



DOI: 10.29298/rmcf.v14i79.1350

Artículo de Investigación

Comparación de bases de datos climáticas en la modelación de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc.

Comparison of climatic databases in modeling the potential distribution of *Pinus cembroides* Zucc.

Julio Nemorio Martínez-Sánchez¹, Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez¹, José Israel Yerena Yamalle¹, María Tereza Cavazos², Homero Alejandro Gárate-Escamilla^{1*}

Fecha de recepción/Reception date: 6 de marzo de 2023

Fecha de aceptación/Acceptance date: 22 de junio del 2023

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

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: hgaratesc@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: hgaratesc@uanl.edu.mx

Resumen

La distribución potencial de las poblaciones de *Pinus cembroides* depende de la variabilidad espacial y temporal de la temperatura y la precipitación. Dado el incremento en la disponibilidad de diferentes bases de datos climáticos en las últimas décadas, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de su variabilidad espacial y temporal en la modelación de la distribución potencial de *P. cembroides*. Se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía (*MaxEnt*) para obtener la distribución potencial de *P. cembroides* a partir de los registros del Inventario Nacional Forestal y de Suelos y del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad, con datos de cuatro fuentes de información climática. A pesar de las diferencias en la resolución espacial, se obtuvieron cuatro modelos confiables con valores de *AUC* cercanos a 0.8. La distribución de *P. cembroides* está limitada por la temperatura media de los trimestres más húmedo (*Bio 8*) y más seco (*Bio 9*). Los modelos de *WorldClim v2.1* y *SCM* presentaron una mayor correlación entre la distribución de *P. cembroides* y las variables bioclimáticas seleccionadas. En los cuatro modelos, la especie registró una mayor probabilidad de ocurrencia (>70 %) en las sierras Madre Oriental y Occidental. Se concluye que son necesarias bases de datos con una resolución espacial de al menos 15 km² para los estudios de distribución de *P. cembroides*. Este tipo de investigaciones deben considerarse un primer paso en la planeación y desarrollo de estrategias de manejo y conservación de la especie.

Palabras clave: Datos climáticos, distribución de especies, máxima entropía, modelos de distribución, *Pinus cembroides* Zucc., variables bioclimáticas.

Abstract

The potential distribution of *Pinus cembroides* populations depends on the spatial and temporal variability of the temperature and precipitation. Given the increase in the availability of different climatic databases in the last decades, the objective of the present study was to evaluate the effect of their spatial and temporal variability on the modeling of the potential distribution of *P. cembroides*. The Maximum Entropy (*MaxEnt*) algorithm was used to obtain the potential distribution of *P. cembroides* from the records of the National Forest and Soil Inventory and the National Biodiversity Information System with data from four sources of climatic information. Despite differences in spatial resolution, four reliable models were obtained with *AUC* values close to 0.8. The distribution of *P. cembroides* is limited by the mean temperature of the wettest (*Bio 8*) and driest (*Bio 9*) quarters. The *WorldClim v2.1* and *SCM* models presented a higher correlation between the distribution of *P. cembroides* and the selected bioclimatic variables. In all four models, the species recorded a higher probability

of occurrence (>70 %) in the Eastern and Western *Sierras Madre*. It is concluded that databases with a spatial resolution of at least 15 km² are necessary for distribution studies of *P. cembroides*. The type of research should be considered a first step in the planning and development of management and conservation strategies for the species.

Key words: Climate data, species distribution, maximum entropy, distribution models, *Pinus cembroides* Zucc., bioclimatic variables.

Introducción

Se ha demostrado que el desempeño de los modelos de distribución de especies basados en el clima depende de la resolución espacial y del periodo de referencia de la información climática utilizada (Jiménez-Valverde *et al.*, 2021; Abdulwahab *et al.*, 2022). Aunque en los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de fuentes de información climática, la mayoría son de escala global (Livneh *et al.*, 2015; Fick y Hijmans, 2017) y no reflejan, a nivel local, las variaciones de las condiciones climáticas (Harris *et al.*, 2014), las cuales son importantes para determinar la distribución potencial de algunas especies, sobre todo de aquellas ubicadas en zonas con un relieve pronunciado (Austin y Van Niel, 2011; Lembrechts *et al.*, 2019).

Debido a lo anterior, no se tiene conocimiento sobre cuales bases de datos climáticas son las más apropiadas cuando se utilizan modelos de distribución de especies (MsDE) (Nezer *et al.*, 2017; Stewart *et al.*, 2022), por lo que se ha considerado que las bases de datos climáticos se convierten en una de las mayores fuentes de incertidumbre en el desarrollo y uso de MsDE orientados al manejo y conservación de especies (Bucklin *et al.*, 2015).

Para comprobar los efectos de la resolución espacial y la variabilidad temporal de la información climática en el desempeño de los MsDE, se seleccionaron áreas de

distribución de *Pinus cembroides* Zucc., taxón que se distribuye en las sierras Madre Oriental, Occidental y en el Eje Neovolcánico Transversal, además, está adaptado a una gran variedad de climas, por lo que es el pino piñonero con mayor distribución a nivel nacional (Constante *et al.*, 2009).

P. cembroides se caracteriza por crecer en suelos secos y laderas rocosas o al pie de las montañas, puede alcanzar hasta 15 m de altura y un diámetro de 30 a 70 cm (Herrera-Soto *et al.*, 2018). Se ha identificado como uno de los pinos más tolerantes a la sequía (Gutiérrez-García *et al.*, 2015).

