

Potenciales efectos del cambio climático en la distribución potencial de especies arbóreas de bosque templado en Nuevo León, México

Possible effect of climate change on the potential distribution of temperate forest tree species in Nuevo León, Mexico

Gyorgy Eduardo Manzanilla-Quijada^{1*} , Eduardo Javier Treviño-Garza² 

¹Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Av. San Juanito Itzícuaro, s/n, Col. Nueva Esperanza, CP. 58337. Morelia, Michoacán, México.

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional, kilómetro 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México

*Autor de correspondencia: gmanzanilla_quijada@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 25 de mayo 2024

Aceptado: 23 de julio 2024

RESUMEN. El clima está cambiando significadamente en los últimos años y con ello la distribución de las especies. Estimamos el impacto del cambio climático en la distribución potencial de 10 especies arbóreas de bosque templado de Nuevo León, México y definimos áreas de conservación. Estimamos la distribución potencial actual y futura de cada especie a partir de registros y variables ambientales, empleando el 75% de registros para entrenar y 25% para validar los modelos con el algoritmo MaxEnt. Calculamos el área ocupada de las especies y obtuvimos el porcentaje de reducciones e incrementos bajo dos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5) de cambio climático. Los resultados indican valores de AUC arriba de 0.800 para los datos de entrenamiento y validación, las pruebas de ROC parcial presentaron valores superiores a 1.700, mientras que los análisis Z indicaron excelentes rendimientos estadísticos ($p < 0.01$). Nuestros análisis mostraron que, de las especies estudiadas, cuatro experimentaran reducciones significativas en sus áreas de distribución, conservando *A. vejarri* 8 690 ha, *P. pseudostrobus* 6852 ha, *P. teocote* 4 197 ha y *Q. polymorpha* 10 828 ha al año 2050. Las variables con mayor contribución fueron Bio6, Bio7, Bio8 y Bio19, de manera que, la modificación de alguna de estas variables supondría reducciones considerables en sus poblaciones e incluso podría ocurrir algunas extinciones locales. Los resultados demostraron que el cambio climático modificará la distribución de las especies arbóreas. En consecuencia, los administradores de los bosques podrían tomar decisiones e implementar medidas de manejo para la reforestación y la conservación de determinadas especies.

Palabras clave: Áreas de conservación, especies forestales, MaxEnt, manejo forestal, reducción y aumento de áreas.

ABSTRACT. Climate is changing significantly in recent years and with it the distribution of species. We estimated the impact of climate change on the potential distribution of 10 temperate forest tree species in Nuevo León, Mexico and defined conservation areas. We estimated the current and future potential distribution of each species from records and environmental variables, using 75% of the records to train and 25% to validate the models with the MaxEnt algorithm. We calculated the occupied area of the species and obtained the percentage of reductions and increases under two scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) of climate change. The results indicate AUC values above 0.800 for the training and validation data, however, partial ROC tests showed higher values above 1.700, while Z-analyses indicated excellent statistical performances ($p < 0.01$). Our analyses showed that, of the species studied, four will experience significant reductions in their distribution areas, conserving *A. vejarri* 8 690 ha, *P. pseudostrobus* 6852 ha, *P. teocote* 4 197 ha and *Q. polymorpha* 10 828 ha in the year 2050. The variables with the greatest contribution were Bio6, Bio7, Bio8 and Bio19, so that the modification of any of these variables would result in considerable reductions in their populations and could even lead to local extinctions. The results showed that climate change will somehow modify the distribution of tree species. Consequently, forest managers could make decisions and implement management measures for reforestation and conservation of certain species.

Keywords: Reduction and increase of areas, conservation areas, forest species, forest management, MaxEnt.

Como citar: Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ (2024) Posibles efectos del cambio climático en la distribución potencial de especies arbóreas de bosque templado en Nuevo León, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(3): e4189. DOI: 10.19136/era.a11n3.4189.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con aproximadamente 138 millones de hectáreas de vegetación, representando el 70% de su territorio; de esta superficie, el 17% corresponde a bosques de clima templados (CONAFOR 2014). La función ecológica de este tipo de vegetación contribuye a la regulación del clima al actuar como sumideros de gases de efecto invernadero GEI (FAO 2018). La excesiva acumulación de estos gases en la atmósfera está provocando cambios en el clima, prueba de ello, es el aumento de temperatura de 0.87°C registrado en el período de 2006 a 2015 (Allen *et al.* 2018). Pero en 2017 las concentraciones de GEI alcanzaron niveles globales por encima de las 405 ppm de CO₂ (WMO 2018), de continuar esta tendencia, es probable alcanzar un aumento de temperatura media anual global de 1.5°C para 2030 a 2040 (IPCC 2018, Allen *et al.* 2018, Hansen *et al.* 2019). Este aumento de temperatura irá asociado de una disminución de las precipitaciones de hasta el 30% en muchas regiones del mundo (IPCC 2013). Para México se estima una reducción en precipitación del 9% para el 2060 (Sáenz-Romero *et al.* 2010). La alteración de la composición del ecosistema por la extracción de especies, la conversión de uso de suelo, y los incendios forestales, entre otros, provocan debilitamiento y estrés en los árboles, lo que reduce su eficiencia reguladora (Salinas *et al.* 2010) y favorece la incidencia de plagas forestales (Gómez-Pineda *et al.* 2022). Pese a todo esto, el manejo eficaz de los ecosistemas en relación con el cambio climático representa retos para los administradores, manejadores forestales y ecologistas.

En particular, destacan las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*, especies de importancia ecológica y económica, que se distribuyen secuencialmente desde los altos y bajas altitudes de las provincias fisiográficas de México: *Abies vejarii* (2 000-3 300 msnm, Farjon y Styles 1997) catalogado como amenazada (SEMARNAT 2010), *Pinus pseudostrobus* (1 900-3 000 msnm, Farjon y Styles 1997) es de gran importancia económica, *Pinus teocote* (1 500-3 000 msnm, Farjon y Styles 1997), *Quercus canbyi* (650-1 200 msnm, Valencia 2004), *Quercus laeta* (1 900-2 270 msnm, Valencia 2004), *Quercus mexicana* (2 230-2 700 msnm, Valencia 2004), *Quercus polymorpha* (1 900-2 000 msnm, Valencia 2004), *Quercus rugosa* (1 800-2 900 msnm, Valencia 2004), *Arbutus xalapensis* (2 400-3 000 msnm, Farjon y Styles 1997), *Juniperus flaccida* (1 600-2 000 msnm, Farjon y Styles 1997).

A pesar de la abundante diversidad de especies de plantas en México, no significa que estén exentos de alguna amenaza, uno de los más destacados es el impacto del cambio climático que se ha visto reflejado en la alteración de la distribución, tamaño, estructura y abundancia de las especies (Parmesan 2006) o en la desaparición directa de algunas especies y poblaciones (Thomas *et al.* 2004). Esto será más drástico para las especies de ecosistemas geográficamente confinados, sobre todo de montaña, y por ello varias especies tenderán a desplazar su distribución a latitudes y altitudes distintas de las actuales (Gutiérrez y Trejo 2014). Esto es especialmente cierto para las poblaciones de especies arbóreas situadas en los límites xéricos de especies que se encuentran en el límite altitudinal inferior o sur (en el hemisferio norte) de su distribución natural (Mátyás *et al.* 2010). Sin embargo, las modificaciones en el clima podrían superar su capacidad para migrar o sobrevivir en las nuevas condiciones ambientales (Gavilán 2008, Sáenz-Romero *et al.* 2016). Por esta razón, el cambio climático presenta retos importantes para los manejadores de los bosques (Gallardo-Salazar *et al.* 2023). Debido a que las tasas de supervivencia de los árboles disminuyen (Sáenz-Romero *et al.* 2017).

Existen modelos para predecir la distribución de especies (Elith *et al.* 2006), y son representaciones cartográficas de la capacidad de una especie para ocupar un espacio geográfico, determinado en función de variables continuas o categóricas (Guisan y Zimmermann 2000) también llamadas bioclimáticas. Las más utilizadas son las variables climáticas (Felicísimo *et al.* 2012). MaxEnt es un algoritmo basado en el enfoque estadístico de máxima entropía adaptado para la construcción y predicción de modelos de distribución potencial de organismos vivos (especie de interés) utilizando datos de presencia (Phillips *et al.* 2006), esta técnica se aplica para priorizar áreas de conservación biológica (Ávila *et al.* 2014, Martínez-Sifuentes *et al.* 2020), evaluar los efectos del cambio climático (Manzanilla-Quijada *et al.* 2020a, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024a), estimar y delimitar áreas potenciales para la producción de semillas (Manzanilla *et al.* 2019, Manzanilla-Quijada *et al.* 2020b) y modelar la distribución potencial de especies de pinos (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Ramos-Dorantes *et al.* 2017).

La hipótesis de este estudio es que ante escenarios de cambio climático las especies de bosques templados de los géneros *Pinus* y *Quercus* presentaran modificaciones en sus áreas de distribución potencial natural. Para responder dicha hipótesis se planteó el siguiente objetivo, proyectar a través de modelos la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático de 10 especies arbóreas de clima templado del estado de Nuevo León, en México y definir áreas de conservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y especies estudiadas

El estudio se realizó en el estado de Nuevo León, el cual se localiza en la zona noroeste de la República Mexicana, abarcando una superficie de 65 057.17 km², representando el 3.3% del territorio nacional. Entre las coordenadas 27° 47' y 23° 10' latitud Norte y 98° 24' y 101° 12' latitud oeste (Figura 1).

Las especies de estudio (Tabla 1), además de su importancia ecológica y económica, también son de importancia forestal; estas especies se encuentran ubicadas en bosques templados del sistema montañoso de la Sierra Madre Oriental (SMO) principalmente, en altitudes que alcanzan hasta los 3 000 msnm, temperatura media anual de 20°C, temperatura máxima promedio de 32°C (mayo a agosto) y temperatura mínima promedio de 5°C (enero), con precipitación media estatal de 650 mm anuales (agosto y septiembre) (INEGI 2001). En el caso específico de *A. vejarrii* es una especie que se encuentra catalogado como amenazada (SEMARNAT 2010), por lo que la hace más sensible a los efectos del cambio climático.

