notable que las NAI más extensas se registran al centro-norte de Estados Unidos (Fig. 5a y 5b) y algunas otras

en Sudamérica, en Argentina y Chile. Usando los valores de la climatología actual (1979-2013), según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis existe alta probabilidad (99%) de una tendencia clara de que las NAI (Fig. 5b y 5b) serán aquellas más frías, mientras que las AAI (áreas que dejarían de ser idóneas para la especie) es donde se espera un incremento significativo de temperatura al 2050 (Fig. 6).

## Perfil bioclimático de *Pinus engelmannii* Carrière

Según los registros de ocurrencia, esta especie actualmente se registra entre 9.8 °C y 25.7 °C (Bio1, Tabla 2), preferentemente entre 12 °C y 16 °C (Fig. 7a); y desde 7 mm hasta 72 mm (Bio 17, Tabla 2, Fig. 7b). Según las proyecciones de los MCGs al 2050, donde hoy ocurre la especie, en general se espera que en promedio la temperatura sea 1.6 °C y 1.9 °C más (RCP's 4.5 y 8.5), mientras que la precipitación disminuya entre 5 mm y 7 mm (Tabla 2). Aunque el intervalo altitudinal de la especie es muy amplio, sus preferencias son desde 2600 m a 1600 m s.n.m. (Fig. 7c). Bio 1 muestra un sesgo a la derecha (Fig. 7a), Beaumont, Hughes y Poulsen, (2005) determinaron que, una distribución normal o sesgada de la variable, es relevante para definir el perfil bioclimático de la especie, mientras que otros autores (Méndez *et al.*, 2021), indican que es indicio de una adecuada elección del predictor.

## DISCUSIÓN

### El ajuste y las variables del modelo del género *Pinus*

Peterson *et al.* (2008), indican que un modelo es mejor que lo aleatorio si el valor de ROC parcial está por encima de 1, por lo tanto, el modelo generado aquí es bueno, al obtener un ROC de 1.3. Al modelar la distribución actual de *Pinus montezumae* y *Pinus pseudostrobus*, Manzanilla *et al.* (2019) obtienen valores de ROC parcial de 1.312 y de 1.381; a pesar de que ROC parcial es una buena métrica del ajuste del modelo (Peterson *et al.*, 2008), pocos son los autores que la utilizan hoy día.