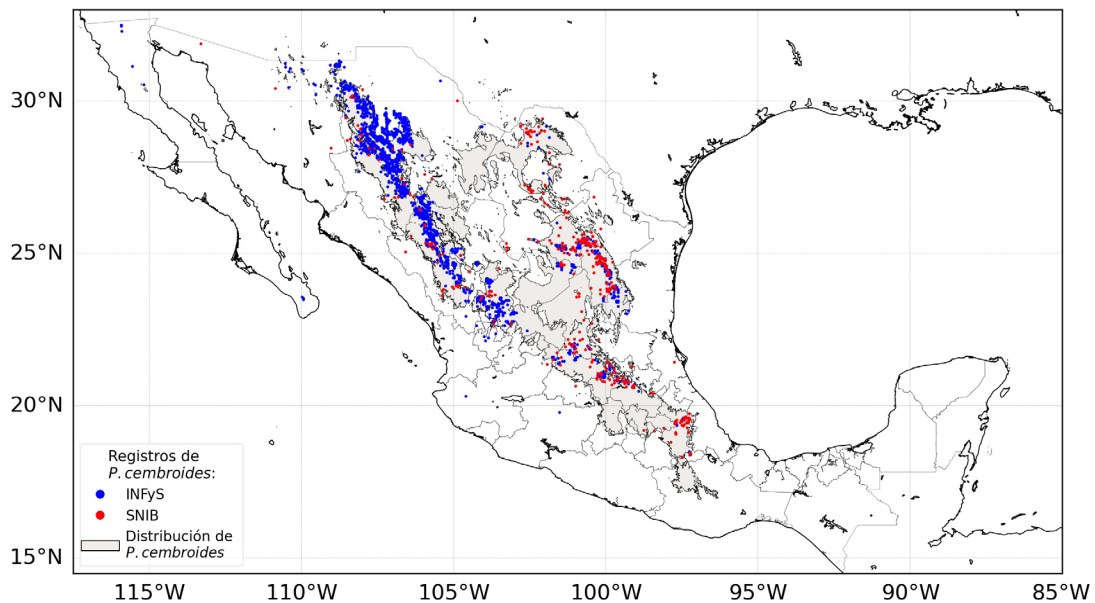
Las poblaciones más abundantes de *P. cembroides* se encuentran en los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Zacatecas, donde forman parte de la vegetación de transición entre las formaciones xerofíticas de la Altiplanicie Mexicana y las vertientes internas de las sierras Madre Oriental y Occidental (Carlón *et al.*, 2018).

En diversos estudios se ha demostrado que la distribución geográfica de *P. cembroides* está influenciada por la variabilidad espacial y temporal del clima (Aceves-Rangel *et al.*, 2018; Antúnez *et al.*, 2018; García-Aranda *et al.*, 2018). Sin embargo, no se han realizado análisis para evaluar el uso de diferentes fuentes de datos climáticos en el desempeño de los MsDE. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la variabilidad espacial y temporal del clima reflejado en bases de datos climáticos con diferencias en su resolución espacial y períodos de referencia, utilizando como caso de estudio modelos de distribución potencial de *P. cembroides* en México.

Materiales y Métodos

La región de estudio incluye todas las zonas de distribución de *P. cembroides* a nivel nacional (Figura 1), las cuales se caracterizan por tener una gran diversidad de

climas, desde semiáridos en el norte hasta climas templados y subtropicales en el centro y sur del país (Conabio, 2008). Las poblaciones se ubican entre 1 350 y 3 500 msnm, con temperaturas entre 7 y 40 °C, con un promedio anual de 18 °C, y una precipitación promedio anual de 360 a 800 mm (Rzedowski, 1978).



Fuentes: Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (Conafor, 2012) y Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) (Conabio, 2021).

Figura 1. Distribución potencial (sombreado en gris) (Téllez-Valdés *et al.*, 2019) y registros históricos de *Pinus cembroides* Zucc. del INFyS (puntos azules) y del SNIB (puntos rojos) en México.

Las coordenadas de registro de presencia de *P. cembroides* se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2012) para el período 2009-2014 y del Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) (Conabio, 2021). Con el fin de evitar sobrestimaciones y redundancia se eliminaron los registros duplicados de

ocurrencia. Para ello, se seleccionó un radio alrededor de cada punto de ocurrencia de *P. cembroides*, en el cual se consideraron la resolución espacial de los predictores climáticos (1 km², 15 km² y 55.5 km²), es decir, solo se incluyó un registro individual de ocurrencia de *P. cembroides* para cada celda de información climática.

La información climática se obtuvo a partir de cuatro fuentes: dos de escala global y dos a nivel nacional, que representan el clima promedio para diferentes periodos históricos desde 1910 hasta 2018, y a diferente resolución espacial (desde ~1 km² hasta ~55.5 km²) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Bases de datos climáticas.

Fuente	Resolución	Periodo	Referencia
<i>WorldClim</i> v2.1	0.008° (~1 km ²)	1970-2000	Fick y Hijmans, 2017
SMN-CLICOM	0.125° (~15 km ²)	1971-2000	Zhu y Lettenmier, 2007
ERA5	0.500° (~55.5 km ²)	1979-2018	Vanuytrecht <i>et al.</i> , 2021
SCM	0.008° (~1 km ²)	1910-2009	Cuervo-Robayo <i>et al.</i> , 2014

Los datos climáticos de *WorldClim* v2.1 (Fick y Hijmans, 2017) contienen información global obtenida de 9 000 a 60 000 estaciones (en función de la cobertura) a nivel global y se interpoló por el método de *thin-spline* considerando covariables como la altitud, distancia a la costa y cobertura nubosa. La base de datos de Superficies Climáticas Mexicanas (SCM) (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014), se construyó a partir de datos diarios de 5 000 estaciones que forman parte de la red de estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) usando un método de interpolación similar al propuesto por Fick y Hijmans (2017) con la longitud, latitud y altitud como variables independientes.

La información climática de SMN-CLICOM se calculó utilizando datos diarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de aproximadamente 5 000 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) desde la década de 1920 hasta 2014 (Zhu y Lettenmaier, 2007). Por último, se utilizaron datos de ERA5, el cual es un reanálisis global (pronósticos de un modelo global y datos de observaciones) que utiliza datos horarios y mensuales obtenidos de una combinación de datos medidos por estaciones meteorológicas, boyas oceánicas y datos estimados a partir de información de satélites (Vanuytrecht *et al.*, 2021) para el período de 1979 a 2018.

A partir de cada base de datos climáticos se utilizaron 19 variables bioclimáticas que representan diferentes promedios y tendencias anuales, estacionales y mensuales de las variables de precipitación y temperatura media, máxima y mínima (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables bioclimáticas.