Origen y recopilación de los datos de presencia

Los registros de cada una de las especies, se tomaron directamente en campo (Sistema montañoso de la SMO) utilizando un GPS, los cuales fueron complementados con puntos de colectas disponibles de diversas fuentes (Tabla 2). La primera fue la base de datos del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad; posteriormente se consultó el repositorio digital del Herbario Nacional de México (MEXU-UNIBIO, UNAM); seguido de la Red internacional e Infraestructura Global de Información de Biodiversidad (GBIF 2020); y de la Red social de ciencia

(NATURALISTA) de la CONABIO. Todos los registros dudosos, tanto taxonómica como geográficamente, fueron cuidadosamente evaluados para su inclusión o eliminación en los análisis. Los datos obtenidos fueron depurados a través de la plataforma Niche ToolBox (Osorio-Olvera *et al.* 2020), excluyendo las coordenadas con información ambigua, duplicadas, mal georreferenciados y dentro de áreas urbanas, dejando una distancia de separación de 1 km² (aprox. ~30 segundos de arco) entre cada uno de los registros (Pearson *et al.* 2007) (Tabla 2).

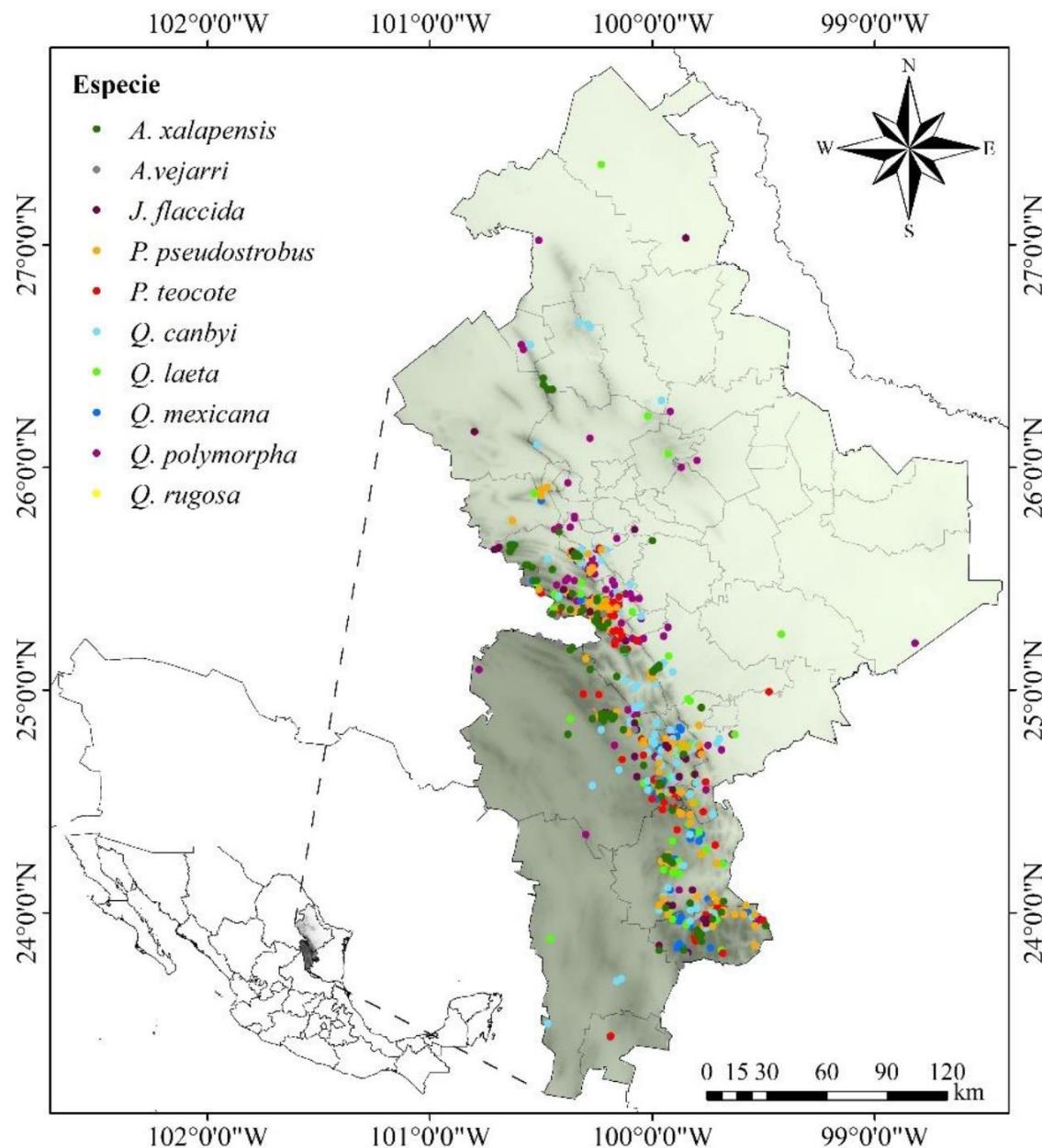


Figura 1. Área de estudio y registro de la presencia de especies arbóreas distribuidas en el estado en Nuevo León.

Tabla 1. Información biológica de las especies en estudio.

Especie	Descripción	Altitud (msnm)	Autor
<i>Abies vejjarii</i> Martínez	Árbol perenne de tamaño medio, alcanza los 35-40 m de altura. Las hojas son de aguja 1-2.5 cm de longitud y 1.3-2 mm de ancho, de color verde-gris con estomas arriba y dos bandas de estomas debajo. Las piñas son púrpura que al madurar tornan marrón de 6-15 cm de longitud y 4-6 cm de ancho, con unos 150-200 frutos, cada uno con una bráctea de 3-8 mm sobre el cono cerrado y dos semillas ladas; se desintegran cuando maduran para lanzar las semillas.	2 000 - 3 300	Farjon y Styles 1997
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	Árbol con altura promedio de 20 a 40 metros, (incluso se habla de ejemplares de hasta 50 metros) y un diámetro de 40 a 80 cm. Las ramas generalmente tienen ubicación horizontal, yemas oblongas-cónicas de color anaranjado. Conos de ovoides a cilíndricos de color café claro, de 10 a 15 cm de largo y curveados, estos se agrupan entre dos y tres en las puntas de la rama.	1 900 - 3 000	Farjon y Styles 1997
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltrd. & Cham	Árbol perennifolio que alcanza alturas de hasta 20 m. La corteza es fisurada de color café grisáceo. Las hojas de 10 a 15 cm y en fascículos de tres, rígidas de color verde oscuro y brillante. Los frutos son conos ovoides de 3.5 a 6.5 cm de largo, de color café claro a café rojizo.	1 500 - 3 000	Farjon y Styles 1997
<i>Quercus canbyi</i> Trel.	Árbol que alcanza un tamaño de entre los 4 a los 15 metros de altura, y el tronco entre 20 a 50 cm de diámetro. Las ramas son largas y flexibles, algo caídas. La corteza es de color marrón verdoso, suave, convirtiéndose en gris oscuro, verrugoso, surcado. Las hojas miden 7,5-10 x 2-3 cm, semiperennifolias o últimamente caducifolias, gruesas, correosas, lanceoladas a estrechamente elípticas.	650 - 1 200	Valencia 2004
<i>Quercus laeta</i> Liebm.	Árbol de hasta 10 metros de altura con un tronco de hasta 40 centímetros (16 pulgadas) de diámetro. Las hojas son de color verde oscuro, gruesas y coriáceas, de hasta 40 cm de largo con algunos dientes poco profundos a lo largo de los bordes.	650 - 1 200	Valencia 2004
<i>Quercus mexicana</i> Bonpl.	Árbol de hoja caduca que crece hasta 15 metros de altura con corteza gris. Las hojas son gruesas y coriáceas, de hasta 12 centímetros de largo, oblongo o con forma de lanza, sin dientes ni lóbulos.	2 230 - 2 700	Valencia 2004
<i>Quercus polymorpha</i> Schltrd. & Cham.	Árbol caducifolio, con una altura que varía de 12 a 20 metros de altura, con copa ancha y redondeada. sus hojas son simples, alternas, ovadas, de base redonda, de 4 a 15 centímetros de largo y 3 a 8 cm. de ancho.	1 900 - 2 000	Valencia 2004
<i>Quercus rugosa</i> Née	Árbol o arbusto bajo (3-8 m), aunque excepcionalmente alcanza los 30 m de altura. Corteza oscura con profundas fisuras que forman escamas; sus hojas son elíptico-ovobadas de margen entero o a veces aserrado, muy rígidas al madurar y notablemente cóncavas por el envés. El fruto es una bellota ovoide pequeña (15-25 mm de largo), angosta y puntiaguda. Crece preferentemente en laderas y barrancas con clima templado subhúmedo.	1 800 - 2 900	Valencia 2004
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	Arbusto o árbol mediano de la familia Ericaceae; perennifolio, que alcanza los 3 m de altura. La corteza se desprende en capas delgadas. Sus hojas delgadas y resistentes de 2-18 cm son brillantes por encima y opacas por debajo. Las flores van de 7-9 mm de largo, son amarillas a blancas. El fruto es una baya roja globosa, menor a 1 cm de diámetro.	2 400 - 3 000	Farjon y Styles 1997
<i>Juniperus flaccida</i> Schltrd.	Árbol o arbusto pequeños de 5 hasta 12 metros de altura, cuyo tronco se ramifica frecuentemente a una altura de 1 a 2 m y con un diámetro de 25 a 50 cm. Copas de forma globosa de hasta 10 m de ancho. Corteza, profundamente fisurada, con placas fibrosas entrelazadas de color grisáceas en su exterior y café rojizas en su interior, dividida en tiras longitudinales. Ramas, extendidas formando una copa redondeada e irregular, las ramas que son secundarias por lo general péndulas y flácidas, con un sistema terminal de ramas foliosas, dispuestas en dos filas verticales opuestas. Hojas, opuestas, con los ápices pegados al tallo y sin punta, el margen irregularmente dentado.	1 600 - 2 000	Farjon y Styles 1997

Obtención y selección de las variables climáticas actuales (período 1910-2009) y futuras (Década 2050).