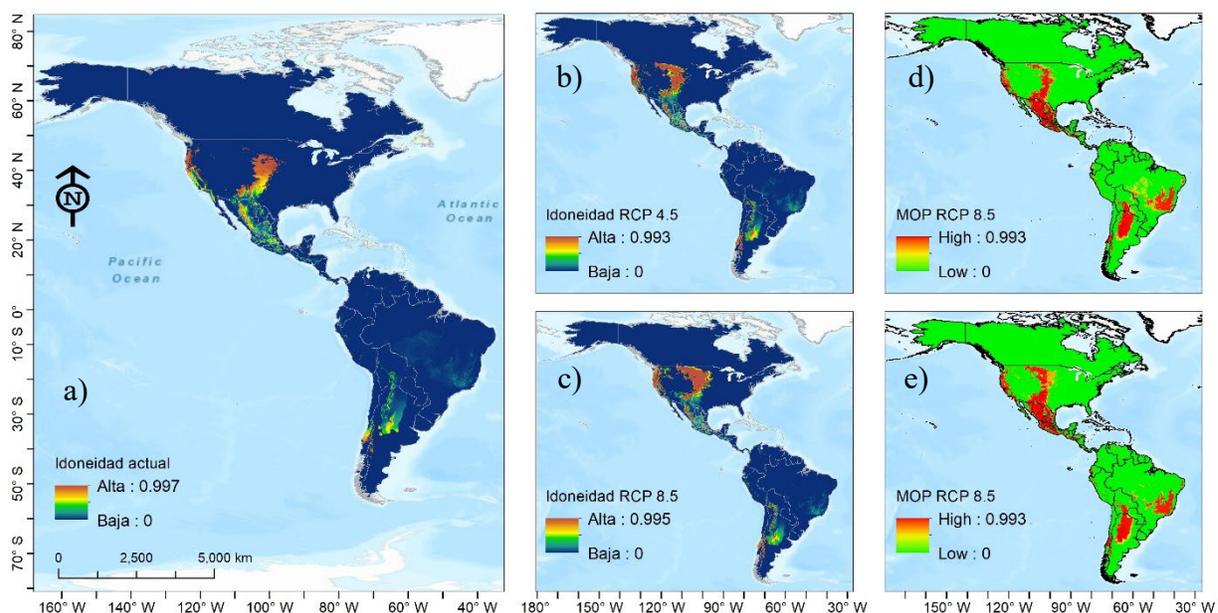


FIGURA 4. Modelo de distribución potencial actual (a) y futuro al 2050 en el RCP 4.5 (b) y RCP 8.5 (c) para *Pinus engelmannii* Carrière, predicha en la modalidad no extrapolación. Riesgo de extrapolación (MOP) de la transferencia del modelo, estimado para el RCP 4.5 (d) y RCP 8.5 (e).

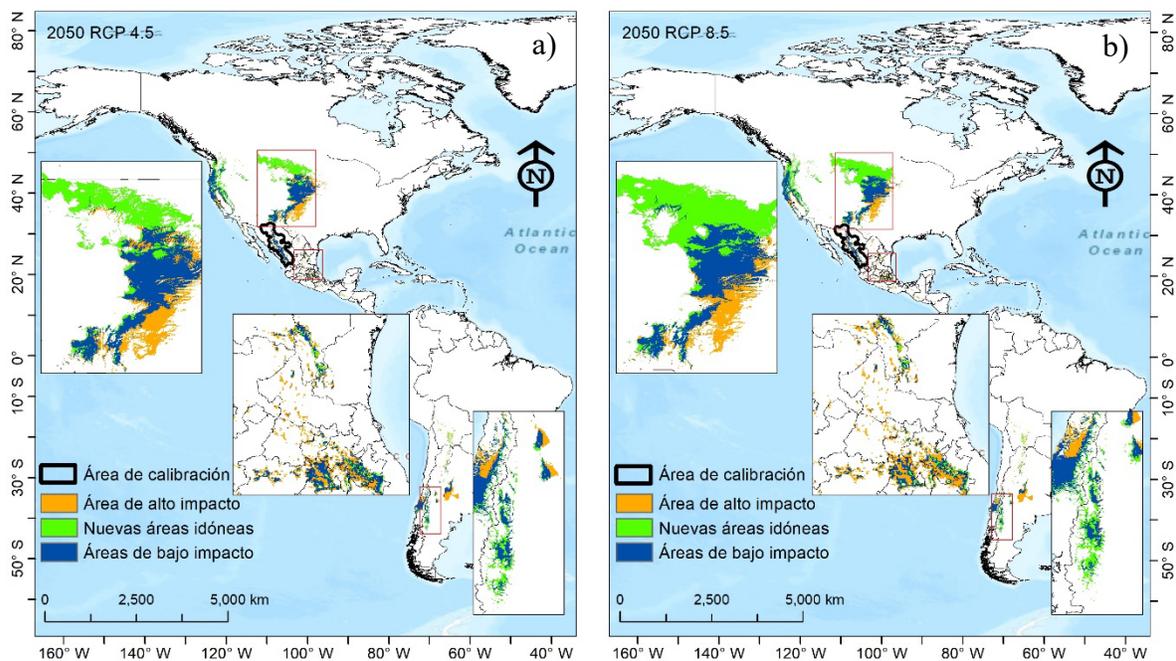


FIGURA 5. Área de idoneidad actual (color azul y naranja) y potencial (color verde) de *Pinus engelmannii* Carrière, promedio de cuatro modelos de circulación general (MCG's) en dos trayectorias de concentración representativas RCP's 4.5 (a) y 8.5 (b).



TABLA 2. Perfil bioclimático actual y futuro de *Pinus engelmannii* Carrière elaborado con 346 registros, cuatro modelos de circulación general y dos RCP's 4.5 y 8.5.

	CCSM4 <sup>f</sup>		CNRM-CM5 <sup>f</sup>		CSIRO-Mk3-6-0 <sup>f</sup>		HadGEM2-AO <sup>f</sup>		
	Actual	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Bio 1	9.8 - 25.7	11.4 - 27.0	11.8 - 27.8	11.4 - 27.0	11.7 - 27.3	11.9 - 27.5	12.1 - 27.7	11.8 - 27.4	11.9 - 27.5
Bio 17	7 - 72	5 - 60	4 - 51	4 - 50	5 - 47	7 - 74	9 - 86	4 - 55	6 - 68
Bio 16	205 - 1073	185 - 1050	216 - 1064	202 - 1135	216 - 1091	196 - 1069	211 - 1125	186 - 1123	179 - 1072
Bio 15	64 - 120	65 - 119	71 - 127	68 - 123	70 - 124	64 - 120	62 - 119	68 - 125	60 - 121
Bio 5	20.1 - 36.2	21.2 - 37.8	22.0 - 38.9	21.9 - 38.3	21.9 - 38.0	22.3 - 39.2	22.8 - 38.8	22.3 - 38.5	22.2 - 38.6

MCG's = Modelos de circulación general; RCP = Trayectorias Representativas de Concentración de CO<sub>2</sub>.