Variable	Descripción	Unidades	Variable	Descripción	Unidades
<i>Bio 1</i>	Temperatura media anual	°C	<i>Bio 11</i>	Temperatura media del trimestre más frío	°C
<i>Bio 2</i>	Intervalo diurno de temperatura	°C	<i>Bio 12</i>	Precipitación anual	mm
<i>Bio 3</i>	Isotermalidad ($Bio2/Bio7$) $\times 100$	-	<i>Bio 13</i>	Precipitación del mes más húmedo	mm
<i>Bio 4</i>	Estacionalidad de temperatura	%	<i>Bio 14</i>	Precipitación del mes más seco	mm
<i>Bio 5</i>	Temperatura máxima del mes más cálido	°C	<i>Bio 15</i>	Estacionalidad de precipitación	%
<i>Bio 6</i>	Temperatura mínima del mes más frío	°C	<i>Bio 16</i>	Precipitación del trimestre más húmedo	mm
<i>Bio 7</i>	Rango anual de	°C	<i>Bio 17</i>	Precipitación del	mm

temperatura (<i>Bio5-Bio6</i>)			trimestre más seco		
<i>Bio 8</i>	Temperatura media del trimestre más húmedo	°C	<i>Bio 18</i>	Precipitación del trimestre más cálido	mm
<i>Bio 9</i>	Temperatura media del trimestre más seco	°C	<i>Bio 19</i>	Precipitación del trimestre más frío	mm
<i>Bio 10</i>	Temperatura media del trimestre más cálido	°C			

Los modelos de distribución potencial de *P. cembroides* se obtuvieron a partir del *software* MaxEnt (v3.4.3) que utiliza el principio de máxima entropía (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011). A partir de un análisis de colinealidad, en cada modelo de distribución se utilizaron únicamente las variables bioclimáticas con un valor de factor de inflación de varianza o *VIF* menor a 10 (Belsley *et al.*, 1991; Guisan *et al.*, 2006). En cada caso, se usó 80 y 20 % de los registros de ocurrencia para el entrenamiento y validación, respectivamente (Marino *et al.*, 2011).

Se seleccionó el formato de salida logístico para indicar probabilidades de presencia de la especie con valores de 0 a 1 para indicar ausencia y máxima idoneidad de forma respectiva (Phillips *et al.*, 2006). Se identificaron umbrales para condiciones no favorables (<10 %), potencial bajo (11–30 %), potencial moderado (31–70 %) y potencial alto (>70 %) (Choudhury *et al.*, 2016).

La contribución relativa de cada variable bioclimática se estimó mediante la prueba de *Jackknife* (Phillips *et al.*, 2006). En la validación de los modelos se empleó la prueba del valor del área bajo la curva (*AUC*) (Pearson *et al.*, 2007), en la cual los valores cercanos a 1 indican una mayor correlación entre las variables bioclimáticas seleccionadas y la distribución potencial obtenida (Araújo *et al.*, 2005; Phillips y Dudik, 2008).

Resultados

Se obtuvieron un total de 1 696 registros de *P. cembroides* a nivel nacional (1 251 del INFyS y 445 del SNIB). Los estados con mayor número fueron Chihuahua (690), Durango (310), Coahuila (165), Nuevo León (145) y Zacatecas (114), donde se concentra más del 80 % del total (Cuadro 3).

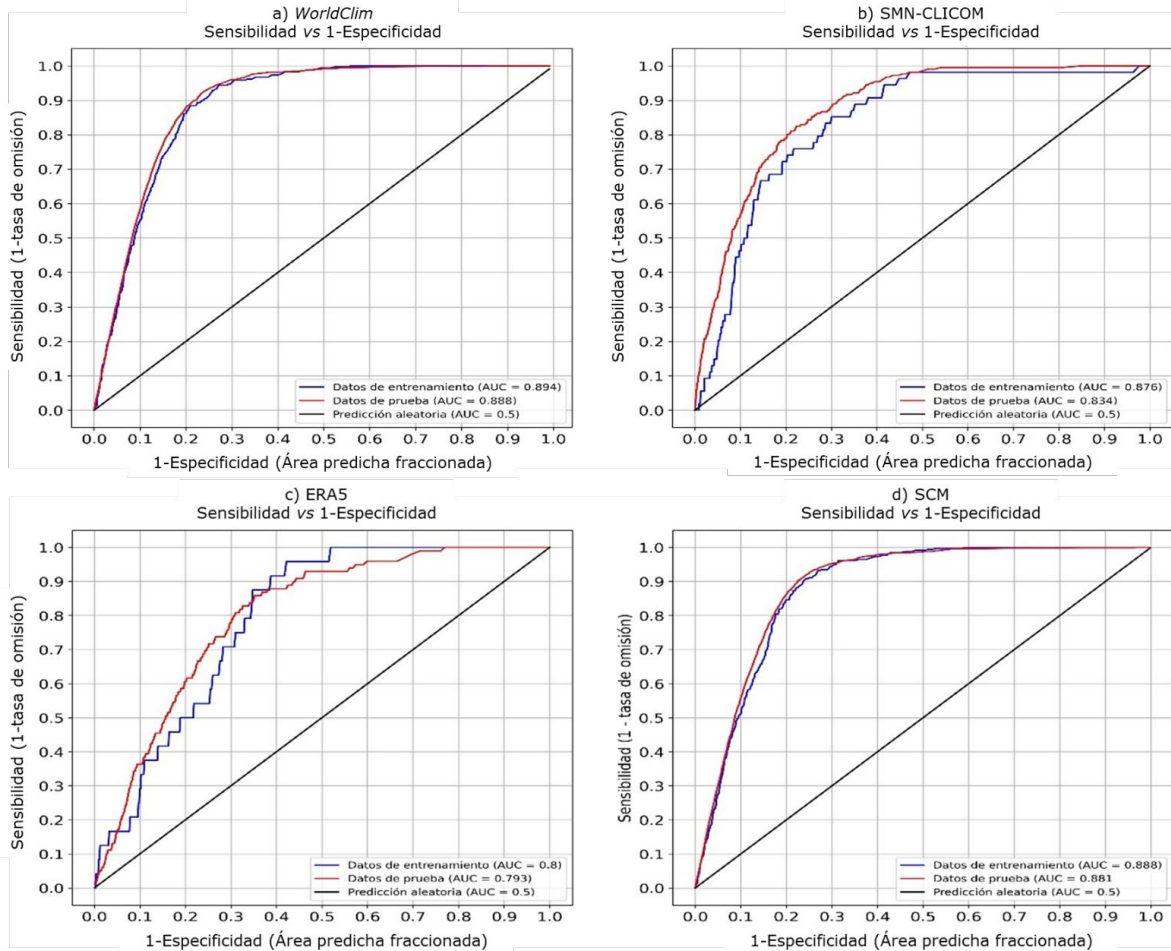
Cuadro 3. Número de registros de *Pinus cembroides* Zucc. por estado.