Se obtuvieron 19 variables climáticas en formato ráster a una resolución de ~30 segundos de arco equivalente a 1 km² por pixel aproximadamente (Tabla 3), información derivada de la interpolación de los registros de las estaciones climáticas mensuales de precipitación, temperatura mínima y máxima, para México del período comprendido entre los años 1910-2009, disponibles en la

plataforma del Centro de Recursos Idrisi-México de la Universidad Autónoma del Estado de México, CRI-UAE-Méx (Cuervo-Robayo *et al.* 2014). Las variables climáticas a futuro se obtuvieron a partir del Modelo de Circulación Global (MCG) del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos con el componente de Dinámica de la Capa Oceánica Generalizada (GFDL_ESM2G). Además, el componente atmosférico de los ESM incluye características físicas como aerosoles (tanto naturales como antropogénicos), física de nubes y precipitación. El MCG se descargó bajo dos escenarios de trayectorias de concentración representativas de gases de efecto invernadero (RCP por sus siglas en inglés) de RCP4.5 y 8.5 para el 2050; donde el primer escenario representa un forzamiento radioactivo de condiciones actuales similares a las proyectadas a futuro considerado como conservador (Fernández *et al.* 2015), el segundo escenario proyecta condiciones donde las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentran en constante aumento considerado como pesimista (Van-Vuuren *et al.* 2011, IPCC 2014). Dichos escenarios fueron seleccionados porque son los que se utilizan para actualizar los estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica (Fernández-Eguiarte *et al.* 2015).

Tabla 2. Procedencia de ejemplares utilizados en la modelación de la distribución de especies.

Clave	Nombre científico	Campo	SNIB	GBIF	IBUNAM-MEXU	Naturalista	Total
Ave	<i>Abies vejjarii</i> Martínez	11	1	26			38
Pps	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	29	36	32	1	34	132
Pte	<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham	7	30	49	1	4	91
Qca	<i>Quercus canbyi</i> Trel.	5	38	71	3	10	127
Qla	<i>Quercus laeta</i> Liebm.	7	42	51	1	2	103
Qme	<i>Quercus mexicana</i> Bonpl.	7	27	40	10		84
Qpo	<i>Quercus polymorpha</i> Schltdl. & Cham.	10	45	82	6	5	148
Qru	<i>Quercus rugosa</i> Née	5	2	2		1	10
Axa	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	16		56	1	13	86
Jfl	<i>Juniperus flaccida</i> Schltdl.	20		11		14	45
Total, general		117	221	420	23	83	864

SNIB: Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad; GBIF: Global Biodiversity Information Facility;
 IBUNAM-MEXU: Herbario Nacional de México bajo custodia del Instituto de Biología de la UNAM.

Se seleccionaron las variables climáticas que no estuvieran correlacionadas entre sí (Tabla 2). Este procedimiento se realizó a través del análisis de multicolinealidad en el programa R studio v. 4.0.3 (R Core Team 2020), empleando el factor de inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés) para seleccionar las variables menos correlacionadas a partir de una matriz con las 19 variables, donde los valores de correlación de Pearson de ≥ -0.85 o $+0.85$ indican problemas de multicolinealidad entre las variables. Todas las variables fueron convertidas a formato ráster ASCII y ajustadas a una resolución espacial aproximada de 1 km^2 (aprox. ~30 segundos de arco) (Tabla 3).

Tabla 3. Variables climáticas empleadas para cada uno de los análisis finales en la modelación de la distribución de las especies en estudio.

Clave	Variables bioclimáticas Unidad (en paréntesis)	Especie									
		Ave	Pps	Pte	Qca	Qla	Qme	Qpo	Qru	Axa	Jfl
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	*	*	*		*	*		*	*	*
Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	*	*		*	*	*	*	*	*	*
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco				*	*		*	*	*	*
Bio10	Temperatura media del trimestre > más caliente					*					
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío							*			
Bio12	Precipitación total anual (mm)		*	*		*			*	*	*
Bio13	Precipitación del mes más húmedo (mm)					*					
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)			*					*	*	
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) (mm)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	*					*	*			
Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)	*				*	*				*
Bio18	Precipitación del trimestre más caliente (mm)		*	*	*	*	*		*	*	*
Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)		*	*	*			*	*	*	*
Total		5	7	7	7	9	8	6	9	9	8

* Selección de variables definitiva (correlación de Pearson de ≥ -0.85 o $+0.85$).

Área de calibración y delimitación del área accesible (M)

La delimitación del área de calibración, denotada por «M» en el diagrama de «BAM», es fundamental en la modelación de nichos y distribución de especies, así como en la generación y transferencia del modelo (Barve *et al.* 2011, Soberón *et al.* 2017) ya que se ha descrito como el espacio donde una especie esta o se asume que podría estar, con base en el conocimiento biológico y su capacidad de dispersión. Para la delimitación del área «M» se empleó el estado de Nuevo León y a partir de esta área se recortaron y ajustaron las variables ambientales a un tamaño de píxel de 1 km² (aprox. ~30 segundos de arco) a través del programa ArcMap v. 10.5. (ESRI 2016).

Generación y validación de los modelos

Se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) v. 3.4.3k (Phillips *et al.* 2006) para construir los modelos de distribución potencial de cada una de las especies. Con 100 réplicas para cada taxa, considerando la regla de aplicación umbral (equal test sensitivity and specificity), un máximo de 1 000 iteraciones, un límite de convergencia de 10^{-5} (valor por omisión) y un replicado interno por *Bootstrap* (Phillips *et al.* 2006). Se omitieron las opciones *Extrapolate* y *Do clamping* con la finalidad de evitar extrapolaciones artificiales en los valores extremos de las variables bioclimáticas (Elith *et al.* 2011). Se consideró el formato de salida del tipo logística de MaxEnt con un umbral de 0 a 1 (0 = no favorable y 1 = totalmente favorable); es decir, mientras el valor se aproxime a 1 las condiciones ambientales serán idóneas para la especie. Se incluyó el 75% de los registros geográficos de la

especie para el entrenamiento del modelo y el 25% restante de los datos para la validación de los modelos. Se estima la contribución relativa de cada variable a través de la prueba de Jackknife (Phillips *et al.* 2006, Cobos *et al.* 2019). Para la generación de los modelos de distribución proyectados a futuro del período 2050 se realizaron de acuerdo con los parámetros del modelo de distribución actual, a los cuales se aplicaron los mismos criterios de evaluación y validación efectuado en el modelo actual.

Los modelos se validaron acorde al desempeño y ajuste estadístico en las pruebas de entrenamiento y validación de la AUC (Area Under the Curve) de la prueba ROC-estándar (Receiver Operating Characteristic) (Phillips *et al.* 2006). Se realizó la prueba de ROC-parcial para subsanar las deficiencias del AUC, este análisis fue efectuado mediante la plataforma Niche ToolBox (Osorio-Olvera *et al.* 2020), utilizando un 50% de los registros re-muestreados en 1000 réplicas Bootstrap y fijando un error de omisión no mayor a 5% (1-omission threshold > 95). Además, se realizó una prueba de Z, lo que brindó de mayor robustez estadística a los modelos.

Distribución potencial actual y futura

Se generaron mapas de distribución potencial de cada especie a través del programa ArcMap v. 10.5 (ESRI 2016), reclasificando las salidas ASCII de los modelos en tres categorías de probabilidad de idoneidad (nula, media y alta) con intervalos iguales, calculando la superficie total por categoría que ocupa cada una de ellas. Para evaluar el potencial impacto del cambio climático en la distribución futura de las especies arbóreas, se obtuvo el porcentaje de cambio (superficie de distribución) por medio de la siguiente fórmula: % de cambio = $[(S_1 - S_0)/S_0] * 100\%$, donde S_0 es la superficie total que ocupan en el área de estudio de acuerdo con el período de referencia actual (1910-2009) y S_1 es la superficie total que se proyecta ocupará en la década centrada en el 2050. Con el fin de visualizar el aumento o reducción de la superficie donde se distribuye las especies dentro de la Sierra Madre Oriental en el estado de Nuevo León.

Áreas aptas para la conservación

La conservación de áreas potenciales de distribución de cada especie, se identificaron mediante la aplicación de un intersección entre las áreas de distribución actual y las áreas proyectadas a futuro. Se optó por emplear solamente las especies que estimaron mayor superficie reducida en los modelos a futuro respecto a la distribución actual, con la finalidad de identificar zonas mínimas de persistencia de distribución de especies, las cuales pudieran ser utilizadas como áreas de conservación (Manzanilla-Quijada *et al.* 2020a, Martínez-Sifuentes *et al.* 2020) las cuales ayudarían a los programas de conservación y restauración.

RESULTADOS

Al final del proceso de depuración se obtuvieron 864 registros únicos, distribuidos entre las 10 taxas, los cuales se encuentran distribuidos dentro de la Sierra Madre Oriental del estado de Nuevo León. La especie con mayor número de registros fueron *Q. polymorpha* (148), seguida de *P. pseudostrobus* (132) en contraste con *Q. rugosa* (10) (Tabla 2).

Validación de los modelos

Los valores del área bajo la curva (AUC) de los datos de entrenamiento y validación en el escenario actual y futuro se estimaron por encima de 0.900 para los 10 taxones (Figura 2). Obteniendo un promedio de AUC en los datos de entrenamiento y validación para todas las especies en el escenario actual de 0.990 y 0.951; en el escenario RCP4.5 fue 0.990 y 0.963; y para el escenario RCP8.5 fue 0.991 y 0.957 respectivamente. Mientras que los valores de las pruebas ROC-parciales reportaron valores por arriba de 1.700 (Figura 2), con promedio para el escenario actual de 1.906; para el escenario RCP4.5 de 1.857; y para el escenario RCP8.5 de 1.851, respectivamente. Por lo que, el desempeño de los modelos fue excelentes, sin embargo, las pruebas del análisis de Z reafirmaron estos resultados, indicando que los modelos son estadísticamente significativos ($p < 0.01$).