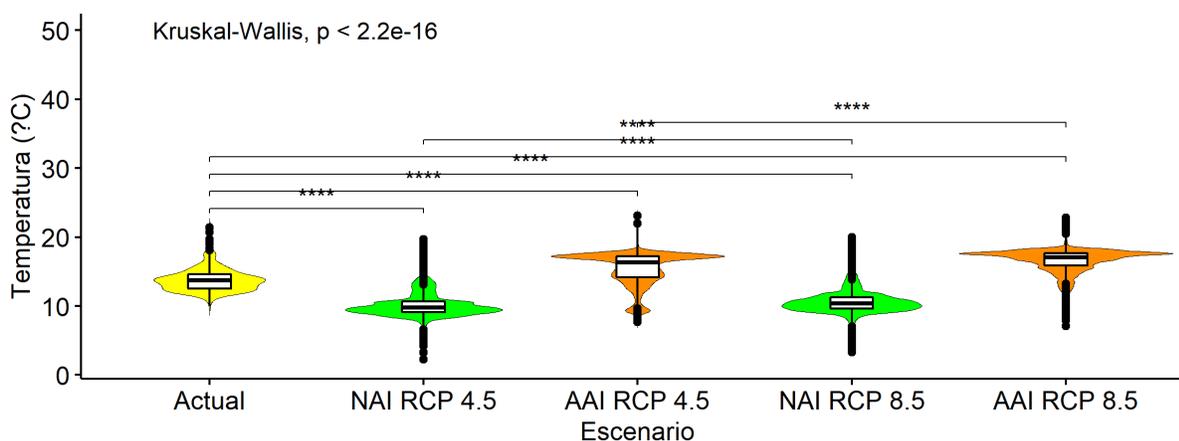


FIGURA 6. Temperatura media anual (Bio 1) actual, registrada en nuevas áreas idóneas (NAI) y en áreas de alto impacto (AAI), predichas al 2050, promedio de cuatro modelos de circulación general (MCG's) en dos RCP's (4.5 y 8.5) para *Pinus engelmannii* Carrière.

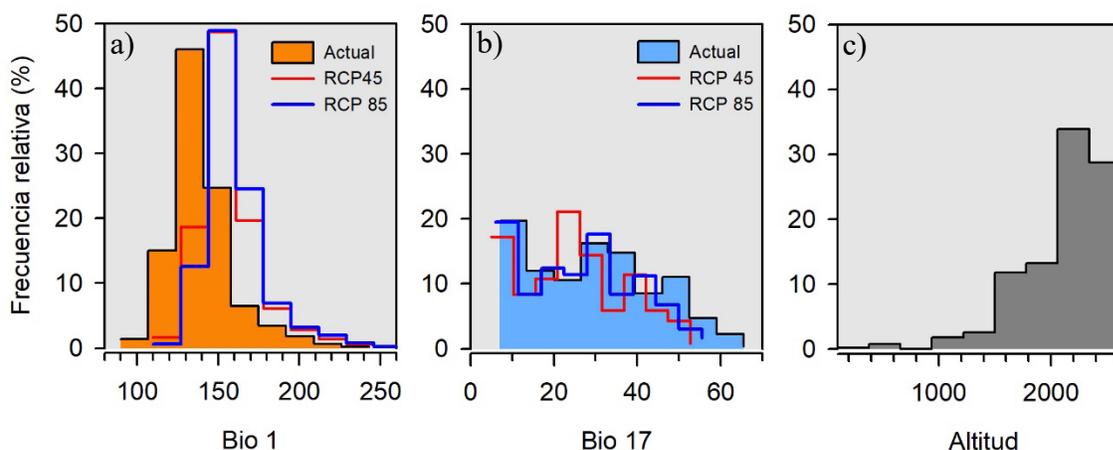


FIGURA 7. Variables ambientales de mayor contribución al modelo de nicho de *Pinus engelmannii* Carrière: Bio 1 (a) y Bio 17 (b) en el periodo actual (barras oscuras) y al 2050 (líneas), promedio de cuatro MCG's en dos trayectorias de concentración RCP's 4.5 y 8.5). La altitud (c) se presenta como complemento.