Estado	INFyS	SNIB	Estado	INFyS	SNIB
Chihuahua	661	29	Hidalgo	6	17
Durango	273	37	Veracruz	1	17
Coahuila	51	114	Jalisco	7	3
Nuevo León	51	94	Baja California	5	-
Zacatecas	96	18	Baja California Sur	3	-
Guanajuato	30	17	Tlaxcala	1	3
Tamaulipas	17	25	Michoacán	1	-
San Luis Potosí	14	23	Estado de México	-	1
Querétaro	9	21	Total	1 251	445
Puebla	3	23			
Sonora	22	3			

Fuente: Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (Conafor, 2012) y Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) (Conabio, 2021).

Se obtuvieron modelos de distribución potencial de *P. cembroides* confiables y significativos con valores de *AUC* cercanos a 0.8 en los cuatro casos (Figura 2). El modelo con datos climáticos de WorldClim v2.1 fue el que tuvo un valor mayor de

AUC con 0.888, y el de menor valor correspondió al modelo con datos del reanálisis ERA5, con un *AUC* de 0.793 en la validación.



a) *WorldClim* v2.1; b) SMN-CLICOM; c) ERA5; d) SCM.

Figura 2. Análisis del área bajo la curva (*AUC*).

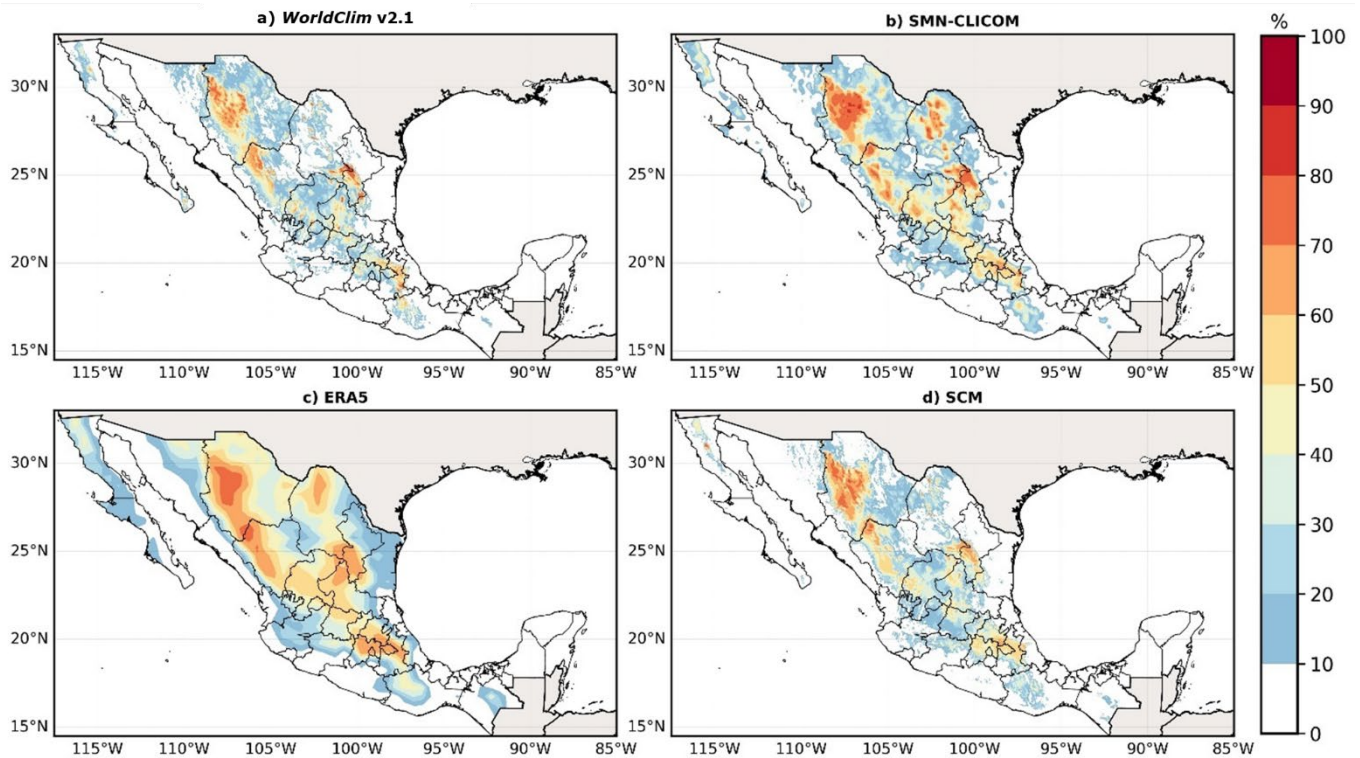
A pesar de las diferencias en la resolución espacial y periodos históricos de los datos climáticos, en todos los modelos la temperatura media de los trimestres más húmedos (*Bio 8*) y más secos (*Bio 9*) contribuyeron con más de 80 % en la

distribución potencial de *P. cembroides* (Cuadro 4). En general, las variables derivadas de precipitación contribuyeron en promedio con menos de 5.0 %.

Cuadro 4. Contribución (%) de las variables bioclimáticas utilizadas en cada modelo.