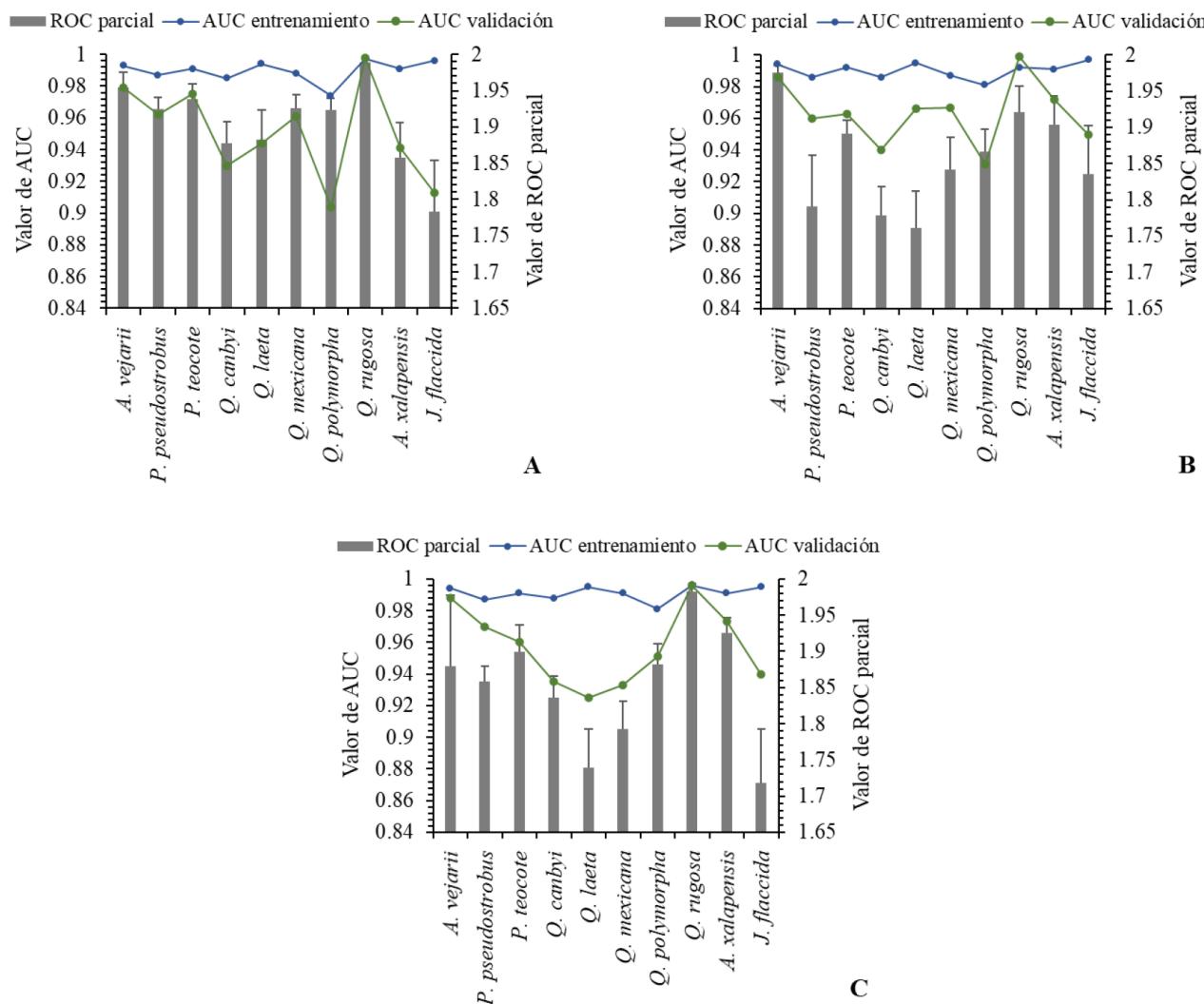


Figura 2. Tendencia de valores AUC con respecto a los valores de ROC-parcial de los modelos de distribución potencial Actual (A) y bajo escenarios de cambio climático RCP4.5 (B) y RCP8.5 (C) al 2050.

Contribución de las variables climáticas

La variable más representativa y con mayor contribución en los modelos fue la Bio8, común para ocho especies en estudio, con rangos de contribución de 36.5 a 89.6% para los escenarios actuales y futuros. La Bio7 fue relevante para las 10 especies (*P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *Q. canbyi*, *Q. laeta*, *Q. mexicana*, *Q. polymorpha*, *Q. rugosa*, *A. xalapensis*, *J. fláccida* y *A. vejarii*) y la segunda variable con mayor contribución, con rangos de 3.2 a 30.3%. La Bio6 fue común para ocho especies (*A. vejarii*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *Q. laeta*, *Q. mexicana*, *Q. rugosa*, *A. xalapensis* y *J. fláccida*) y la tercera variable que más contribuyó, con valores que van de 0.4 a 89%, sin embargo, se aprecia que la temperatura mínima del mes más frío (°C) para *A. vejarii* fue la de mayor contribución tanto en el escenario actual como a futuro. La Bio19 está representada en siete especies (*P. teocote*, *Q. canbyi*, *Q. laeta*, *Q. polymorpha*, *Q. rugosa*, *A. xalapensis* y *J. fláccida*), siendo la cuarta variable con mayor porcentaje de contribución, con rangos de contribución de 0.1 a 19.8% (Figura 3).

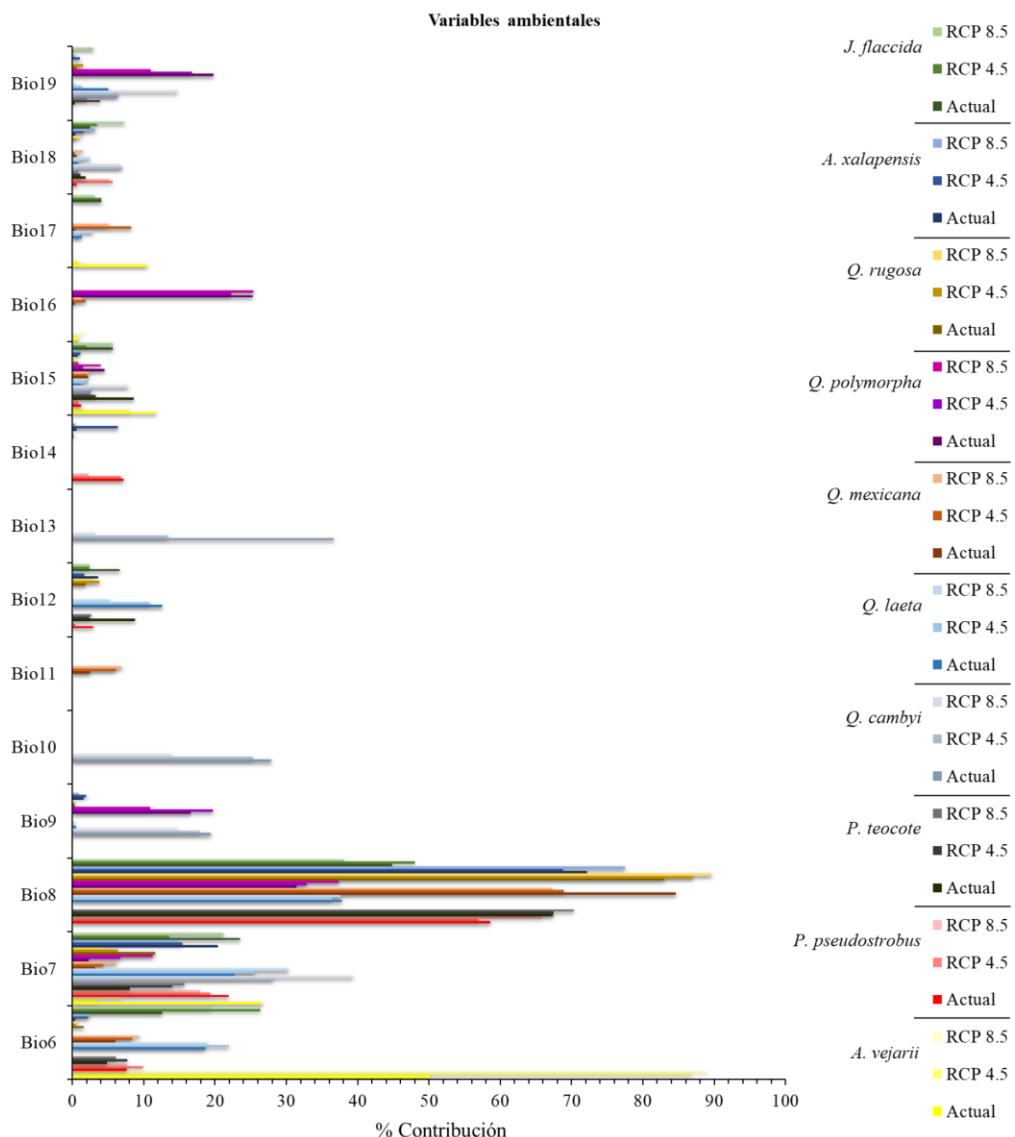


Figura 3. Porcentajes de contribución relativa de las variables climáticas a los modelos de distribución potencial de especies de bosques templados en Nuevo León.

Distribución potencial actual y futuro

Los resultados indican diferentes respuestas de las especies arbóreas al cambio climático. El escenario catalogado como conservador (RCP4.5) reflejan una reducción en las áreas de distribución potencial de *A. vejarii* 19.43%, *P. pseudostrobus* 15.42%, *P. teocote* 30.46% y *Q. polymorpha* 36.53%. Sin embargo, para el escenario considerado como pesimista (RCP8.5) reflejan reducciones para *A. vejarii* de 14.98%, *P. pseudostrobus* 35.76%, *P. teocote* 21.41% y *Q. polymorpha* 5.62% (Figura 4).