En general, se observa que en los modelos de nicho de las especies del género *Pinus*, la temperatura media anual (Bio 1) es la variable que mejor predice la distribución de las especies. Por ejemplo, Aceves-Rangel *et al.* (2018), modelaron la distribución actual de esta misma especie, encontrando que Bio 1, es variable que más contribuye al modelo con 24.9%. En un trabajo similar realizado por Ramos-Dorantes, Villaseñor, Ortiz y Gernandt (2017) encuentran que Bio 1, es la más importante en 10 de 16 especies de coníferas. Manzanilla *et al.* (2019) indican que la variable de mayor contribución al modelo de nicho de *P. pseudostrobus* es Bio1. Eguiluz, (1982) al igual que este estudio, demuestra que la distribución del género *Pinus*, depende en su gran mayoría de la temperatura. Sin embargo, la contribución de cada variable además de la especie depende del número de registros y su distribución, número y tipo de variables incluidas en la modelación, tipo de análisis y algoritmo (Elith *et al.*, 2006), por lo que en cada estudio podría diferir, incluso si se trata de la misma especie.

En contraparte, en *Pinus pincea* Gordon, Bio 5 es la que mejor explica su distribución actual (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016), pero en *Pinus cembroides* Zucc., es Bio 9 (García-Aranda *et al.*, 2018) y Bio 1 (Aceves-Rangel *et al.*, 2018). Alba, González, Ramírez y Castillo (2003), al realizar análisis de componentes principales, con 10 variables ambientales y 660 registros de presencia de nueve especies de coníferas, encuentran que el primer componente se relaciona con lluvia y el segundo con la temperatura.

En otros géneros como *Abies*, en seis de ocho especies y dos variedades, Bio 19 y Bio 2 (precipitación del cuarto más frío e intervalo de temperatura media diaria), son las más comunes (Martínez *et al.*, 2016).

### Áreas idóneas actuales de *Pinus engelmannii* Carrière

Chihuahua, Durango y Sonora, en ese orden son los estados donde ocurren las áreas más extensas e idóneas para *P. engelmannii*. La alta idoneidad de esta especie ha sido encontrada en estos mismos lugares (Aguirre y Duivenvoorden, 2010; Aceves-Rangel *et al.*, 2018),

quienes indican que su modelo es bueno al obtener AUC de 0.991 y de 0.778 respectivamente. Los primeros autores encuentran una extensión de 318 203.8 km<sup>2</sup> de áreas idóneas para esta especie en México, cuya cifra difiere a la de este estudio por la metodología, número de registros empleados y la no estratificación de estos autores. Otros autores (Rzedowski, 2006; González-Elizondo *et al.*, 2012; Bustamante-García *et al.*, 2012), demuestran que la distribución de esta especie ocurre principalmente en el estado de Durango. No obstante, Sánchez-González, (2008) indica que además de estas regiones, la especie también se encuentra en las regiones I y III (BC y Sierra Madre Oriental); lugares en los cuales no se encontraron registros.

### Las modalidades de la predicción potencial de *Pinus engelmannii* Carrière y de otras especies

La modalidad NE (no extrapolación) predice mejor la distribución potencial de *P. engelmannii*, mientras que EL y EC predicen de manera ilógica, este mismo patrón fue encontrado por Owens *et al.* (2013), las modalidades EL y EC, exageraron las predicciones de *Bactrocera invadens* Drew, Tsuruta & White y *Anopheles gambiae* Giles, optando por elegir la predicción NE; al parecer esto depende de los cambios que ocurren en las variables bioclimáticas cuando el modelo se trasfiere a otras áreas o tiempos, ya que Escobar *et al.* (2014) y Vilges *et al.* (2017) encontraron que EL y EC, predicen de la misma forma, mientras que Cobos *et al.* (2019) indican que la modalidad que mejor predicen la distribución de sus especies fue EL.

