



DOI: 10.29298/rmcf.v17i96.1655

Artículo de investigación

Secuencia en la distribución de muérdago enano ante el cambio climático: subcuenca Río Laxaxalpan, Puebla

Sequence in the distribution of mistletoe under climate change: *Laxaxalpan* River sub-basin, state of *Puebla*

Ramiro Pérez Miranda^{1*}, Victor Javier Arriola Padilla¹, Leticia Bonilla Valencia¹, Ángel Emmanuel Cruz Estrada¹, Norma Fernández Alejo², Martha Elena Domínguez Hernández²

Fecha de recepción/Reception date: 27 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 12 de mayo de 2026.

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

²Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: perez.ramiro@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: perez.ramiro@inifap.gob.mx

Resumen

Las plantas parásitas constituyen un factor de deterioro para la salud de los bosques, y en los últimos años su distribución se ha extendido debido a las alteraciones climáticas. El objetivo del presente estudio fue determinar la distribución de la idoneidad actual y futura, bajo escenarios de cambio climático, de *Arceuthobium globosum* en bosques de templados de la subcuenca río Laxaxalpan, Puebla, México. Se utilizó el algoritmo *MaxEnt* y se evaluó el desempeño del modelo mediante los índices *AUC* y *ROC* parcial para el periodo actual. Asimismo, se consideraron los Modelos de Circulación General (MCG): CanESM5-CanOE y GFDL-ESM4 bajo los escenarios SSP126 y SSP370 para el periodo 2041-2060. Se aplicaron pruebas de X^2 con simulación de Monte Carlo para evaluar los cambios en las categorías de idoneidad. La distribución actual mostró una predominancia de áreas con idoneidad baja y nula para el muérdago. En general, los escenarios de cambio climático indicaron un aumento de las áreas con idoneidad nula y la desaparición de las altas, mientras que la superficie con idoneidad media y baja se redujeron significativamente. El análisis X^2 mostró una reducción significativa de las áreas media y alta, con transición hacia las categorías baja y nula. Los resultados sugieren que las condiciones climáticas futuras en el área de estudio dejarán de ser idóneas para la distribución del muérdago enano, lo que evidencia la alta sensibilidad de esta especie parásita ante el cambio climático.

Palabras clave: *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens, áreas idóneas, bosque templado, cambio climático, pinos, plantas parásitas.

Abstract

Parasitic plants are a contributing factor to the decline in forest health, and their distribution has expanded in recent years due to climate change. The objective of this study was to determine the distribution of current and future suitability, under climate change scenarios, of *Arceuthobium globosum* in temperate forests of the *Laxaxalpan* River sub-basin, state of *Puebla*, Mexico. The MaxEnt algorithm was used, and model performance was evaluated using the *AUC* and partial *ROC* indices for the current period. The General Circulation Models (GCMs) CanESM5-CanOE and GFDL-ESM4 were also considered under the SSP126 and SSP370 scenarios for the period 2041-2060. *Chi*-square tests with Monte Carlo simulation were applied to evaluate changes in suitability categories. The current distribution showed a predominance of areas with low and no suitability for mistletoe. Overall, climate change scenarios indicated an increase in areas with no suitability and the disappearance of those with high suitability, while the areas with medium and low suitability decreased significantly. The *chi*-square analysis showed a significant reduction in medium and high suitability areas, with a transition to low and no suitability categories. The results suggest that future climatic conditions in the study area will no longer be suitable for the distribution of dwarf mistletoe, highlighting the high sensitivity of this parasitic species to climate change.

Keywords: *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens, suitable areas, temperate forest, climate change, pines, parasitic plants.

Introducción

Las plagas afectan tanto a las plantas como a los animales (Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria [CIPF]; 2018); en el ámbito forestal, una plaga se define como un organismo vivo capaz de causar daños a los árboles, los bosques o los productos forestales. Estas incluyen insectos, arañas, nemátodos, hongos, bacterias, virus, herbáceas, mamíferos, aves, plantas parásitas y otros organismos (Nair, 2007). En México, la superficie afectada por plagas en el 2024 fue de 87 645 ha, distribuida en agentes causales de daños por: plantas parásitas (66.4 %), insectos descortezadores (19.2 %), insectos defoliadores (9.0 %), insectos barrenadores (2.2 %), enfermedades (2.0 %) y otras plagas (1.2 %) (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2025). Entre las principales afectaciones causadas por estas se incluye la disminución del crecimiento, el debilitamiento y la muerte de la planta; además, facilitan el ataque por otros agentes bióticos.

El cambio climático es uno de los principales factores que influyen en la fluctuación y redistribución geográfica de las poblaciones (Cambrón-Sandoval *et al.*, 2018), ya que las modificaciones en los patrones de temperatura y precipitación alteran los procesos metabólicos de las plantas, generan estrés fisiológico y favorecen el desarrollo de plagas. Por tal motivo, es importante determinar el nivel de riesgo de estos agentes patógenos, especialmente para la implementación de medidas de mitigación.