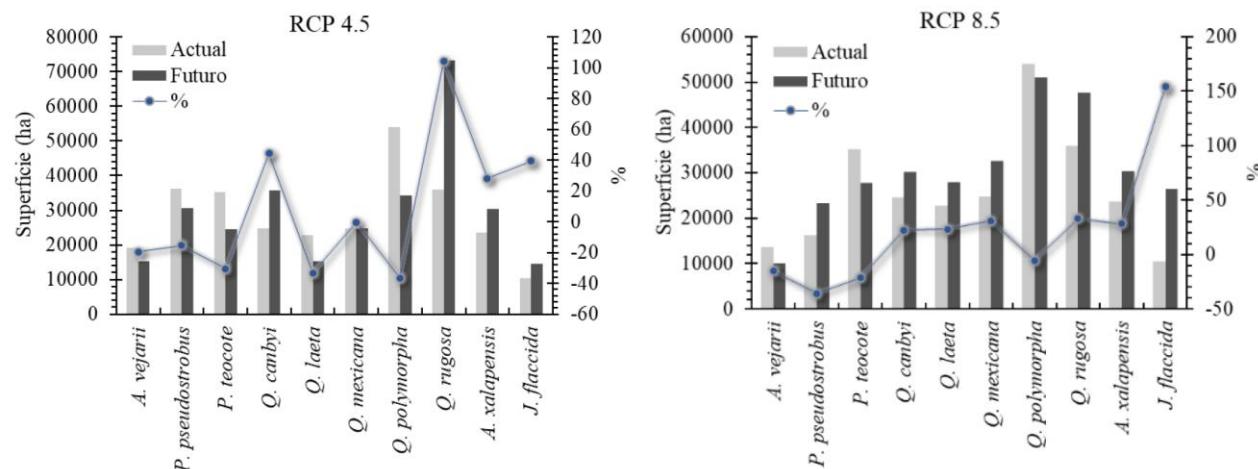


Figura 4. Área potencial de las especies analizadas de acuerdo con el escenario actual (Período 1910-2009) y bajo escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5 para el período 2050). Se presenta el área total que ocupan en hectáreas (ha) con sus porcentajes (%) de cambio.

Para las especies restantes correspondientes al género *Quercus*, *Arbutus* y *Juniperus* se observan aumentos en su distribución bajo ambos escenarios. Sin embargo, *Q. rugosa* correspondiente al escenario RCP4.5 estima un aumento del 104.12%, lo que supone el doble de la superficie de la distribución actual. En el caso del escenario RCP8.5 se aprecia un aumento en la especie *J. flaccida* del 153.73%; estos aumentos dependerán del modelo y escenario aplicado.

Se observa que, dependiendo del escenario empleado en los modelos de distribución de las especies, estas se verán afectadas diferencialmente (Figura 5). Se observa que la especie *Q. laeta* y *Q. mexicana* experimentaran reducciones de acuerdo con el escenario RCP4.5 y aumentos en el escenario RCP8.5 (Figura 5) esta irregularidad no es de esperarse, por lo que es indispensable generar diversos modelos bajo diferentes escenarios de cambio climático respecto a estas especies.

Áreas aptas para la conservación

Los modelos futuros indican que cuatro de las 10 especies de clima templado sufirán reducciones en sus áreas de distribución debido a los efectos del cambio climático, de modo que las áreas estimadas con las condiciones ambientales de idoneidad que se conservarán en la actualidad (Período 1910-2009) y se mantendrán en el futuro (década 2050) fue para *A. vejarii* de 8 690 ha, *P. pseudostrobus* de 6 852 ha, *P. teocote* de 4197 ha y *Q. polymorpha* de 10 828 ha (Figura 6). Así mismo, los resultados sugieren que ante los escenarios de cambio climático existirían algunas zonas en el estado de Nuevo León que podrían contener características ambientales para la conservación de

ciertas especies. Las zonas de mayor conservación y las cuales se mantendrán para *A. vejarii* se encuentran principalmente en los Municipios de Galeana 2 671 ha, Gral. Zaragoza 2 347 ha y Santiago 2 311 ha. Para *P. pseudostrobus* en Santiago 4 787 ha. Para *P. teocote* en Rayones 1 225 ha, Santiago 910 ha y Gral. Zaragoza 870 ha, y *Q. polymorpha* en Santiago 3 313 ha, Iturbide 2 729 ha y Monterrey 1 236 ha.

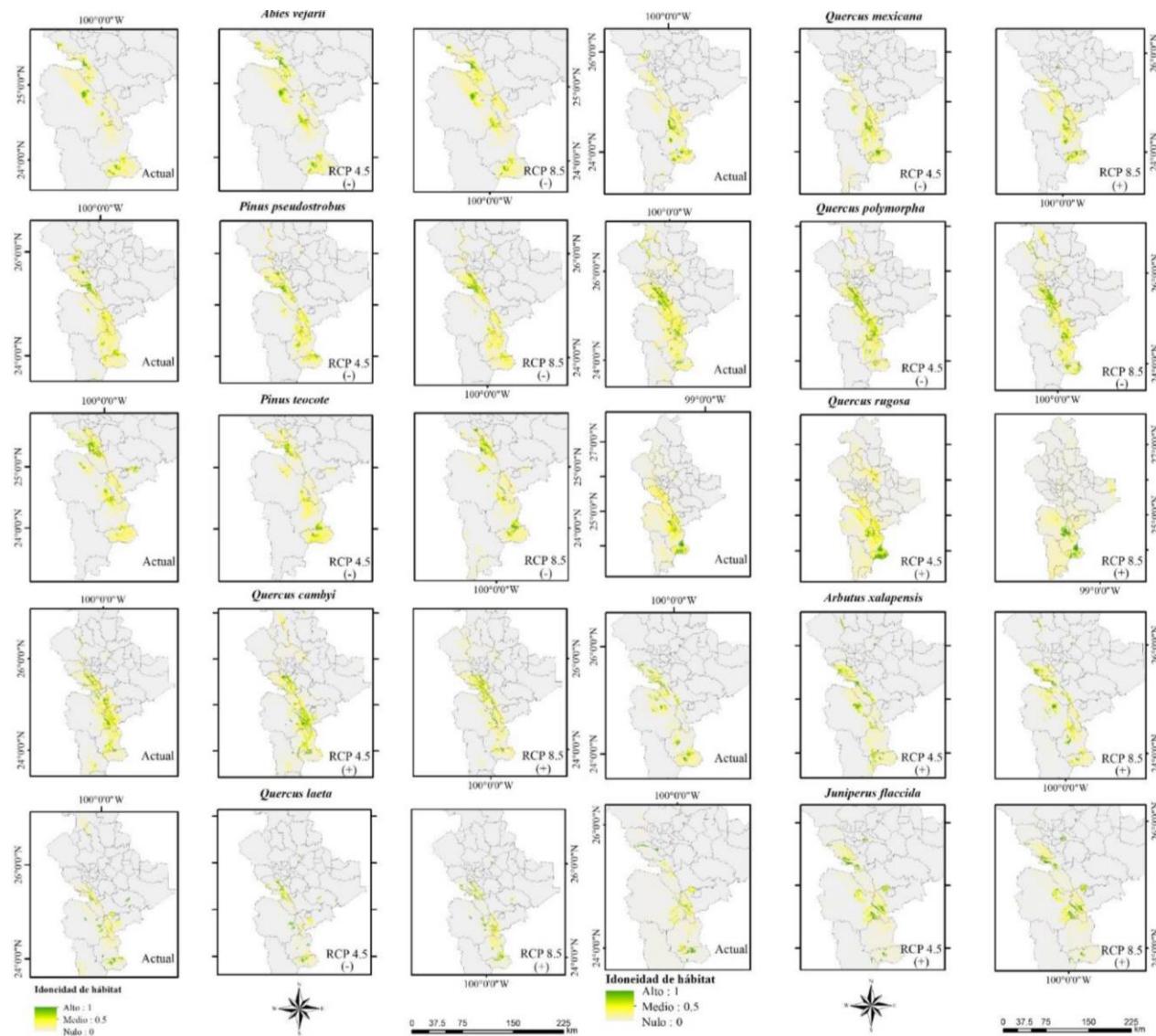


Figura 5. Distribución potencial en condiciones bioclimáticas actual (Período 1910-2009) y escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5 período 2050) futura de especies de clima templado en Nuevo León México. (+) aumento, (-) reducción. El tono verde en la escala de colores indica la mayor presencia de la especie, mientras que el tono más claro indica que no hay presencia.