Variable	WorldClim v2.1	SMN-CLICOM	ERA5	SCM
<i>Bio 9</i>	17.0	78.8	90.9	60.0
<i>Bio 8</i>	68.5	12.0	3.4	30.7
<i>Bio 2</i>	3.4	3.7	0.8	2.1
<i>Bio 3</i>	4.0	1.5	1.1	1.1
<i>Bio 18</i>	2.7	1.1	-	4.8
<i>Bio 12</i>	3.6	1.9	-	-
<i>Bio 16</i>	-	-	3.1	-
<i>Bio 15</i>	-	1.0	0.4	0.8
<i>Bio 14</i>	0.7	-	0.2	0.0
<i>Bio 19</i>	0.3	-	0.1	0.4

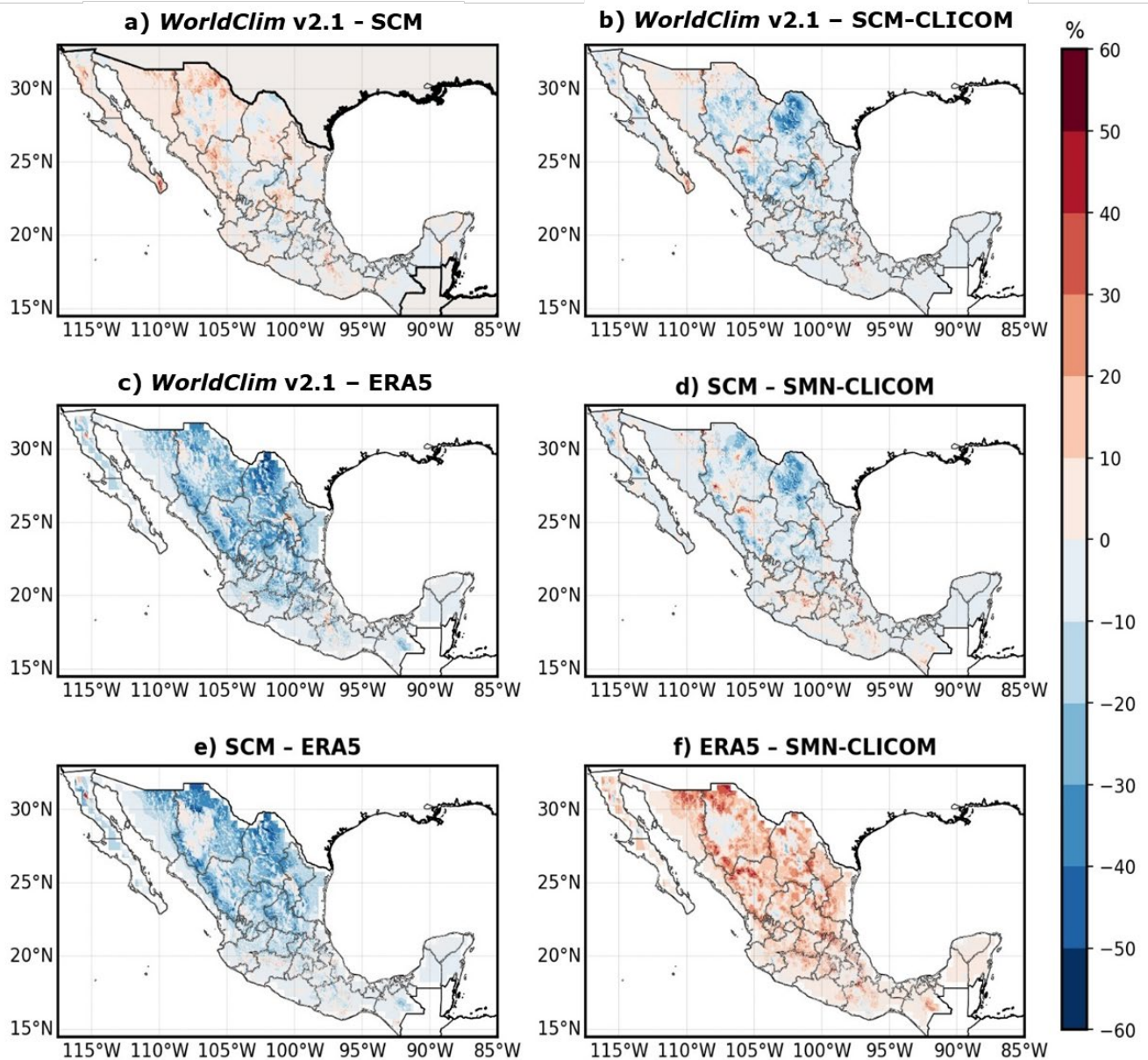
Las regiones con mayor probabilidad para la ocurrencia de *P. cembroides* se ubicaron a lo largo de las sierras Madre Oriental y Occidental con valores superiores a 70 %, y cercanos a 50 % en el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 3), donde se presenta un clima templado y veranos cálidos con intervalos de *Bio 8* de 16 a 22 °C y de *Bio 9* desde 10 hasta 16 °C, y una precipitación anual menor a 1 200 mm. Sin embargo, se observaron diferencias a nivel regional entre los modelos. En Coahuila y algunas regiones del centro del país, los modelos obtenidos con datos climáticos de SMN-CLICOM y ERA5 indicaron una mayor probabilidad (50-70 %) con respecto a los resultados con *WorldClim v2.1* y SCM, los cuales mostraron probabilidades menores a 30 %.



a) *WorldClim* v2.1; b) SMN-CLICOM; c) ERA5; d) SCM.

Figura 3. Distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc.

El modelo con datos climáticos de ERA5 sobrestimó la probabilidad de presencia de *P. cembroides* y mostró mayor diferencia respecto a los otros modelos con probabilidades de 20 a 30 % en el norte del estado de Baja California, y mayores a 60 % en el centro y sur del país (Figura 3c). En la región norte de Coahuila, los modelos de menor resolución espacial (SMN-CLICOM y ERA5) sobrestimaron la distribución de *P. cembroides* en comparación con los resultados de *WorldClim* v2.1 y SCM. Algo similar se observó en la región central del país, en la que ERA5 registró probabilidades superiores a 60 %. Los modelos de *WorldClim* v2.1 y SCM presentaron probabilidades similares de *P. cembroides* en toda la distribución, con diferencias entre ambos menores a 25 % (Figura 4a).



a) WorldClim v2.1-SCM; b) WorldClim v2.1-SMN-CLICOM); c) WorldClim v2.1-ERA5; d) SCM-SMN-CLICOM; e) SCM-ERA5; f) ERA5-SMN-CLICOM.

Figura 4. Diferencias de probabilidad entre los diferentes modelos de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. en México.