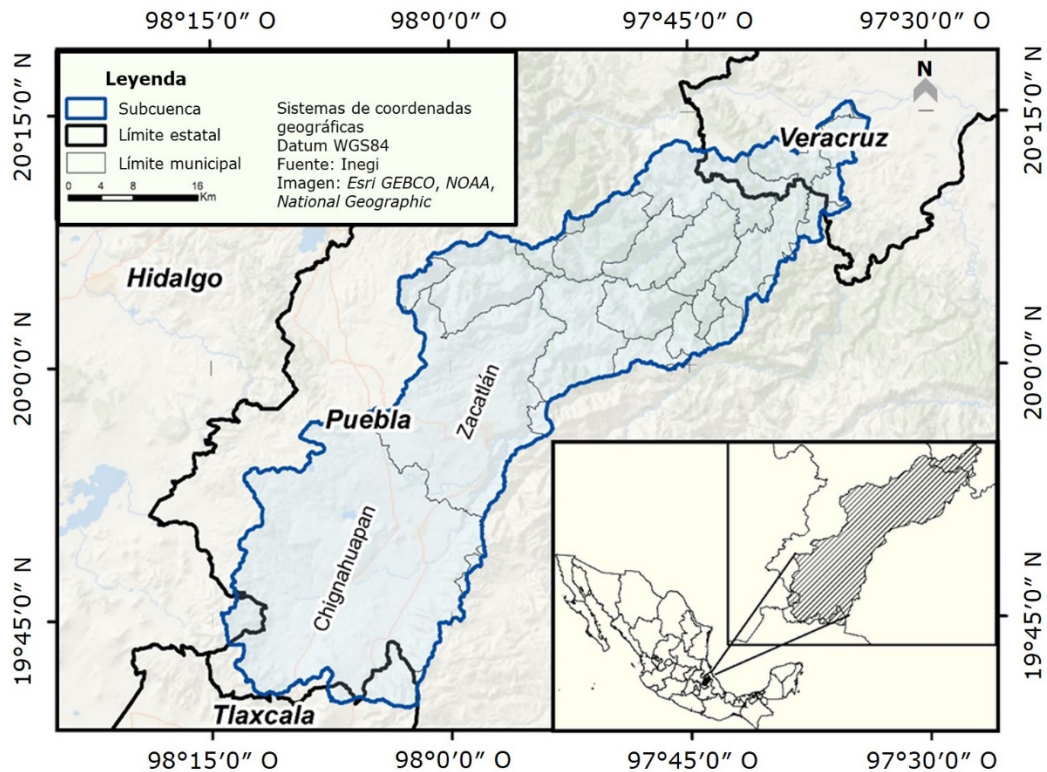
La subcuenca del río Laxaxalpan, ubicada en la Sierra Norte de Puebla, es de relevancia forestal e hídrica. Sin embargo, como en la mayoría de los ecosistemas forestales del país, los bosques de pinos han sido afectados por diversas plagas, entre ellas insectos descortezadores (Curculionidae) y plantas parásitas (Santalaceae) (Cibrián-Tovar, 2011). El muérdago enano, *Arceuthobium globosum* subsp. *grandicaule* Hawksw. & Wiens, se presenta en 14 especies de pinos; es una de las plantas parásitas con mayor distribución en México y afecta, principalmente, en el crecimiento del árbol y en el valor comercial de la madera (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007). Su ciclo biológico es similar al de otras especies, comprende una fase endofítica prolongada dentro del tejido del árbol y una fase aérea reducida, en la que desarrolla estructuras reproductivas. Los brotes pueden ser verdes o amarillos, con tamaño promedio de 18 a 50 cm, pero alcanzan hasta 70 cm de altura. De su hospedante obtiene agua y sustancias minerales mediante estructuras especializadas, denominadas haustorios (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007).

En este contexto, el monitoreo de la sanidad de los bosques es imprescindible para la prevención y control de posibles infestaciones masivas. La aplicación de modelos de distribución de especies resulta fundamental para identificar áreas con riesgo de presencia de plagas, para desarrollar estrategias de monitoreo y manejo, contribuyendo así a la preservación de la salud de los ecosistemas forestales. Por consiguiente, el presente estudio tuvo por objetivo determinar la distribución de la idoneidad actual y futura, bajo escenarios de cambio climático, de *Arceuthobium globosum* en bosques de templados en la subcuenca del río Laxaxalpan, Puebla, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La subcuenca del río Laxaxalpan, ubicada en las cuencas Necaxa y Tecolutla, se localiza entre los paralelos $20^{\circ}15'34.567''$ y $19^{\circ}39'54.631''$ latitud norte y meridianos $98^{\circ}14'25.232''$ y $97^{\circ}33'31.084''$ longitud oeste. Comprende, principalmente, la Sierra Norte del estado de Puebla y, en menor medida, los estados de Hidalgo, Tlaxcala y Veracruz; cubre una extensión de $1\,608.95\text{ km}^2$ (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2018) (Figura 1).



Fuentes: Inegi (2018) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2011).

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

La subcuenca se localiza entre las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico Transversal y Sierra Madre Oriental. Presenta un intervalo altitudinal de 15 m en Veracruz a 3 489 m en Puebla. La configuración del terreno está conformada por sierras y lomeríos, con una baja proporción de llanuras (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2001). Los climas predominantes son cálidos húmedos Am(f) y Af(m), semicálidos húmedos (A)C(fm), templado húmedo C(m) y C(fm), templado subhúmedo C(w₁)(w) y C(w₂), semifrío subhúmedo C(E)(w₂)(w) y semifrío subhúmedo C(E)(w₂) (García & Conabio, 1998). La precipitación total anual en la subcuenca varía de 2 600-3 500 mm, y la temperatura promedio anual de 12 a 24 °C (García & Conabio, 1998). Los tipos de vegetación que destacan son bosques de pino (*Pinus* spp.), de pino-encino (*Pinus-Quercus*) y mesófilo de montaña (Inegi, 2021).

Datos y variables bioclimáticas predictoras actuales

Se integraron registros de presencia georreferenciados de *A. globosum* a partir de informes técnicos fitosanitarios y de repositorios de biodiversidad de acceso abierto (Global Biodiversity Information Facility [GBIF], 2025; iNaturalist, 2024). Se utilizaron 23 variables predictoras: 19 de tipo bioclimático derivadas de las temperatura y precipitación de datos climáticos históricos provenientes de la plataforma *WorldClim* (Fick & Hijmans, 2017), tres topográficas (altitud, exposición y pendiente) generadas del procesamiento del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) disponible en la plataforma del Inegi (Inegi, 2023) y una del índice de humedad de *Lang* (Álvarez, 1992) (Cuadro 1). Todas las coberturas se ajustaron a una misma resolución (926 m², aproximadamente), al sistema de coordenadas geográficas y *Datum* WGS 1984. Se realizó una evaluación estadística de las variables predictoras mediante un análisis de correlación de *Pearson* de $r \leq \pm 0.8$ (Manzanilla-Quñones *et al.*, 2019), en el módulo *Niche Toolbox* en *RStudio*® (Osorio-Olvera *et al.*, 2020).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas de *WorldClim*.