### La respuesta de las especies al cambio climático

La respuesta al cambio climático varía entre especies, en la mayoría de los casos la migración es una estrategia a la sobrevivencia (Aitken *et al.*, 2008), esto solo puede identificarse si se realizan más predicciones. Sáenz-Romero *et al.* (2010) encuentran que el nicho *P. chiapensis* para el año 2060 estaría ubicada a mayores latitudes, por el contrario, *Pinus leiophylla*. Schiede ex Schltdl. & Cham. tiende a migrar a menores latitudes (Sáenz-Romero *et al.*, 2015). En un



estudio realizado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) en doce especies de coníferas, se encontró que la reducción de las áreas de idoneidad podría ascender hasta 40% al 2075-2099, si las emisiones de CO<sub>2</sub> son altas (RCP 8.5), siendo *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham, *P. leiophylla* y *P. teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., las más afectadas. Lenoir *et al.* (2008) indican que, en Europa, como resultado del calentamiento global, las especies han migrado hacia mayores altitudes a una tasa de 29 m por década. Al parecer *P. engelmannii* Carrière podría ser una de las pocas especies que no es vulnerable al cambio climático; la modelación de nicho de este estudio, con climatologías de cuatro MCG's dan evidencias de esto, no se predicen nuevas áreas idóneas, ni se pierden las áreas idóneas existentes (Fig. 5), incluso si existiera un cambio climático drástico (Fig. 5b); en regiones cercanas a la distribución actual de la especie, se observan áreas idóneas, cerca del área de estudio, pero no es indicio de migración.

## CONCLUSIONES

Las variables que determinan la distribución de *Pinus engelmannii* Carrière son: Bio 1 y Bio 17 con 75.6% y 6.3%, respectivamente. La idoneidad climática más alta se registra en Chihuahua, Durango y Sonora, pero de forma discontinua. Se rechaza la hipótesis planteada; a diferencia de la mayoría de las especies de *Pinus*, al parecer esta especie no es susceptible al cambio en el clima, a pesar de un incremento de casi 2.0 °C en la temperatura media anual al 2050 (RCP 8.5), donde actualmente se distribuye la especie («M»), e independientemente de si las emisiones de CO<sub>2</sub> al 2050 sean altas (RCP 8.5) o bajas (RCP 4.5). Dentro de («M»), no se predicen nuevas áreas idóneas, ni se pierden las áreas idóneas existentes, es posible que la discontinuidad observada de las áreas de idoneidad sea indicio de fragmentación del hábitat. Al transferir el modelo, se observa la existencia de nuevas áreas idóneas en México, Estados Unidos (42 °N) y Sudamérica (44 °S), en particular las áreas idóneas actuales y las nuevas áreas idóneas del país deberían ser consideradas prioritarias para conservar e incrementar la distribución de la especie, considerando su reducida distribución actual.

## RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por todas las facilidades prestadas para realizar el presente proyecto y a la Comisión Nacional Forestal por apoyar con registros de la especie.

## REFERENCIAS

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52(7), 1043–1057.
- Aguirre, G. J., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 875–882.
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38, 541–545. doi: 10.1111/ecog.01132
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95–111. doi: 10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x
- Alba-López, M. P., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Castillo-Santiago M. A. (2003). Determinantes de la distribución de pinus spp. en la altiplanicie central de Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73, 7–15.
- Alberto, P. J. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid. 253 P. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K., (2018). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfeld (eds.)]. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/sr15>
- Ávila, C. R., Villavicencio, G. R., & Ruiz, C. J. A. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de

- Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 92–109. doi: 10.29298/rmcf.v5i24.322
- Beaumont, L. J., Hughes, L., & Poulsen, M. (2005). Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, 186, 250–269. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.030
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6(1), 8–9.
- Bustamante-García, V., Prieto-Ruiz, J. Á., Merlín-Bermudes, E., Álvarez-Zagoya, R., Carrillo-Parra, A., & Hernández-Díaz, J. C. (2012). Potencial y eficiencia de producción de semilla de *Pinus engelmannii* Carr., en tres rodales semilleros del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(3), 7–21. doi: 10.21829/myb.2012.183355
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio]. (2008). Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Cobos, M. E., Townsend, P. A., Barve, N., & Osorio O. L. (2019). Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 1, 1–15. doi: 10.7717/peerj.6281
- Collier, M. A., Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Wong, K. K. H., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J. I., Suppiah, R., Antony, J., El Zein, A., & Atif, M. (2011). *The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: Participation in CMIP5 and data publication*. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 2691–2697. doi: 10.22499/2.6301.001
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & López-Sandoval, J. A. (2016). Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135–148. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E., & Ortiz, E. (2014). Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 187–201. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.034
- Descroix, L., González, J. L., & Estrada, J. (2004). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP - IRD. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.
- Eguiluz, P. T. (1982). Clima y distribución del género *Pinus* en México. *Ciencia Forestal*, 7(38), 30–44.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nacazawa, Y., Overton, J. M., Townsend, P. A., Phillips, J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., & Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151. doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x
- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Townsend, P. A. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221–229. doi: 10.4081/gh.2014.19
- Farjón, A., Perez, J., & Styles, B. (1997). *A field guide to the pines of Mexico and central America*. Kew Published, Royal botanic gardens, Oxford Forestry Institute, University of Oxford, Oxford. 147 p.
- García, E. (1998). Climas (Clasificación de Köppen, modificada por García) Escala 1:1 000 000. D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecossistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3–13. doi: 10.19136/era.a5n13.1396
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, M. D., Neale, B. R., Rasch J. P., Vertenstein M., Worley H. P., Yang Zong-Liang, Zhang M. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991. doi.org/10.1175/2011jcli4083.1
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351–403. doi: 10.21829/abm100.2012.40
- Instituto Nacional de Estadística Geografía en Informática (Inegi). (2010). Estratificación univariada. Censo de Población y Vivienda. 2010. México: SINCE. Sistema para la Consulta de Información Censal.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2014). En la base de escritura Equipo, R. K. Pachauri, y L. A. Meyer (Eds.), *El cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III de la evaluación quinto informe de la Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, P., & Kessler, M. (2017).



- Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, 170122. doi.org/10.1038/sdata.2017.122
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768–1771. doi: 10.1126/science.1156831
- Manzanilla, Q. U., Delgado, V. P., Hernández, R. J., Molina, S. A., García, M. J. J., & Rocha, G. M. D. C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrabus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botanica Mexicana*, 126, 1398. doi: 10.21829/abm126.2019.1398
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., et al. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. doi: 10.5194/gmd-4-723-2011
- Martínez, M. (1948). *Los Pinos mexicanos* (2a. ed.), Ed. Botas, México, D. F.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5–24. doi: 10.17129/botsci.508
- Méndez-Encina, F. M., Méndez-González, J., Mendieta-Oviedo, R., López-Díaz, J. Ó. M., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Ecological Niches and Suitability Areas of Three Host Pine Species of Bark Beetle *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Forests*, 12(4), 385. MDPI <https://doi.org/10.3390/f12040385>
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E., & Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011
- Perry, J. (1991). *The Pines of Mexico and Central America*, Timber Press, Inc. Printed in Hong Kong, Portland, Oregon. 225 p.
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63–72. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. P. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning - ICML '04*, 83. doi: 10.1145/1015330.1015412
- Ramos-Dorantes, D. B., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., & Gernandt, D. S. (2017). Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 215–223. doi: 10.1016/j.rmb.2017.01.028
- Rzedowski, J., (2006). *Vegetación de México* (1a. ed digital), México: Comisión Nacional y Uso de la Biodiversidad.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595–623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961 - 1990 and future climate. *Botanical Sciences*, 93(4), 709–718. doi: 10.17129/botsci.86
- Saltré, F., Duputié, A., Gaucherel, C., & Chuine, I. (2014). How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech. *Global Change Biology*, 21(2), 1–13. doi: 10.1111/gcb.12771
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14(1), 107–120. doi: 10.21829/myb.2008.1411222
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *PNAS*, 106(2), 19644–19650. doi: 10.1073/pnas.0901637106
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 437–441. doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.011
- Stockwell, D., & Peters, D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2), 143–158.
- Vilges, de O. S., Romero-Alvarez, D., Fernandes, M. T., Pereira, dos S. J., Labruna, M. B., Salles, G. G., Escobar, L. E., & Gurgel-Gonçalves, R. (2017). *Amblyomma* ticks and future climate: range contraction due to climate warming. *Acta Tropica*, 176, 340–348. doi: 10.1016/j.actatropica.2017.07.033
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., ... , & Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40, 2091–2121. doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y

Manuscrito recibido el 29 de enero de 2020

Aceptado el 17 de mayo de 2021

Publicado el 23 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Jiménez S., M. A., & Méndez G., J. (2021). Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732117. doi: 10.21829/myb.2021.2732117



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.