El modelo de SMN-CLICOM tuvo una mayor probabilidad respecto a los modelos de SCM y *WorldClim* v2.1 (figuras 4b y 4c) en el estado de Coahuila, con diferencias de 30 a 40 % y de 40 a 50 %, respectivamente. Las diferencias de probabilidad entre los modelos de *WorldClim* v2.1, ERA5 y SCM variaron entre 40-50 % en todo el país (figuras 4c, 4e y 4f).

Discusión

Dado al incremento en el número de bases de datos climáticos en los últimos años (Livneh *et al.*, 2015; Fick y Hijmans, 2017; Vanuytrecht *et al.*, 2021), es posible realizar estudios para comparar los efectos de la resolución espacial y la variabilidad temporal en los modelos de distribución de diferentes especies. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones de MsDE han utilizado únicamente los datos climáticos de *WorldClim* (Romero-Sánchez *et al.*, 2017; Manzanilla-Quijada *et al.*, 2020) y en menos de 10 % se compara el uso de otras bases de datos y los efectos de dichos factores en el desempeño y la interpretación de los MsDE (Bobrowski *et al.*, 2021).

En este trabajo se evaluó el desempeño de los modelos de distribución de *P. cembroides* obtenidos a partir de cuatro bases de datos climáticas. Los resultados son consistentes en evidenciar que el desempeño de los modelos de distribución de dicha especie es dependiente de la resolución espacial y variabilidad temporal de la información climática utilizada (Bucklin *et al.*, 2015; Abdulwahab *et al.*, 2022).

Los modelos de *WorldClim* v2.1 y SCM de mayor resolución tuvieron un mejor desempeño con valores de *AUC* de 0.888 y 0.881, respectivamente, lo cual indica

una correlación más alta entre las variables bioclimáticas seleccionadas y la distribución potencial generada (Connor *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). En comparación, el modelo de ERA5 presentó el menor desempeño, con un valor de *AUC* de 0.793, cuyos registros son inferiores a lo documentado en estudios previos de distribución del género *Pinus*, incluso *P. cembroides*, a nivel nacional y regional en el noreste de México, en los cuales se citan valores de *AUC* mayores a 0.9 (Aceves-Rangel *et al.*, 2018; García-Aranda *et al.*, 2018). Sin embargo, es posible que el desempeño de los modelos obtenidos en esos estudios esté sobrestimado, ya que no se realizó un análisis de colinealidad para identificar las variables bioclimáticas con mayor correlación (Guisan *et al.*, 2006; Dormann *et al.*, 2013).

Las predicciones de distribución obtenidas fueron superiores a 0.750, por lo que se considera que todos los modelos son precisos y funcionan como una herramienta para determinar planes de manejo y conservación de dicha especie (Aguirre y Duivenvoorden, 2010; Aceves-Rangel *et al.*, 2018). En este estudio se demuestra que para *P. cembroides*, los modelos de resolución espacial de 1 km² tuvieron un mejor desempeño estadístico que los modelos con resolución mayor a 15 km². Para algunas especies de distribución limitada, los MsDE obtenidos con datos climáticos de baja resolución espacial (>50 km²) pueden tener un mejor desempeño estadístico en comparación con otros MsDE basados en información climática con más resolución (Watling *et al.*, 2014; Datta *et al.*, 2020).

Aunque en investigaciones previas de distribución basados en datos de *WorldClim* para el periodo 1950-2000, se identificó a la temperatura media anual (*Bio 1*), altitud y precipitación anual (*Bio 12*) como las variables que influyen en la distribución de *P. cembroides* (Aceves-Rangel *et al.*, 2018), los resultados del presente trabajo indican que en todos los modelos la distribución de *P. cembroides* a nivel nacional está limitada por la temperatura media del trimestre más húmedo (*Bio 8*) y la temperatura media del trimestre más seco (*Bio 9*). A nivel regional, son

consistentes con los señalados por García-Aranda *et al.* (2018) quienes para el período 1950-2000 concluyen que la temperatura media del trimestre más seco (*Bio 9*) y la temperatura máxima del mes más cálido (*Bio 5*) son las limitantes más importantes para su distribución en el noreste de México.

Las diferencias observadas en el desempeño y la interpretación de los modelos de distribución se deben, principalmente, a diferencias en la resolución espacial y periodos de referencia de los predictores utilizados (Baker *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019). Aunque las bases de datos de *WorldClim* v2.1 y SCM tienen una mayor resolución en comparación con las bases de datos de SMN-CLICOM y ERA5, no consideran el aumento en la temperatura observado en la última década (2011-2020) en algunas regiones de México (Cavazos *et al.*, 2020). Esto se refleja en diferencias en la distribución espacial de las variables bioclimáticas entre cada base de datos. Por ejemplo, en regiones de la Península de Baja California, las diferencias de temperatura media del trimestre más seco entre *WorldClim* v2.1 y SMN-CLICOM superan los 5 °C, y en la temperatura media del trimestre más húmedo, también se observaron diferencias mayores a 5 °C en Chihuahua y zonas de Sonora, Durango y Zacatecas. Es posible que si se incluyen estos datos, la distribución de *P. cembroides* se modifique de manera significativa, especialmente en regiones donde se ha observado una tendencia positiva en el aumento de la temperatura a nivel local y regional.

En cambio, la información de ERA5 sí considera dicha tendencia, pero debido a su resolución espacial no se observan cambios en la distribución de la precipitación y temperatura, que pueden servir para identificar refugios climáticos a nivel local (Austin y Van Niel, 2011).

El siguiente paso es generar modelos de distribución potencial de *P. cembroides* a nivel nacional a partir de bases de datos climáticos de resolución espacial mayor a 15 km² que combinen información estimada de satélites y medida por estaciones de

superficie, y que integren la variabilidad climática observada en los últimos 30 años (1991-2020) en México.

Conclusiones

El desempeño de los modelos de distribución de *P. cembroides* depende de la resolución espacial y del período de referencia de los datos climáticos utilizados. Los modelos de *WorldClim* v2.1, SCM (con resolución de 1 km²) y SMN-CLICOM (15 km²) tienen un mejor desempeño estadístico en comparación con el modelo de ERA5 (55.5 km²). En todos los modelos, las variables de temperatura media del trimestre más húmedo (*Bio 8*), que ocurre en los meses de junio a septiembre en la mayor parte del país y en invierno en el noroeste, así como la temperatura media del trimestre más seco (*Bio 9*) (finales del invierno e inicios de la primavera en el norte, centro y sur de México) contribuyen con más de 80 % en la distribución potencial de *P. cembroides*.