Código	Variable bioclimática	Unidades	Fuente
BIO1	Temperatura promedio anual	°C	Fick y Hijmans (2017)
BIO2	Intervalo diurno de temperatura	°C	
BIO3	Isotermalidad $\left(\frac{BIO1}{BIO7} \times 100\right)$	-	
BIO4	Estacionalidad en temperatura	%	
BIO5	Temperatura máxima del periodo más caliente	°C	
BIO6	Temperatura mínima del periodo más frío	°C	
BIO7	Intervalo anual de temperatura $(BIO5 - BIO6)$	°C	
BIO8	Temperatura media en el trimestre más lluvioso	°C	
BIO9	Temperatura media en el trimestre más seco	°C	
BIO10	Temperatura media en el trimestre más caluroso	°C	
BIO11	Temperatura media en el trimestre más frío	°C	Inegi (2023)
BIO12	Precipitación anual	mm	
BIO13	Precipitación en el periodo más lluvioso	mm	
BIO14	Precipitación en el periodo más seco	mm	
BIO15	Estacionalidad de la precipitación	%	
BIO16	Precipitación en el trimestre más lluvioso	mm	
BIO17	Precipitación en el trimestre más seco	mm	
BIO18	Precipitación en el trimestre más caluroso	mm	
BIO19	Precipitación en el trimestre más frío	mm	
20	Altitud	M	
21	Exposición	N, S, E, O	
22	Pendiente	%	
23	Índice de humedad (<i>IH</i>)	Adimensional	

Variables bioclimáticas predictoras de escenarios de cambio climático

Las variables bioclimáticas de los dos modelos de Circulación General (MCG): (1) CanESM5-CanOE (*Canadian Earth System Model v.5-“Canadian Ocean Ecosystem Model”*) y (2) GFDL-ESM4 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Model version 4.1*), fueron adquiridas de la página electrónica de *Worldclim* (WorldClim, 2023), para los escenarios de cambio climático SSP126 y SSP370, y para el horizonte temporal 2041-2060. El SSP126 representa un escenario de mitigación intensiva, con bajas emisiones, mientras que el SSP370 corresponde a un escenario de emisiones más elevadas; su inclusión permite acotar el intervalo de variación de la idoneidad climática y comparar la sensibilidad de la especie ante distintos niveles de forzamiento.

Métodos de modelación

Las distribuciones de la idoneidad de las especies de plaga fueron generadas mediante el algoritmo *MaxEnt* 3.4.4. (Phillips, 2010), en el cual se introdujo la base de datos de registros de presencia de la plaga y las variables ambientales. Se marcaron las opciones de *Create response curves*, para visualizar las formas de respuesta de las variables; *Make pictures of predictions*, para la salida de imágenes de proyección geográfica de los resultados del modelo; y *Do Jackknife to measure variable importance*, que permite un análisis de la contribución de cada variable a las características finales del modelo. El formato de salida fue tipo logístico. En el apartado *Settings* en los parámetros de *MaxEnt* se aplicaron 75 % de los datos de presencia para entrenamiento del modelo y 25 % para validación, con 500 interacciones mediante el método de validación cruzada. Para la distribución de la idoneidad con escenarios de cambio climático se agregaron las variables de cada Modelo de Circulación General en el apartado *Projection layers directory file* (Conabio, 2023; Phillips, 2010).

Evaluación del modelo y umbral de corte

La evaluación de la capacidad predictiva de los modelos de distribución se llevó a cabo con la métrica Área Bajo la Curva (*AUC*) del análisis de la Curva Característica Operativa del Receptor (*ROC*), para medir el desempeño de los modelos de clasificación (Peterson et al., 2011). Para ello se utilizó *NicheToolBox* del paquete del lenguaje *R* con un error de omisión de 0.05 (Peterson et al., 2008).

Los mapas de salida que genera *MaxEnt* corresponden a datos de probabilidad de presencia según el umbral logístico; estos fueron reclasificados en cuartiles con base en lo sugerido por Chakraborty et al. (2016), en cuatro categorías de idoneidad: nula (0-25 % de probabilidad de ocurrencia), baja (25-50 %), media (50-75 %) y alta (75-100 %). Posteriormente, a los mapas de distribución reclasificados se les realizó un recorte usando los polígonos de bosques templados (de pino, mixtos: encino-pino y pino-encino) en diferentes sucesiones, donde prospera la planta parásita bajo estudio, para ello se usó la capa de uso de suelo vegetación Serie VI (Inegi, 2021).

Análisis X^2 de cambios temporales

Se realizó un análisis de X^2 en el programa estadístico *R* versión 4.4.1 (R Core Team, 2025), para ello se consideró una tabla de contingencia con las frecuencias correspondientes a las clases de idoneidad (nula, baja, media y alta) de los periodos 1970-2000 y 2041-2060, bajo los escenarios previamente seleccionados. Debido a que las distribuciones de frecuencias no cumplieron con los supuestos de normalidad, la significancia del estadístico X^2 se estimó mediante una simulación de Monte Carlo

con 10 000 permutaciones, lo que permitió obtener una estimación robusta de la distribución nula del estadístico X^2 . Este procedimiento consistió en realizar una aleatorización de las frecuencias observadas entre las categorías y los periodos, en cada iteración se calcula el valor de X^2 y se compara el valor máximo y mínimo generado empíricamente (Van Geert *et al.*, 2012).

Resultados

Validación del modelo de distribución de la idoneidad de *A. globosum*

Se obtuvieron valores de *AUC* de 0.973 para los datos de entrenamiento y 0.957 para la prueba de validación del modelo. La prueba de *ROC* parcial fue de 1.956, lo cual indica que el desempeño estadístico es confiable. Las variables más influyentes en la construcción del modelo fueron la temperatura media anual (*BIO1*) y el índice de humedad de *Lang* (*IH*).

Distribución de la idoneidad actual de *A. globosum*

Los resultados mostraron que las áreas con idoneidad alta actuales se localizan principalmente en la zona sur, por encima de los 3 200 m de altitud. La categoría de idoneidad media se ubica entre los 2 900 y 3 200 m de altitud, mientras que la baja se sitúa por debajo de los 2 900 m de altitud (Figura 2).