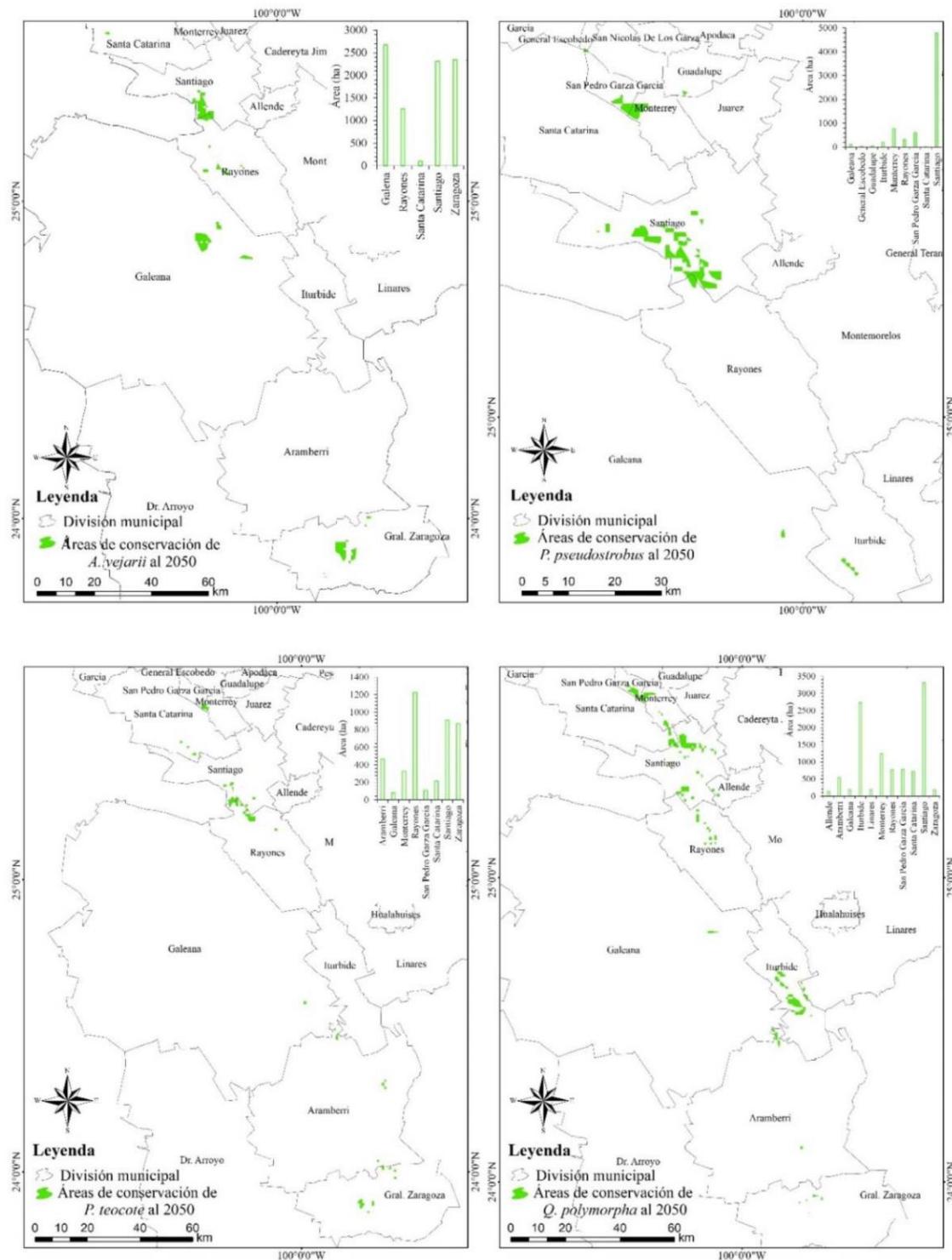


Figura 6. Áreas de conservación y que se mantendrán del período 1910-2009 en la década centrado al año 2050 de especies arbóreas (*A. vejarii*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *Q. polymorpha*) en bosques templados de Nuevo León.

DISCUSIÓN

Varios autores han demostrado la utilidad de los modelos de nicho ecológico y modelos de distribución de especies para determinar los impactos de los cambios y modificaciones en la precipitación y la temperatura sobre la diversidad de especies (Sáenz-Romero *et al.* 2015, Gómez-Pineda *et al.* 2022, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024a). La complementación de los registros recolectados en campo con la revisión de ejemplares de herbarios permitió obtener resultado precisos y robustos. A pesar de que *Q. rugosa* fue la que presentó el menor número de registros, los resultados de los análisis fueron sólidos. Según Stockwell y Peterson (2002) demostraron que la modelación de cualquier especie depende de la cantidad y calidad de los datos, sugiriendo que para que la predicción sea robusta, se necesita que la ubicación geográfica sea precisa y se utilice al menos un mínimo de 50 registros. Mientras que otros requieren un muestreo mínimo de 80 observaciones (Corona-Núñez *et al.* 2017). Aunque se ha realizado modelación de especies con menos de seis registros (Aguirre y Duivenvoorden 2010). Sin embargo, de acuerdo con Phillips *et al.* (2006) y Pearson *et al.* (2007) es recomendable utilizar por lo menos 5 y 10 registros de presencia. Por lo que, el desempeño de los modelos no solo se encuentra relacionado con el número de observaciones, sino con la variabilidad en la distribución de la especie. Por ejemplo, *Q. rugosa* mostró que, pese al bajo número de registros (10), las características bioclimáticas que restringen su distribución resultaron en un modelo con buen desempeño predictivo.

Validación de los modelos

Los valores estimados señalan con exactitud las áreas de idoneidad de las especies analizadas, ya que los resultados se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para ciertas especies (Aceves-Rangel *et al.* 2018, Manzanilla *et al.* 2019, González-cubas *et al.* 2020). Estos autores realizaron estudios sobre modelos de distribución de especies en diferentes regiones de México obteniendo resultados de AUC superiores a 0.900 para los datos de entrenamiento y validación. De acuerdo Elith *et al.* (2006), los modelos con valores de AUC de 0.750 son útiles para predecir la distribución de especies; en ese sentido, los valores de AUC superiores a 0.900 obtenidos en este trabajo indican que los modelos están altamente descritos por las variables bioclimáticas. Además, Ramos-Dorantes *et al.* (2017) obtuvieron un promedio de AUC de 0.966 en especies de clima templado en Puebla, México. Mientras que Aceves-Rangel *et al.* (2018) reportan valores promedio de AUC de 0.959 en especies de *Pinus* en México. Siendo ligeramente superiores los resultados obtenidos en este trabajo. De modo que, los modelos de distribución a través de MaxEnt, el análisis de ROC-parcial y la prueba de Z pueden considerarse fiables, ya que las predicciones son lo suficientemente precisas como para poder establecer planes de gestión.

Contribución de las variables climáticas

Si bien, la influencia de las variables climáticas difiere entre especie. Los resultados muestran que las especies evaluadas son sensibles a la oscilación de la temperatura y la precipitación. Lo anterior es similar a lo reportado por otros autores para el género (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Guzmán-Santiago *et al.* 2024). Las variables de mayor contribución para las especies en estudio fue la temperatura media del trimestre más húmedo, ocupando el primer lugar en porcentaje de contribución para los modelos de ocho especies, por lo que se considera la variable bioclimática

más influyente. Las variables con rango de temperatura anual (Bio5-Bio6) fue la segunda variable con diferente nivel de contribuciones para las 10 especies en estudio. Estas variables son relevantes en la distribución de las especies, por lo tanto, son de importancia en el hábitat para estos taxas. Conocer las condiciones actuales en las que se distribuyen las especies, proporciona información importante para identificar las áreas que contienen las características ambientales que estas especies requieren. Esto indica que los cambios o alteraciones en las variables más relevantes asociadas a las especies que tendrían un gran impacto en sus áreas de distribución a futuro. Por lo qué, el estudio de las variables climáticas en la distribución de las especies permite conocer las implicaciones en el desarrollo espaciotemporal de sus poblaciones a diferentes escalas, aportando información sobre el potencial efecto del cambio climático en las áreas de idoneidad donde se desarrollan estas especies y así poder decretar posibles áreas de refugio para mitigar el impacto climático a futuro.

Distribución potencial actual y futuro

El cambio climático está afectando la distribución de las especies y los ecosistemas; de acuerdo con los modelos, algunas especies se verán afectadas por el cambio climático en el año 2050. Los resultados muestran que ante el escenario optimista RCP4.5 y pesimista RCP8.5, algunas especies reducirán su área de distribución potencial (*A. vejarii* con una reducción de 3 707.55 ha, *P. pseudostrobus* con 5 592.28 ha, *P. teocote* con 10 737.98 ha y *Q. polymorpha* con 19 727.37 ha) respecto a su superficie actual. Sin embargo, para el resto de las especies (*Q. canbyi*, *Q. laeta*, *Q. mexicana*, *Q. rugosa*, *A. xalapensis*, *J. fláccida*) aumentaran su área de distribución ya que los modelos indican zonas que serán idóneas o tendrán las condiciones adecuadas para desarrollarse en el futuro. Al respecto, Hanewinkel *et al.* (2013) afirman que el cambio climático resultará en el reemplazo neto de bosques altamente productivos (*Pinus* spp.) por especies con menor productividad (*Quercus* spp.) para finales de siglo (Década 2100).

La capacidad de cambio y adaptación de las especies a la presencia de poblaciones en determinadas condiciones es un indicador de sus preferencias y requerimientos. Lo anterior y de acuerdo con Thuiller *et al.* (2011) es importante, ya que la tolerancia entre especies son diferentes y esto hace que algunas sean más vulnerables a los efectos del cambio climático. Sin embargo, es probable que los cambios en el régimen de precipitaciones, el aumento de la temperatura y la irregularidad en los eventos meteorológicos tendrá impacto en la distribución, tamaño, estructura y abundancia de las poblaciones de algunas especies arbóreas, de modo que las especies tendrán que desafiar diversas presiones fisiológicas del entorno ante el cambio climático actual y responder en tiempos relativamente cortos (IPCC 2014, Sáenz-Romero *et al.* 2016).