En general, se concluye que es necesario utilizar bases de datos con una resolución espacial de al menos 15 km² para obtener modelos confiables de distribución para *P. cembroides* y que, además, incluyan información sobre el calentamiento observado en las últimas décadas. La selección de las bases de datos climáticos debe realizarse en colaboración con expertos en la ecología de la especie por analizar. El análisis comparativo entre diferentes bases de datos climáticas en el desempeño de MsDE es fundamental en el proceso de planeación de estrategias de manejo y conservación de *P. cembroides* y otras especies de coníferas de distribución más limitada.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por el apoyo de la beca de doctorado del primer autor.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autores

Julio Nemorio Martínez-Sánchez, Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez y Homero Alejandro Gárate-Escamilla: búsqueda de información, modelización de la distribución potencial, revisión de datos, redacción del manuscrito; José Israel Yerena Yamallel: revisión del manuscrito; María Tereza Cavazos: bases de datos climáticas, revisión del manuscrito.

Referencias

Abdulwahab, U. A., E. Hammill and C. P. Hawkins. 2022. Choice of climate data affects the performance and interpretation of species distribution models. *Ecological Modelling* 471:110042. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110042.

Aceves-Rangel, L. D., J. Méndez-González, M. A. García-Aranda y J. A. Nájera-Luna. 2018. Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* 52(7):1043-1057.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000701043. (24 de febrero de 2023).

Aguirre G., J. and J. F. Duivenvoorden. 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(3):875-882.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-34532010000300027&script=sci_abstract&tlng=en. (22 de febrero de 2023).

Antúñez, P., M. E. Suárez-Mota, C. Valenzuela-Encinas and F. Ruiz-Aquino. 2018. The potential distribution of tree species in three periods of time under a climate change scenario. *Forests* 9(10):628. Doi: [10.3390/f9100628](https://doi.org/10.3390/f9100628).

Araújo, M. B., R. G. Pearson, W. Thuiller and M. Erhard. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11(9):1504-1513. Doi: [10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x).

Austin, M. P. and K. P. Van Niel. 2011. Improving species distribution models for climate change studies: Variable selection and scale. *Journal of Biogeography* 38(1):1-8. Doi: [10.1111/j.1365-2699.2010.02416.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02416.x).

Baker, D. J., A. J. Hartley, J. W. Pearce-Higgins, R. G. Jones and S. G. Willis. 2017. Neglected issues in using weather and climate information in ecology and biogeography. *Diversity and Distributions* 23(3):329-340. Doi: [10.1111/ddi.12527](https://doi.org/10.1111/ddi.12527).

Belsley, D. A. 1991. *Conditioning diagnostics: collinearity and weak data in regression*. Wiley. Chichester, WS, United Kingdom. 396 p.

Bobrowski, M., J. Weidinger and U. Schickhoff. 2021. Is new always better? Frontiers in global climate datasets for modeling treeline species in the Himalayas. *Atmosphere* 12(5):543. Doi: [10.3390/atmos12050543](https://doi.org/10.3390/atmos12050543).

Bucklin, D. N., M. Basille, A. M. Benschoter, L. A. Brandt, ... and J. I. Watling. 2015. Comparing species distribution models constructed with different subsets of environmental predictors. *Diversity and Distributions* 21(1):23-35. Doi: [10.1111/ddi.12247](https://doi.org/10.1111/ddi.12247).

- Carlón A., T., M. E. Mendoza, J. Villanueva D. and Y. Li. 2018. Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees* 32(2):1387-1399. Doi: 10.1007/s00468-018-1720-1.
- Cavazos, T., R. Luna-Niño, R. Cerezo-Mota, R. Fuentes-Franco, ... and E. Valenzuela. 2020. Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean and Mexico) domain. *International Journal of Climatology* 40(3):1396-1420. Doi: 10.1002/joc.6276.
- Choudhury, M. R., P. Deb, H. Singha, B. Chakdar and M. Medhi. 2016. Predicting the probable distribution and threat of invasive *Mimosa diplotricha* Suavalle and *Mikania micrantha* Kunth in a protected tropical grassland. *Ecological Engineering* 97:23-31. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.07.018.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2012. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009. Coordinación General de Planeación e Información, Gerencia de Inventario Forestal y Geomática y Conafor. Zapopan, Jal., México. 212 p. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Inventario_nacional_forestal_y_de_suelos_informe_2004_-_2009_.pdf. (7 de julio de 2022).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2008. Catálogo de metadatos geográficos. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>. (23 de octubre de 2023).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2021. Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (5 de agosto de 2022).
- Connor, T., V. Hull, A. Viña, A. Shortridge, ... and J. Liu. 2018. Effects of grain size and niche breadth on species distribution modeling. *Ecography* 41(8):1270-1282. Doi: [10.1111/ecog.03416](https://doi.org/10.1111/ecog.03416).

Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. H. Cornejo O. y S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Revista Ciencia Forestal en México* 34(106):17-38. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000200002. (22 de febrero de 2023).

Cuervo-Robayo, A. P., O. Téllez-Valdés, M. A. Gómez-Albores, C. S. Venegas-Barrera, J. Manjarrez and E. Martínez-Meyer. 2014. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* 34(7):2427-2437. Doi: [10.1002/joc.3848](https://doi.org/10.1002/joc.3848).

Datta, A., O. Schweiger and I. Kühn. 2020. Origin of climatic data can determine the transferability of species distribution models. *NeoBiota* 59:61–76. Doi: [10.3897/neobiota.59.36299](https://doi.org/10.3897/neobiota.59.36299).

Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, ... and S. Lautenbach. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1):27-46. Doi: [10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x).

Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee and C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1):43-57. Doi: [10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x](https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x).

Fick, S. E. and R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12):4302-4315. Doi: [10.1002/joc.5086](https://doi.org/10.1002/joc.5086).

García-Aranda, M. A., J. Méndez-González and J. Y. Hernández-Arizmendi. 2018. Potential distribution of *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* and *Pinus culminicola* in northeastern Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5(13):3-13. Doi: [10.19136/era.a5n13.1396](https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1396).