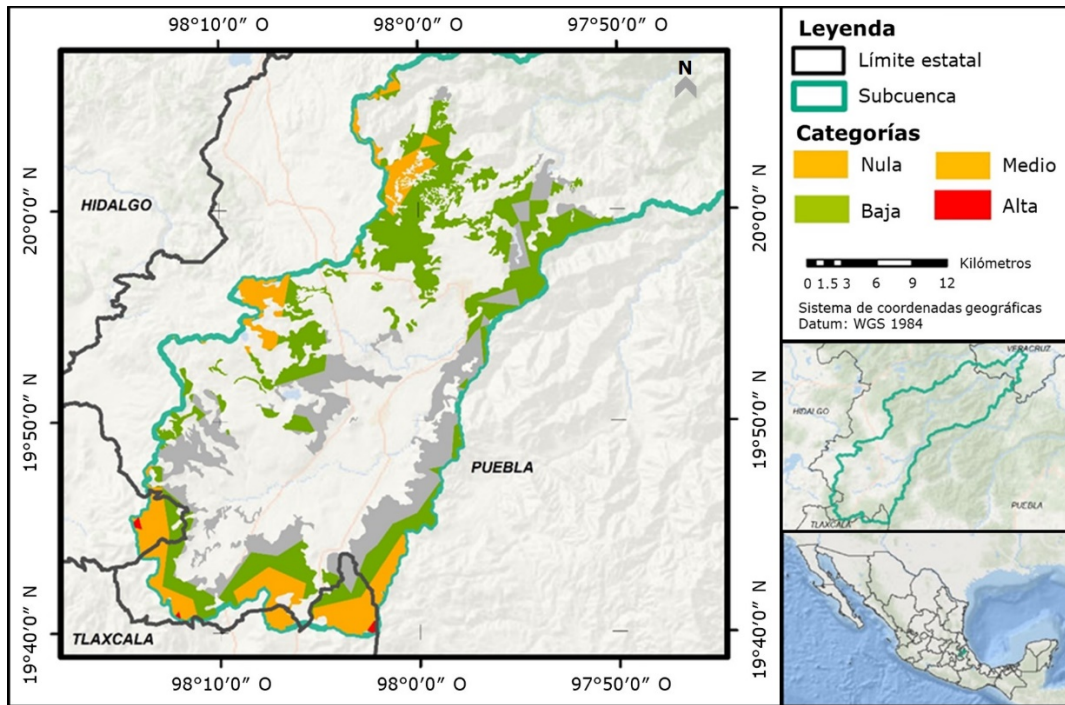


Figura 2. Distribución de la idoneidad actual de *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens con el método de *MaxEnt*.

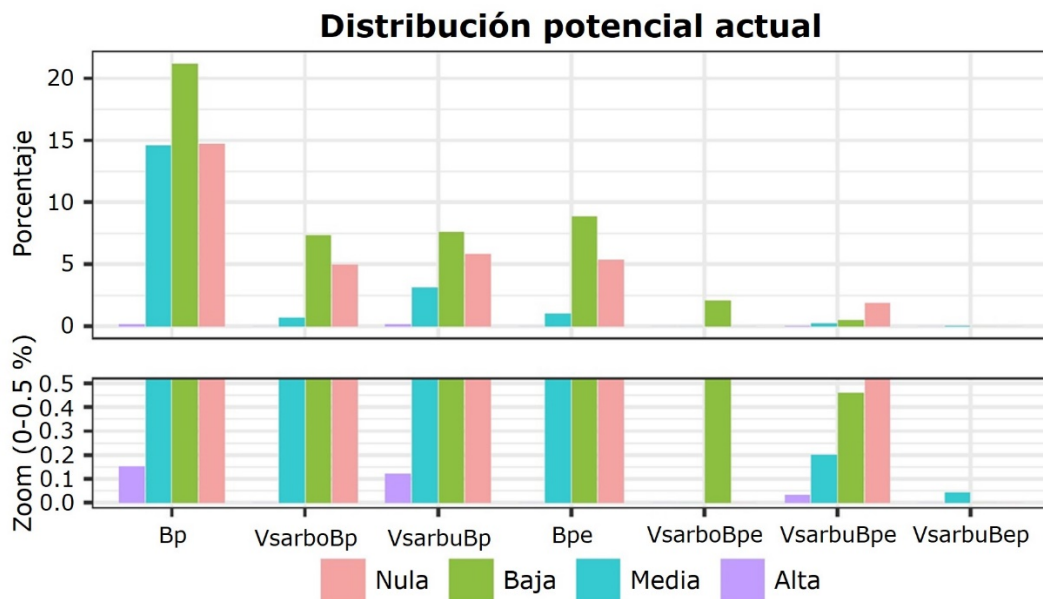
Las superficies con categorías de distribución idóneas de *A. globosum* en la subcuenca se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Superficie y porcentaje por categoría de idoneidad actual de *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens en la subcuenca Laxaxalpan.

Categoría	Superficie en km ²	Superficie en %
Alta	1.23	0.30
Media	81.05	19.59
Baja	196.05	47.40
Nula	135.22	32.69
Total	413.55	100.00

Se observa que la distribución conjunta alta, media y baja de la especie cubre la mayor superficie del área de estudio (67.28 %), mientras que la categoría baja es, por si sola, la de mayor extensión; en contraparte, la alta no representa ni 0.5 %.

La distribución actual de la planta parásita por tipo de sucesión de vegetación se puede observar en la Figura 3. Los datos indicaron que 54.69 % de la superficie (alta, media y baja) del área de estudio está en diferentes tipos de sucesiones del bosque de pino, y 12.60 % en las sucesiones del bosque mixto. La distribución (alta, media y baja) de la plaga que se encuentra en bosque primario de pino corresponde a 35.90 %, 21.6 % en bosques perturbados de pino y mixtos, y 9.79 % en bosque primario mixto.



Bp = Bosque de pino; Vsarbo = Vegetación secundaria arbórea; Vsarbu = Vegetación secundaria arbustiva; Bpe = Bosque de pino-encino; Bep = Bosque de encino-pino.

Figura 3. Porcentaje de cada categoría en la distribución de la idoneidad actual de *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens por tipos de vegetación.

Distribución de la idoneidad bajo escenarios de cambio climático

Las distribuciones pronosticadas de la plaga para el futuro con el modelo CanESM5-CanOE y GFDL-ESM4 se presentan en la Figura 4. En general, ambos escenarios de cambio climático mostraron una contracción espacial de la idoneidad ambiental de la especie de estudio, en comparación con la distribución actual.