La combinación de estos factores tendrá como consecuencia regiones más cálidas y secas acorde a las proyecciones, y una tendencia hacia un aumento en la aridez, provocando estrés en las plantas al estar en condiciones que ya no son las adecuadas (Castellanos-Acuña *et al.* 2018, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024b). Lo que lo predispondrá al ataque de plagas y enfermedades (Gómez-Pineda *et al.* 2022). Por ello, la permanencia de las especies ante el cambio climático dependerá de su capacidad de adaptación y de migrar a lugares con condiciones climáticas óptimas (Sáenz-Romero *et al.* 2016). La posibilidad de adaptación depende del nivel de variación genética y de la plasticidad fenotípica residente en las poblaciones para ajustar sus procesos a las nuevas condiciones (Tognetti

et al. 2019). De acuerdo con Dawson y Spannagle (2009) sugieren que, a causa de los cambios actuales en el clima, las especies podrían desplazarse verticalmente, logrando cambiar la amplitud altitudinal de su distribución. Sin embargo, la capacidad natural de migración de las plantas a través de la dispersión y su establecimiento de nuevos hábitats es demasiado lenta para la mayoría de las especies (Soto-Correa *et al.* 2014). Estudios publicados, han mostrado que los procesos de migración asistida de especies de climas templados están dirigidas a porciones del territorio con mayor altitud, siendo estas zonas donde hay mayor precipitaciones y temperaturas más bajas (Mirhashemi *et al.* 2023). Sin embargo, Byars *et al.* (2009) señalan que una de las mejores opciones de movimiento de las plantas es hacia sitios con mayores elevaciones, donde se espera que ocurran las condiciones óptimas a las que están adaptadas. Al respecto Gavilán (2008), Denvir *et al.* (2022) señalan que es importante, reconocer que la pérdida de la biodiversidad no sólo se debe al cambio climático, sino también a otros factores asociados, que tienen efectos a corto plazo como la fragmentación del hábitat de los bosques nativos, el cambio de uso de suelo para la ganadería, la agricultura, la urbanización, especies invasoras, entre otros. Por lo que, la pérdida de especies será probablemente mucho mayor que la proyectada en este trabajo. Si bien, la fragmentación de hábitats de los bosques nativos puede propiciar una serie de efectos adversos en las especies arbóreas, estos efectos incluyen la disminución del tamaño de las poblaciones, la limitación del intercambio genético entre fragmentos aislados, el incremento de la endogamia, la reducción de la vitalidad de las plántulas e, incluso en situaciones extremas, la extinción local de las especies (Aguilar *et al.* 2006). La reducción del tamaño poblacional como resultado de la fragmentación de hábitats implica que las poblaciones arbóreas sean más susceptibles a la pérdida de variabilidad genética y a los efectos negativos de la deriva genética, a razón de las limitaciones del flujo génico entre fragmentos aislados, lo que dificulta el intercambio de genes y la renovación genética de las poblaciones.

El IPCC 2021 informa que la temperatura global del aire en la superficie ha aumentado aproximadamente 1°C por encima de los niveles preindustriales. Sin embargo, investigaciones publicadas por Dorji *et al.* (2013) y Zi *et al.* (2022) señalan que cada vez hay más pruebas de que el calentamiento del clima modifica el rendimiento reproductivo sexual de las plantas, incluida la fenología de la floración y el esfuerzo reproductivo (la proporción de los recursos de un organismo destinados a la reproducción, por ejemplo, el número de flores) y el éxito (el resultado final de la inversión de recursos, por ejemplo, el número de frutos y/o semillas). Lo anterior se sustenta con lo reportado por Zi *et al.* (2022) quienes reportan que el calentamiento climático (aumento en la temperatura) reduce el número de frutos en determinadas especies, una explicación para el efecto negativo del calentamiento sobre el número de frutos es que el estrés por altas temperaturas altera el desarrollo del embrión y el endospermo. Por lo tanto, los patrones adaptativos pueden verse afectados por el aumento en la temperatura o las alteraciones en los regímenes de precipitaciones podrían ocasionar desacoplamiento entre los ambientes y los genotipos (Sáenz-Romero *et al.* 2010). Por otra parte, hay que tener en cuenta que trabajar con escenarios de cambio climático no es predecir el futuro, sino comprender mejor las incertidumbres para tomar decisiones que sean robustas ante un amplio abanico de posibles escenarios futuros. En este trabajo, bajo cualquier de los escenarios, se prevé que el área de distribución aumente o disminuya con referencia al clima actual (Figura 5). También pueden utilizarse para comparar las características biológicas de otras

especies que se benefician de encontrarse con un aumento de áreas en condiciones ambientales adecuadas, en contraste con aquellas especies que experimentan una respuesta negativa.

Áreas aptas para la conservación

México enfrenta el reto de gestionar adecuadamente sus recursos forestales en un territorio privilegiado por una enorme biodiversidad y una diversidad cultural de pueblos que han participado durante siglos en el aprovechamiento de múltiples recursos bióticos (Gavito *et al.* 2017). Indudablemente esta transformación ambiental plantea desafíos para la conservación de la biodiversidad, generando la necesidad de implementar estrategias de manejo que reduzcan las presiones actuales sobre los ecosistemas forestales del estado de Nuevo León.

La combinación de los conocimientos derivados de los modelos de distribución potencial identificó zonas prioritarias para la conservación de las especies, que mantendrán su hábitat climático en el futuro (Década de 2050), de modo que, se podrían tomar decisiones y establecer estrategias de manejo para su conservación y/o recuperación. Algunos estudios recomiendan examinar las especies sensibles al cambio climático para definir estrategias de conservación *ex situ* (Viveros-Viveros *et al.* 2009, Sáenz-Romero *et al.* 2012), y planes de manejo para la adaptación de las plantas ante el cambio climático (Oliver *et al.* 2016). Con el desarrollo de los modelos presentados, es posible inferir los efectos de un posible cambio climático sobre la fisiología de la especie y, por tanto, sobre su distribución. El seguimiento de estas recomendaciones es de interés, ya que hay especies que se han visto afectadas y por ende sus áreas de distribución, como es el caso de *A. vejarii*, una de las especies que está catalogada como Casi Amenazada con una población en disminución (SEMARNAT 2010, Farjon 2013). Especie que podría desaparecer debido a su restringido intervalo óptimo térmico, que probablemente no le permitirá sobrevivir donde se encuentra actualmente. Sin embargo, esta especie podría acceder a sitios más favorables a mayor altitud donde la temperatura sería más adecuada para su desarrollo, pero esta migración depende principalmente de la dispersión de sus semillas, en el sentido de que algún vector sería capaz de transportarlas a altitudes superiores a los sitios donde se encuentra actualmente. Sin embargo, Sáenz-Romero *et al.* (2016) señalan que este proceso es relativamente lento y depende de la capacidad de migración altitudinal de la especie. Mientras que Sáenz-Romero *et al.* (2016), recomiendan reubicar a las especies cuyo hábitat se verá afectado por el cambio climático a sitios donde se prevé que en el futuro contaran con las condiciones favorables para la especie mediante Migración asistida. Es decir, la plantación de plántulas procedentes en un sitio de recolección de semillas en el presente debe tener los mismos valores climáticos que el clima que ocurrirá en un futuro previsible en un sitio a reforestar tal y como sugiere (Castellanos-Acuña *et al.* 2018, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024b).

CONCLUSIONES

Es evidente el efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies estudiadas en el bosque templado del estado de Nuevo León. El análisis realizado es una aproximación para reconocer la severidad del cambio climático sobre algunas de las especies arbóreas. Permitiendo, estimar la distribución potencial actual y futura e identificando áreas de conservación que se

mantendrán en el futuro. De esta manera, los tomadores de decisiones encargados de seleccionar sitios para la conservación dispongan de argumentos adicionales con mejores fundamentos ecológicos y biogeográficos. Las especies más afectadas por el cambio climático son *A. vejarrii*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote* y *Q. polymorpha*. Los resultados obtenidos pueden complementar las estrategias para la conservación de algunas especies del bosque templado en el estado Nuevo León.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo de beca de doctorado al primer autor (CVU 469568). Al laboratorio de geomática de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por las facilidades proporcionadas durante la elaboración de este trabajo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel LD, Méndez-González J, García-Aranda MA, Nájera-Luna JA (2018) Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* 52(7): 1043-1057.
- Aguilar R, Ashworth L, Galetto L, Aizen MA (2006) Plant reproductive susceptibility to habitat fragmentation: Review and synthesis through a meta-analysis. *Ecology Letters* 9(8): 968-980. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00927.x>
- Aceves-Rangel LD, Méndez-González J, García-Aranda MA, Nájera-Luna JA (2018) Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* 52(7): 1043-1057.
- Aguirre GJ, Duivenvoorden JF (2010) Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 875-882.
- Allen MR, Dube OP, 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. https://www.researchgate.net/publication/369301788_Framing_and_Context_in_Global_warming_of_15C_An_IPCC_Special_Report. Fecha de consulta: 17 de septiembre de 2023.
- Ávila CR, Villavicencio GR, Ruiz CJA (2014) Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(24): 92-109.
- Barve N, Barve V, Jiménez-Valverde A, Lira-Noriega A, Maher SP, Peterson AT, Soberón J, Villalobos F (2011) The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling* 222(11): 1810-1819. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Byars SG, Parsons Y, Hoffmann AA (2009) Effect of altitude on the genetic structure of an Alpine grass, *Poa hiemata*. *Annals of Botany* 103(6): 885-899. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp018>

- Castellanos-Acuña D, Vance-Borland KW, Clair JBS, Hamann A, López-Upton J, Gómez-Pineda E, Ortega-Rodríguez JM, Sáenz-Romero C (2018) Climate-based seed zones for Mexico: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New forests* 49: 297-309. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9620-6>
- Cobos ME, Peterson AT, Barve N, Osorio OL (2019) Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ* 7: e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Corona-Núñez RO, Mendoza-Ponce A, López-Martínez R (2017) Model selection changes the spatial heterogeneity and total potential carbon in a tropical dry forest. *Forest ecology and management* 405: 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.018>
- CONAFOR (2014) Diagnóstico del Programa Presupuestario U036 PRONAFOR-Desarrollo Forestal 2014. https://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_U036.pdf. Fecha de consulta: 21 de junio de 2022.
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva JT, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval JA (2016) Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22: 135-148. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Cuervo-Robayo AP, Téllez-Valdés O, Gómez-Albores MA, Venegas-Barrera CS, Manjarrez J, Martínez-Meyer E (2014) An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* 34(7): 2427-2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Dawson B, Spannagle M (2009) The complete guide to climate change. Routledge. New York. 436p.
- Denvir A, Arima EY, González-Rodríguez A, Young KR (2022) Ecological and human dimensions of avocado expansion in México: Towards supply-chain sustainability. *Ambio* 1-15.
- Dorji T, Totland Ø, Moe SR, Hopping KA, Pan J, Klein JA (2013) Plant functional traits mediate reproductive phenology and success in response to experimental warming and snow addition in Tibet. *Global change biology* 19(2): 459-472. <https://doi.org/10.1111/gcb.12059>
- Elith J, Graham C, Anderson R, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R, Huettmann F, Leathwick J, Lehmann A, Li J, Lohmann G, Loiselle A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J, Peterson TA, Phillips SJ, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire ER, Soberón J, Williams S, Wisz SM, Zimmermann EN (2006) Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29(2): 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions* 17(1): 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- ESRI (2016) ArcGIS 10.5. Software diseñado para análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica. Environmental Scientific Research Institute. Redlands, California, USA.
- FAO (2018) El estado de los bosques del mundo. Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 132p. <https://dx.doi.org/10.18356/419ad9c6-es>
- Farjon A, Styles BT (1997) *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph* 75. New York Botanical Garden, New York.
- Farjon A (2013) *Abies vejarii* var. mexicana. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T34145A2847778. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T34145A2847778>
- Felicísimo AM, Muñoz JR, Mateo G, Villalba C (2012) Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Revista Ecosistemas* 21: 1-6. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.01>
- Fernández-Eguiarte A, Zavala-Hidalgo J, Romero-Centeno R, Conde-Álvarez AC, Trejo-Vázquez RI (2015) Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://atlasclimatico.unam.mx/cmip5/visualizador>. Fecha de consulta: 15 de junio de 2021.