- Guisan, A., A. Lehmann, S. Ferrier, M. Austin, ... and T. Hastie. 2006. Making better biogeographical predictions of species' distributions. *Journal of Applied Ecology* 43(3):386-392. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01164.x.
- Gutiérrez-García, J. V., D. A. Rodríguez-Trejo, A. Villanueva-Morales, S. García-Díaz y J. L. Romo-Lozano. 2015. Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. *Agrociencia* 49(2):205-219. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236851008>. (24 de febrero de 2023).
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn and D. H. Lister. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34(3):623-642. Doi: 10.1002/joc.3711.
- Herrera-Soto, G., M. González-Cásares, M. Pompa-García, J. J. Camarero and R. Solís-Moreno. 2018. Growth of *Pinus cembroides* Zucc. in response to hydroclimatic variability in four sites forming the species latitudinal and longitudinal distribution limits. *Forests* 7(7):440. Doi: <https://doi.org/10.3390/f9070440>.
- Jiménez-Valverde, A., M. Rodríguez-Rey and P. Peña-Aguilera. 2021. Climate data source matters in species distribution modelling: the case of the Iberian Peninsula. *Biodiversity and Conservation* 30(1):67-84. Doi: [10.1007/s10531-020-02075-6](https://doi.org/10.1007/s10531-020-02075-6).
- Lembrechts, J. J., J. Lenoir, N. Roth, T. Hattab, A... and I. Nijs. 2019. Comparing temperature data sources for use in species distribution models: From *in-situ* logging to remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 28(11):1578-1596. Doi: [10.1111/geb.12974](https://doi.org/10.1111/geb.12974).
- Livneh, B., T. J. Bohn, D. W. Pierce, F. Munoz-Arriola, ... and L. Brekke. 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the U. S., and Southern Canada 1950-2013. *Scientific Data* 2:150042. Doi: 10.1038/sdata.2015.42.
- Manzanilla-Quijada, G. E., E. J. Treviño-Garza, B. Vargas-Larreta, J. O. López-Martínez y J. M. Mata-Balderas. 2020. Áreas idóneas con potencial para la

- producción de semillas de *Pinus chihuahuana* Engelm. y *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. en México. *Botanical Sciences* 98(2):305-316. Doi: [10.17129/botsci.2514](https://doi.org/10.17129/botsci.2514).
- Marino, J., M. Bennett, D. Cossios, A. Iriarte, ... and S. Walker. 2011. Bioclimatic constraints to Andean cat distribution: a modelling application for rare species. *Diversity and Distributions* 17(2):311-322. Doi: [10.1111/j.1472-4642.2011.00744.x](https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00744.x).
- Nezer, O., S. Bar-David, T. Gueta and Y. Carmel. 2017. High-resolution species-distribution model based on systematic sampling and indirect observations. *Biodiversity and Conservation* 26(2):421-437. Doi: [10.1007/s10531-016-1251-2](https://doi.org/10.1007/s10531-016-1251-2).
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura and A. T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34(1):102-117. Doi: [10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x).
- Phillips, S. J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2):161-175. Doi: [10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x](https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x).
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4):231-259. Doi: [10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026).
- Romero-Sánchez, M. E., A. González-Hernández, R. Pérez-Miranda, E. Velasco-Bautista y F. Moreno-Sánchez. 2017. Efecto del Cambio Climático a nivel local en la distribución potencial de cuatro especies forestales de la Cuenca Río-Bravo-San Juan, Coahuila, México. *Agroproductividad* 10(8):42-47. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1073>. (22 de febrero de 2023).
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, S. A. México, D. F. México. 432 p.

Silva, L. D., E. B. de Azevedo, F. V. Reis, R. B. Elias and L. Silva. 2019. Limitations of species distribution models based on available climate change data: A case study in the Azorean forest. *Forests* 10(7):575. Doi: [10.3390/f10070575](https://doi.org/10.3390/f10070575).

Stewart, S. B., M. Fedrigo, S. Kasel, S. H. Roxburgh, ... and C. R. Nitschke. 2022. Predicting plant species distributions using climate-based model ensembles with corresponding measures of congruence and uncertainty. *Diversity and Distributions* 28(5):1105-1122. Doi: [10.1111/ddi.13515](https://doi.org/10.1111/ddi.13515).

Téllez-Valdés, O., C. Miguel-Talonia, M. E. Suárez-Mota, R. X. Álvarez-Espino y M. M. Hernández-Moreno. 2019. Distribución potencial de las especies Pinaceae (*Pinus*) y Fagaceae (*Quercus*) de México. Informe final SNIB-CONABIO proyecto JM010. Facultad de Estudios Superiores Iztacala y Universidad Nacional Autónoma de México. Tlalnepantla de Reyes, Edo. Méx., México. 26 p. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfJM010.pdf>. (23 de octubre de 2022).

Vanuytrecht, E., H. Wouters, J. Berckmans and K. De Ridde. 2021. Global bioclimatic indicators from 1979 to 2018 derived from reanalysis. Product User Guide. Copernicus Climate Change Service. Reading, WBK, United Kingdom. 40 p. https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/sis-biodiversity/C3S_D427.3.1.1_Product_user_guide-Bioclimatic_indicators ERA5_v2.3.pdf. (23 de octubre de 2023).

Watling, J. I., R. J. Fletcher, C. Speroterra, D. N. Bucklin, ... and F. J. Mazzotti. 2014. Assessing effects of variation in global climate data sets on spatial predictions from climate envelope models. *Journal of Fish and Wildlife Management* 5(1):14-25. Doi: [10.3996/072012-JFWM-056](https://doi.org/10.3996/072012-JFWM-056).

Zhang, Y., J. Tang, G. Ren, K. Zhao and X. Wang. 2021. Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on Maxent model. *Scientific Reports* 11(1):16545. Doi: [10.1038/s41598-021-96041-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-96041-z).

Zhu, C. and D. P. Lettenmaier. 2007. Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico: 1925-2004. *Journal of Climate* 20(9):1936-1946. Doi: [10.1175/JCLI4086.1](https://doi.org/10.1175/JCLI4086.1).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.