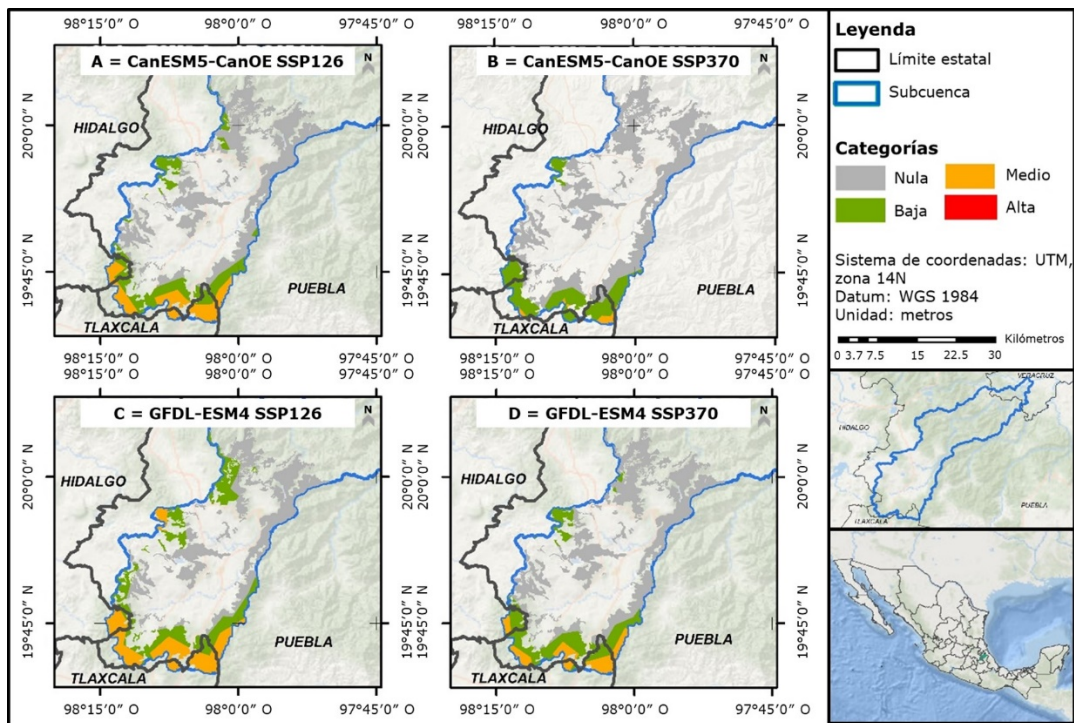


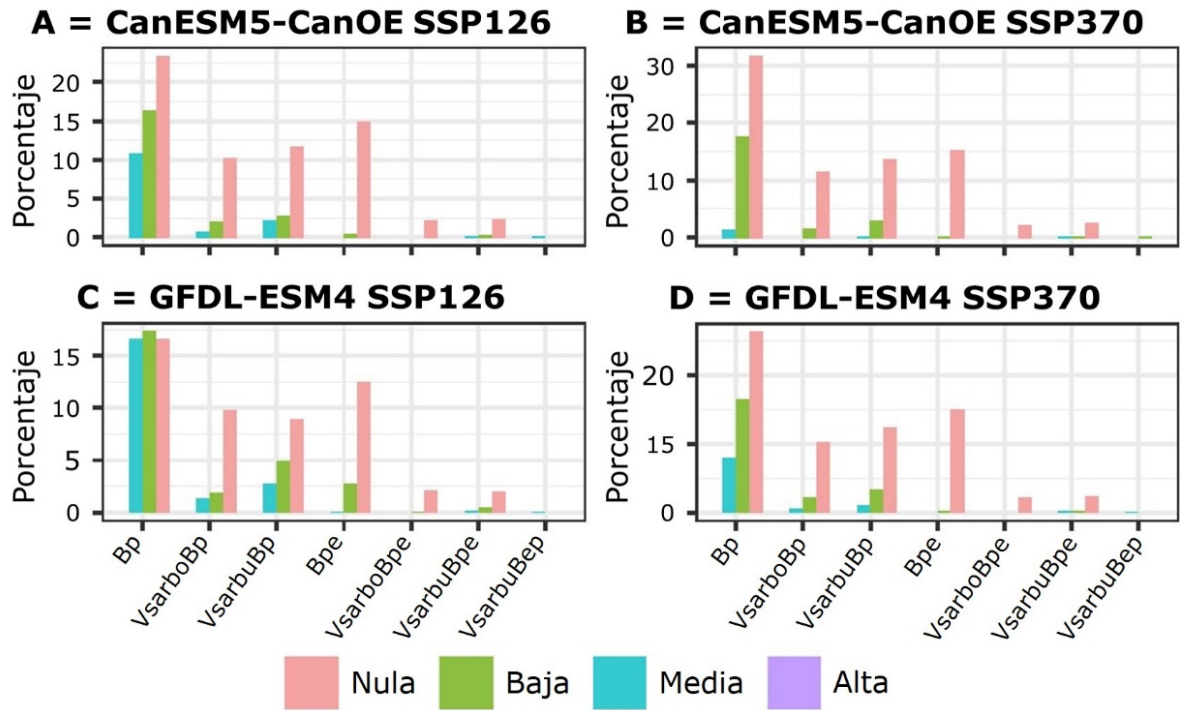
Figura 4. Mapas de distribución de idoneidad de *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens con dos modelos de circulación general y dos escenarios climáticos.

En la Figura 4A se observa el escenario SSP126, donde la configuración espacial se desplaza hacia el sur, a mayor altitud, con respecto a la distribución actual. La categoría media se ubica por arriba de los 2 800 m de altitud, la baja entre 2 600 y, en algunas partes, los 3 000 m de altitud, y la alta desaparece en la cuenca.

En la Figura 4B, correspondiente al escenario SSP370, la configuración del muérdago se reduce en mayor proporción en comparación con el escenario SSP126. La mayor contracción observada en SSP370 sugiere un efecto más severo del forzamiento climático sobre la distribución de idoneidad de la plaga. La categoría media asciende por arriba de los 3 200 m de altitud, la baja entre 2 800 a 3 200 m de altitud y la alta desaparece. Lo anterior indica una restricción marcada del nicho ecológico del muérdago bajo escenarios de mayor emisión.