- Gavilán RG (2008) La vegetación de alta montaña. En: Redondo M, Palacios M, López F, Santamaría T, Sánchez D (eds) Avances en biogeografía. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia. Madrid. pp. 165-174.
- Gavito ME, Wal HVD, Aldasoro EM, Ayala-Orozco B, Bullén AA, Cach-Pérez M, Casas-Fernandez A, Fuentes A, González-Ezquivel C, Jaramillo-López P, Martinez P, Masera-Cerruti O, Pascual F, Pérez-Salicrup DR, Ruiz-Mercado I, Villanueva G (2017) Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. Revista Mexicana de Biodiversidad 88: 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.09.001>
- Gallardo-Salazar JL, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Blanco-García A, Osuna-Vallejo V (2023) Evaluation of forestry component survival in plots of the program "Sembrando Vida" (Sowing Life) using drones. Forests 14(11): 2117. <https://doi.org/10.3390/f14112117>
- GBIF (2020) Bases de datos geográficos disponibles para 10 especies de clima templado en Nuevo León México. Global Biodiversity Information Facility. <http://www.gbif.org>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2021.
- Gómez-Pineda E, Hammond WM, Trejo-Ramírez O, Gil-Fernández M, Allen CD, Blanco-García A, Sáenz-Romero C (2022) Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. Forest Ecology and Management 505: 119944. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- González-Cubas R, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón OA, Foroughbakhch-Pournavab R (2020) Distribución potencial de *Abies vejarii* (Pinaceae) y su relación con factores ambientales, topográficos y antropogénicos en el noreste de México. Acta Botánica Mexicana (127). <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1607>
- Guzmán-Santiago JC, Santos-Posadas HMDL, Ángeles-Pérez G, Vargas-Larreta B, Gómez-Cárdenas M, Rodríguez-Ortiz G, Corona-Núñez RO (2024) Efecto del cambio climático en la distribución de las especies de clima templado en Oaxaca, México. Botanical Sciences 102(1): 39-53. <https://doi.org/10.17129/botsci.3355>
- Guisan A, Zimmermann NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling 135(2-3): 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Guitérrez E, Trejo I (2014) Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. Revista Mexicana de Biodiversidad 85(1): 179-188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Hanewinkel M, Cullmann DA, Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Zimmermann NE (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nature Climate Change 3(3): 203-207. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1687>
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Schmidt GA, Lo K, Persin A (2019) Global temperature in 2018 and beyond. Earth Institute, Columbia University. New York, USA. pp. 173-177.
- INEGI (2001) Provincias fisiográficas. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html#Descargas>. Fecha de consulta: 13 de agosto de 2021.
- IPCC (2013) Climate change 2013: the physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC (2014) Impacts, adaptation and vulnerability. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Ginebra, Suiza. 72p.
- IPCC (2018) Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T (eds) 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. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- IPCC (2021) Climate change 2021: The physical science basis. In Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (eds) Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press 2(1): 2391. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Karger DN, Conrad O, Böhner J, Kawohl T, Kreft H, Soria-Auza RW, Zimmermann NE, Linder HP, Kessler M (2017) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4: 170122. <https://dx.doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Manzanilla QU, Delgado VP, Hernández RJ, Molina SA, García MJ, Rocha GM 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: e1398. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>
- Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón OA, Yerena-Yamallel JI, Manzanilla-Quiñones U (2020a) Current and future potential distribution and identification of suitable areas for the conservation of *Cedrela odorata* L. in the Yucatan Peninsula. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales* 26(3). <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.10.075>
- Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ, Vargas-Larreta B, López-Martínez JO, Mata-Balderas JM (2020b) Ideal areas with potential for the production of *Pinus chihuahuana* Engelm. and *Pinus leiophylla* Schlehd. & Cham. in Mexico. *Botanical Sciences* 98(2): 305-316. <https://doi.org/10.17129/botsci.2514>
- Manzanilla-Quijada GE, Manzanilla-Quiñones U, Alanís-Rodríguez E, Silva-González E (2024a) Efectos del cambio climático en la distribución de *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla*: una propuesta para la conservación en México. *e-CUCBA* (21): 47-58. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.322>
- Manzanilla-Quijada GE, Osuna-Vallejo V, Zacarías-Correa AG, Gómez-Pineda E, Gallardo-Salazar JL, Sáenz-Romero C (2024b) Zonas de transferencia de semillas para la reforestación en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y la Meseta Purépecha ante el cambio climático. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 30(2): 1-21. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.11.056>
- Martínez-Sifuentes AR, Villanueva-Díaz J, Manzanilla-Quiñones U, Becerra-López JL, Hernández-Herrera JA, Estrada-Ávalos J, Velázquez-Pérez AH (2020) Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 13(5): 426. <https://doi.org/10.3832/ifor3491-013>
- Mátyás C, Berki I, Czúcz B, Gálos B, Móricz N, Rasztovits E (2010) Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 6: 91-110.
- Mirhashemi H, Heydari M, Karami O, Ahmadi K, Mosavi A (2023) Modeling climate change effects on the distribution of oak forests with machine learning. *Forests* 14(3): 469. <https://doi.org/10.3390/f14030469>
- Naturalista (2021) CONABIO. <http://www.naturalista.mx>. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2024.
- Oliver TH, Smithers RJ, Beale CM, Watts K (2016) Are existing biodiversity conservation strategies appropriate in a changing climate?. *Biological Conservation* 193: 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.10.024>
- Osorio-Olvera L, Lira-Noriega A, Soberón J, Peterson AT, Falconi M, Contreras-Díaz RG, Barve V, Barve N (2020) ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>

- Parmesan C (2006) Ecological and evolutionary response to recent climatic change. *Annual Review of Ecology and Systematics* 37: 637-669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34: 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.r-project.org>. Fecha de consulta: 29 de abril de 2023.
- Ramos-Dorantes DB, Villaseñor JL, Ortiz E, Gernandt DS (2017) Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.028>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Crookston NL, Duval P, St-Amant R, Beaulieu J, Richardson BA (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. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P, Lindig-Cisneros RA (2012) *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275: 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Ortega-Rodríguez JM, Marín-Togo MC, Madrigal-Sánchez X (2015) *Pinus leiophylla* hábitat adecuado para 1961-1990 y el clima futuro. *Botanical Sciences* 93(4): 709-718. <https://doi.org/10.17129/botsci.86>
- Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Joyce DG, Beaulieu J, Bradley JStC, Jaquish BC (2016) Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3): 303-323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sáenz-Romero C, Lamy JB, Ducouso A, Musch B, Ehrenmann F, Delzon S, Cavers S, Chałupka W, Dağdaş S, Hansen JK, Lee SJ, Liesebach M, Rau HM, Psomas A, Schneck V, Steiner W, Zimmermann NE, Kremer A (2017) Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global change biology* 23(7): 2831-2847. <https://doi.org/10.1111/gcb.13576>
- Salinas M, Vargas M, Zúñiga G, Victor J, Ager A, Hayes JL (2010) Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género *Dendroctonus* (Curculionidae: Scolytinae) en México. México: Instituto Politécnico Nacional - Comisión Nacional Forestal. <https://cepanaf.edomex.gob.mx/sites/cepanaf.edomex.gob.mx/files/files/Monte%20Alto/Articulos%20Cientificos/Atlas%20distribucion%20geograficas%20dendroctonus.pdf>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2023.
- SEMARNAT (2010) NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2023.
- 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(2): 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Soto-Correa JC, Lindig-Cisneros R, Sáenz-Romero C (2014) Migración asistida de *Lupinus elegans* Kunth en ensayos de jardín común en campo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(2): 107-116.
- Stockwell DR, Peterson AT (2002) Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological modelling* 148(1): 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00388-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00388-X)

- Tognetti PM, Mazia N, Ibáñez G (2019) Seed local adaptation and seedling plasticity account for *Gleditsia triacanthos* tree invasion across biomes. *Annals of Botany* 124(2): 307-318. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz077>
- Thomas C, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, Siqueira MF, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Jaarsveld ASA, Midgley GF, Miles L, Miles L, Ortega-Huerta MA, Peterson AT, Phillips OL, Williams SE (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-149.
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470(7335): 531-534.
- Valencia AS (2004) Diversity of the genus *Quercus* (Fagaceae) in Mexico. *Botanical Sciences* (75): 33-53. <https://doi.org/10.17129/botsci.1692>
- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change* 109(1): 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Ramírez-Valverde G, Santacruz-Varela A (2009) Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(3): 836-842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>
- WMO (2018) Greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. World Meteorological Organization. No. 14. <https://wmo.int/publications-series/greenhouse-gas-bulletin>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2023.
- Zi H, Jing X, Liu A, Fan X, Chen SC, Wang H, He JS (2023) Simulated climate warming decreases fruit number but increases seed mass. *Global Change Biology* 29(3): 841-855. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>