Las distribuciones con el modelo de circulación general GFDL-ESM4 se presentan en la Figura 4C y 4D. En la Figura 4C, correspondiente al escenario SSP126, el área proyectada del muérdago se reduce y se concentra en las partes altas y sur, con respecto a la distribución actual. La categoría media cambia por arriba de los 2 800 m de altitud, la baja entre 2 600 y 2 800 m de altitud y la alta ya no figura en la cuenca. En la Figura 4D del SSP370, la configuración del muérdago disminuye aún más que en el escenario SSP126, con desplazamientos hacia las zonas altas con respecto a la distribución actual. La categoría media se ubica por arriba de los 2 900 y 3 000 m de altitud, la baja entre 2 700 a 2 800 m de altitud y la alta desaparece de la cuenca.

En la Figura 5A se exponen las diferencias porcentuales de las áreas de distribución; los resultados del modelo CanESM5-CanOE, en el escenario SSP126, evidenciaron que el bosque de pino concentra 34.93 % de la distribución y el bosque mixto 0.71 %. En términos comparativos, estos valores representan una reducción de 19.76 % y 11.89 %, respectivamente, con respecto a la distribución actual.



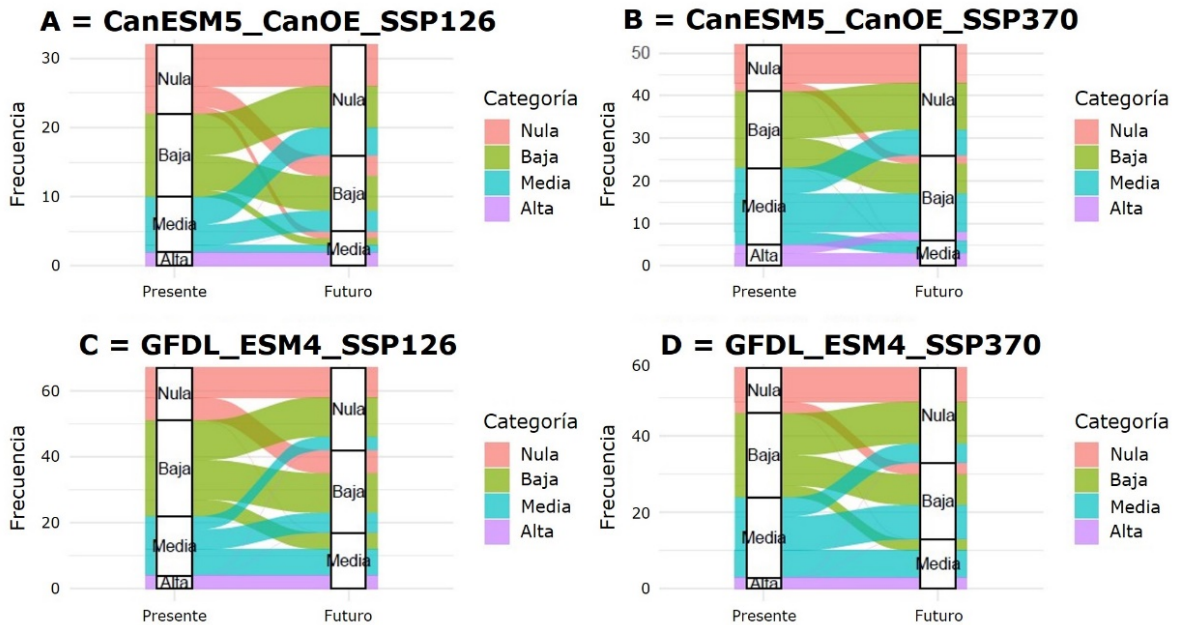
Bp = Bosque de pino; Vsarbo = Vegetación secundaria arbórea; Vsarbu = Vegetación secundaria arbustiva; Bpe = Bosque de pino-encino; Bep = Bosque de encino-pino.

Figura 5. Porcentaje por categoría de la distribución de idoneidad de *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens con dos modelos de circulación general y dos escenarios climáticos, por tipo de vegetación.

En la Figura 5B, los resultados del modelo CanESM5-CanOE, escenario SSP370, por tipo de vegetación, muestra que los del bosque de pino concentra 23.43 % de la distribución y el bosque mixto 0.20 %. Estos valores representan una disminución de 31.24 % y de 12.40 %, respectivamente, con respecto a la distribución actual. Los resultados de la Figura 5C, correspondientes al MCG GFDL-ESM4 y al escenario SSP126, indican que, por tipo de vegetación, el bosque de pino concentra 44.78 % de la distribución y el bosque mixto 3.33 %. Estos valores exhiben una reducción de 9.91 % y de 9.27 %, respectivamente, con respecto a la distribución actual. En la Figura 5D, los resultados del escenario SSP370 muestran que el bosque de pino concentra 31.25 % de la distribución.

Análisis de contingencias de la distribución de la idoneidad

Las pruebas de X^2 con simulación de Monte Carlo evidenciaron, en los cuatro modelos climáticos, una tendencia significativa de disminución de las condiciones favorables para *A. globosum*. Se observó una transición progresiva desde categorías de media y alta hacia categorías baja y nula, por lo que se predice una pérdida consistente de áreas adecuadas en el periodo futuro (2041-2060) (Figura 6). CanESM5-CanOE SSP370 muestra una intensificación de este proceso bajo escenarios más severos, con una marcada disminución de áreas con idoneidad intermedia, que pasan a categoría baja (Figura 6B). En contraste, GFDL-ESM4 conserva una mayor proporción de áreas en categorías intermedias, lo que sugiere una respuesta menos severa ante los cambios ambientales proyectados (Figura 6). Esto probablemente presenta una tolerancia relativa a condiciones de temperatura, lo que mantiene ciertas áreas dentro de su nicho climático estimado. La mayor idoneidad proyectada por el modelo GFDL-ESM4, en comparación con CanESM5-CanOE, puede atribuirse a que el primero tiende a conservar condiciones climáticas intermedias en regiones donde *A. globosum* encuentra intervalos ambientales favorables. Asimismo, se observa una tendencia general hacia el aumento de la idoneidad baja y nula en el futuro, especialmente bajo el escenario SSP370.



CanESM5_CanOE_SSP126: $X^2=184.32$, $p<0.0001$; CanESM5_CanOE_SSP370: $X^2=203.71$, $p<0.0001$; GFDL_ESM4_SSP126: $X^2=193.55$, $p<0.0001$; GFDL_ESM4_SSP370: $X^2=222.11$, $p<0.0001$. A = CanESM5-CanOE SSP126; B = CanESM5-CanOE SSP370; C= GFDL-ESM4 SSP126; D = GFDL-ESM4 SSP370.

Figura 6. Transiciones entre niveles de idoneidad presente y futura (2041-2060) para *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens bajo dos modelos de circulación general y dos escenarios climáticos.

En general, el escenario SSP370 con el MCG GFDL-ESM4 proyecta la mayor pérdida de idoneidad, con transiciones dominantes hacia categorías nula y baja; es decir, existe un menor riesgo de presencia de *A. globosum* en los bosques templados del área bajo estudio. En contraste, el escenario SSP126 con CanESM5-CanOE genera cambios más moderados, con cierta persistencia en media y alta; en otras palabras, representa un aumento de riesgo para los bosques.

Discusión

La validación del modelo de distribución de idoneidad, de acuerdo con Peterson *et al.* (2011), evidencia que los valores de *AUC* para los datos de entrenamiento (0.973) y para la validación del modelo (0.957) se catalogan como buenos predictores. La prueba *ROC* (1.956) indica un desempeño estadístico confiable, de acuerdo con Peterson *et al.* (2008). Respecto a la distribución actual, Endara-Agramont *et al.* (2023) señalan que el intervalo altitudinal en el que se presenta *A. globosum* oscila entre los 2 450 a 4 000 m.

La similitud entre los patrones de distribución proyectados por los MCG's: CanESM5-CanOE y GFDL-ESM4 demuestra que las tendencias observadas son robustas frente a la variabilidad entre modelos climáticos (Eyring *et al.*, 2016). Sin embargo, la mayor proporción de áreas con distribución idónea proyectadas por GFDL-ESM4, en comparación con CanESM5-CanOE, puede deberse a diferencias en la representación de los gradientes climáticos en zonas montañosas del área de estudio, donde el muérdago encuentra condiciones microclimáticas favorables, puesto que existirían espacios que podrían funcionar como refugios climáticos (Kearney & Porter, 2009).

Los cambios proyectados en la distribución de la idoneidad de *Arceuthobium* sp. bajo escenarios de cambio climático, respecto a la distribución actual, indican que la especie está estrechamente asociada a intervalos específicos de altitud y clima, en particular a la temperatura media anual y a la duración del periodo de crecimiento, lo que limita su presencia fuera de condiciones ambientales adecuadas (Ramírez-Dávila & Porcayo-Camargo, 2009).

Diversos estudios han documentado que los cambios en temperatura y precipitación inducen desplazamientos altitudinales del muérdago hacia zonas más frías y elevadas, como respuesta a la pérdida de condiciones climáticas óptimas en cotas inferiores (Nickrent, 2002). De acuerdo con Sosa-Díaz *et al.* (2018), entre las variables climáticas, la temperatura mínima promedio del periodo más frío del año es la más relevante para la distribución de muérdagos enanos en el país. La reducción que se

presenta bajo escenarios de cambio climático (9.91 % y 9.27 %) con respecto a la distribución actual, con la mayor proporción en el bosque de pino, sugiere condiciones relativamente más favorables para el establecimiento del muérdago (Körner, 2007).

En el análisis de contingencia en los cambios en la distribución de la especie, las pruebas de X^2 con simulación de Monte Carlo mostraron una disminución de las condiciones favorables para *A. globosum* en la subcuenca. Esto sugiere que el cambio climático reduciría la expansión de esta planta parásita, lo que podría representar una menor amenaza para sus hospederos en el periodo 2041-2060. (Kearney & Porter, 2009). La pérdida de idoneidad con transiciones dominantes (nula y baja) en el escenario SSP370 con el MCG GFDL-ESM4, proponen menor riesgo de presencia de *A. globosum* en los bosques templados del área bajo estudio, debido a un escenario con mayor emisión CO₂ y alta deforestación. Mientras que, los cambios más moderados, con cierta persistencia en las categorías media y alta bajo el escenario SSP126 con CanESM5-CanOE, indican un aumento del riesgo para los bosques, debido a que este escenario considera acciones de mitigación en la emisión de CO₂ y mayor control en la deforestación, entre otros factores (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

Conclusiones

Los modelos de distribución de idoneidad de la especie están determinados, principalmente, por las variables bioclimáticas precipitación media anual y el índice de humedad. Los modelos generados predicen que las áreas de idoneidad con categoría alta, media y baja de *A. globosum* se concentran en las zonas de mayor altitud de la subcuenca. Los escenarios climáticos futuros indican que las áreas con categoría media tienden a disminuir y la alta a desaparecer, mientras que aumentan las categorías baja

y nula. En conjunto, los modelos proyectados sugieren que la distribución de la idoneidad de *A. globosum* será fuertemente modificada en el futuro, con una reducción de las condiciones favorables para su presencia en los bosques templados de la subcuenca del río Laxaxalpan.

Agradecimientos

Al INIFAP por el financiamiento al proyecto de investigación: "Manejo integrado de recursos forestales para la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático". A la Semarnat, por facilitar la base datos de los registros de las notificaciones de plagas en la región bajo estudio.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución por autor

Ramiro Pérez Miranda: organización de la investigación, análisis de resultados y discusión; Victor Javier Arriola Padilla: redacción y revisión técnica; Leticia Bonilla Valencia: análisis estadístico e interpretación de resultados; Ángel Emmanuel Cruz Estrada: revisión del manuscrito y correcciones; Norma Fernández Alejo: revisión bibliográfica, redacción y análisis de resultados; Martha Elena Domínguez Hernández: revisión del texto.

Referencias

- Álvarez, O. (1992). Sectores climáticos de Cuba. Aplicación del Método de Lang. *Revista Cubana de Meteorología*, 5(2), 10-19.
- Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J., Ledesma-Colunga, M. C., Luna-Soria, H., García-Aranda, M. A., Cerano-Paredes, J., Obregón-Zuñiga, J. A., & Vergara-Pineda, S. (2018). *Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México* (Fondo Sectorial CONAFOR-CONACyT-2014, C01-234547 Sectorial CONAFOR-CONACyT-2014, C01-234547). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Comisión Nacional Forestal. https://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/09%20Manuales%20t%C3%A9cnicos/Libro_Variabilidad_Clim%C3%A1tica_Din%C3%A1mica_Poblacional_Descortezadores.pdf
- Chakraborty, A., Joshi, P. K., & Sachdeva, K. (2016). Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan región. *Ecological Engineering*, 97, 593-609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.006>
- Cibrián-Tovar, D. (2011). Insectos y patógenos que afectan a las áreas arboladas de Puebla. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Coord.), *La Biodiversidad en Puebla. Estudio de Estado* (pp. 287-291). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://smadsot.puebla.gob.mx/images/Biodiversidad_en_Puebla2.pdf
- Cibrián-Tovar, D., Vázquez-Collazo, I., & Cibrián-Tovar, J. (2007). Muérdagos enanos del género *Arceuthobium*. En D. Cibrián-Tovar, D. Alvarado-Rosales & S. E. García-Díaz (Edits.), *Enfermedades forestales en México* (pp. 357-395). Universidad Autónoma Chapingo.
- Comisión Nacional Forestal. (2025). *Reporte nacional de plagas forestales. 01 de enero al 31 de diciembre de 2024*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/Estadisticas%20nacionales%20de%20afectacion/2024/Reporte%20Nacional%20de%20Plagas%20Forestales%2001%20de%20Enero%20al%2031%20Diciembre%20del%202024.pdf>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *División política estatal 1:250 000. 2010* (Catálogo de metadatos geográficos). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/dest_2010gw.html

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2023). *La Dualidad de Hutchinson*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://sites.google.com/site/nichesandareasofdistribution/conceptos-y-teoria/concepts-and-theory>

Endara-Agramont, Á. R., Varo-Rodríguez, R. D., Aguirre-Zúñiga, J. J., & García-Jacinto, F. (2023). *Guía ilustrativa para la identificación de muérdagos en bosques templados de México* (1ra ed.). Aldus. https://www.researchgate.net/publication/378103167_Guia_ilustrativa_para_la_identificacion_de_muerdagos_en_bosques_templados_de_Mexico

Eyring, V., Righi, M., Lauer, A., Evaldsson, M., Wenzel, S., Jones, C., Anav, A., Andrews, O., Cionni, I., Davin, E. L., Deser, C., Ehbrecht, C., Friedlingstein, P., Gleckler, P., Gottschaldt, K.-D., Hagemann, S., Juckes, M., Kindermann, S., Krasting, J., ... Williams, K. D. (2016). ESMValTool (v1. 0)–a community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, 9, 1747-1802. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1747-2016>

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

García, E., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1998). *Climas. Catálogo de metadatos geográficos* [Conjunto de metadatos]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>

Global Biodiversity Information Facility. (2025). *GBIF Global Biodiversity Information Facility* [Database]. Global Core Biodata Resource. <https://www.gbif.org>

iNaturalist. (2024). *iNaturalist biodiversity observations database* [Database]. iNaturalist. <https://www.inaturalist.org/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *División política municipal, 1:250 000, 2018* [Catálogo de metadatos geográficos]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie VII (continuo nacional)* [Catálogo de metadatos geográficos]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación* [Mapa interactivo]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas, escala: 1:1 000 000* [Carta fisiográfica]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-31). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Kearney, M., & Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters*, 12, 334-350. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01277.x>
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569-574. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169534707002819>

- Manzanilla-Quiñones, U., Delgado-Valerio, P., Hernández-Ramos, J., Molina-Sánchez, A., García-Magaña, J. J., & Rocha-Granados, M. del C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana*, (126), Artículo e1398. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>
- Nair, K. S. S. (2007). *Tropical forest insect pests. Ecology, impact, and management*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542695>
- Nickrent, D. L. (2002). Parasitic plants of the world. In J. A. López-Sáez, P. Catalán & L. Sáez (Eds.), *Parasitic Plants of the Iberian Peninsula and Balearic Islands* (pp. 7-27). Mundi-Prensa Libros, S. A., Madrid. https://www.researchgate.net/publication/265579731_Plantas_parasitas_en_el_mundo
- Osorio-Olvera, L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Peterson, A. T., Falconi, M., Contreras-Díaz, R. G., Martínez-Meyer, E., Barve, V., & Barve, N. (2020). NTBOX: An R package with graphical user interface for modelling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(10), 1199-1206. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Bastos-Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press. https://www.researchgate.net/publication/230709994_Ecological_Niches_and_Geographic_Distributions
- Phillips, S. (2010). A Brief Tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*, 3, 108-135. <https://doi.org/10.5531/cbc.linc.3.1.6>
- R Core Team. (2025). *The R Project for Statistical Computing* (Version 4.4.1) [Computer software]. The R Foundation. <https://www.r-project.org/>
- Ramírez-Dávila, J. F., & Porcayo-Camargo, E. (2009). Estudio de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México,

utilizando el Método del SADIE. *Madera y Bosques*, 15(2), 93-111.
<https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521193>

Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. (2018). *Normas internacionales para medidas fitosanitarias. NIMF 5. Glosario de términos fitosanitarios*. Food and Agriculture Organization of United Nations.
https://www.ippc.int/static/media/files/publication/es/2018/07/ISPM_05_2018_Es_2018-07-10_PostCPM13.pdf

Sosa-Díaz, L., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., Cambrón-Sandoval, V. H., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Ruiz-González, C. G., & Montoya-Jiménez, J. C. (2018). Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 187-208. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.159>

Van Geert, P. L. C., Steenbeek, H. W., & Kunnen, E. S. (2012). Monte Carlo techniques: Statistical simulation for developmental data. In S. Kunnen (Ed.), *A dynamic systems approach to adolescent development* (pp. 43-52). Routledge.
<https://research.rug.nl/en/publications/monte-carlo-techniques-statistical-simulation-for-developmental-d/>

WorldClim. (2023). *Future climate data* [Database]. WorldClim.
<https://worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html>



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.