

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Impacto del Cambio Climático Sobre la Distribución Actual y Potencial de *Pinus engelmannii* Carrière

Por:

MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ SALAZAR

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Impacto del Cambio Climático Sobre la Distribución Actual y Potencial de *Pinus engelmannii* Carrière

Por:

MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ SALAZAR

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



Dr. Genaro Esteban García Mosqueda

Coasesor



M.C. Librado Sosa Díaz

Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2019

DEDICATORIA

A mis padres

Margarita Salazar Amézquita y Jaime Enrique Jiménez Damián

Que me han dado la vida y sacado adelante con todo su esfuerzo y gran apoyo, ellos que siempre estuvieron conmigo que, a pesar de la distancia, les agradezco por apoyarme en mis decisiones, por sus consejos, motivación y la confianza, porque gracias a ustedes logré terminar mis estudios, a ustedes les dedico este sacrificio.

A mis hermanos

Jaime, Fredy, Hugo, Edwin y Adilene Jiménez Salazar

Por ser parte de mis recuerdos favoritos y momentos felices, que a pesar de la distancia los llevo siempre en mi corazón. A ustedes los dos menores, Edwin y Adilene, échenle ganas espero poder dar un buen consejo y les permita salir adelante, también a ustedes, Jaime, Fredy y Hugo, gracias por el apoyo y las motivaciones de todos, porque siempre conté con ustedes y ustedes conmigo, me forjé de sus consejos.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios

Por cuidar de mí y de mi familia, por la salud, unidad y prosperidad que nos has brindado y por permitir seguir viviendo y culminar una más de mis metas.

A mi Alma Terra Mater

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por ser la institución y casa de estudios que me brindó la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniero Forestal y formarme de conocimientos, valores y como profesional a través de su personal.

Al Dr. Jorge Méndez González

Por ser mi asesor principal y mostrarse comprometido en sus valiosas aportaciones en el contenido de este trabajo y ser un excelente profesor, por sus conocimientos compartidos durante la carrera que hicieron de mi formación, además por la amistad, gracias.

Al M.C. Librado Sosa Díaz y al Dr. Genaro Esteban García Mosqueda

Por ser mis coasesores en contribución en la revisión de este documento, por los conocimientos brindados, compromiso por el trabajo, amistad y disponibilidad de su valioso tiempo. Por comentarios que fortalecieron este estudio, gracias.

A los profesores del Departamento Forestal

Por sus conocimientos transmitidos y formar parte de mi vida profesional, gracias.

A la familia Salazar Jiménez y Bañuelos Ahumada

Porque con ustedes he contado su hogar como mi segunda casa, por el apoyo incondicional y alentarme a seguir adelante con mis estudios, gracias.

A Consultoría Ambiental de Mascota (CAM) S. C.

Por darme la oportunidad de realizar mi estancia en mis prácticas profesionales, a todo el personal gracias por la confianza y amistad.

A mis amigos y colegas de mi Alma Mater

Emir Eduardo Del Billar, Juan Manuel Cortes, José de Jesús Del Villar, Otoniel Cortes, Cristian Aguirre, Aarón Sandoval, Heriberto Del Billar, Fátima Monserrat Méndez, Rocío Mendieta, Francisco Armenta, Alejandro Díaz, José Ángel Celedón, José Juan Ramírez, Librado Castillo, Sergio Bonilla, Alfredo Nava.

A toda la familia Jiménez

Tíos, primos, sobrinos y parientes, doy gracias a dios por ser y formar parte de tan formidable y pacífica familia, con los que se han pasado buenas experiencias en el rancho y siempre se han mostrado amables en especial a mis primos Misael, Saul, Iván, Samuel, Erubey, Yobani, Everardo, Mercet, Rafael, Jonni, Gilberto, Roberto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.1.1. Objetivos específicos	3
1.2. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Cambio climático	4
2.2. Distribución potencial de especies	5
2.3. Modelos de distribución	6
2.4. Proyecciones en algoritmo MaxEnt (actual y futuro)	7
2.5. Técnicas de evaluación del modelo.....	8
2.6. <i>Kuenm</i>	9
2.7. Diagrama BAM.....	10
2.8. Modelos de Circulación General.....	11
2.9. Modelos y estudios de proyecciones futuras.....	12
2.10. Áreas de distribución potencial	13
2.11. Distribución del género <i>Pinus</i> en México	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. Área de estudio y especie	15
3.2. Registros de presencia.....	15
3.3. Variables bioclimáticas y Modelos de Circulación General (MCG)	16
3.4. Área de calibración (M)	16
3.5. Selección de variables	16
3.6. Calibración, generación, validación y transferencia	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1. El modelo de idoneidad y el espacio ambiental	18
4.2. Idoneidad actual por estrato	19
4.3. Distribución potencial futura (2050) de <i>Pinus engelmannii</i> Carrière	21

4.4.	Nuevas áreas, áreas de bajo y de alto impacto, predichas para <i>Pinus engelmannii</i> Carrière al 2050.....	23
4.5.	Perfil bioclimático actual y futuro para <i>Pinus engelmannii</i> Carrière.....	25
4.6.	Histograma de frecuencias de variables de mayor contribución al modelo.....	27
4.7.	Altitud y temperatura en nuevas áreas y áreas de alto impacto estimadas para <i>Pinus engelmannii</i> Carrière al 2050.....	27
4.8.	Ajuste del modelo de <i>Pinus engelmannii</i> Carrière y de otras especies.....	29
4.9.	El espacio ambiental de varias especies.....	29
4.10.	Las modalidades y sus ajustes.....	31
4.11.	La posible migración de las especies.....	32
4.12.	Variables que contribuyen a predecir la distribución en las diferentes especies.....	33
4.13.	Perfil bioclimático de <i>P. engelmannii</i>	34
5.	CONCLUSIONES	36
6.	REFERENCIAS	37

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Superficie de áreas potenciales actual y futuro (2050) de <i>Pinus engelmannii</i> Carriére estimada en dos vías de concentración representativa RCP's 4.5 y 8.5, promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG's).....	25
Tabla 2. Perfil bioclimático actual y futuro de <i>P. engelmannii</i> Carriére elaborado con 346 registros y cuatro Modelos de Circulación General y dos RCP's 4.5 y 8.5.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

- Figura 1.** Espacio ambiental de *P. engelmannii* Carrière elaborado con: a) Bio 5, 6 y 12 y b) con 15 variables bioclimáticas a través de Análisis de Componentes Principales con 346 registros y elipsoide al 99 %.19
- Figura 2.** Modelo de idoneidad actual estratificado (alta, mediana y baja) para *P. engelmannii* Carrière: Extrapolación libre (a), Extrapolación Clamping (b), No Extrapolación (c) y su coeficiente de variación (d - f).20
- Figura 3.** Superficie en cada tipo de idoneidad (alta, media y baja) para *Pinus engelmannii* Carrière por entidad federativa, en un escenario actual.21
- Figura 4.** Modelo de distribución potencial para *P. engelmannii* Carrière con modalidades extrapolación libre (parte superior), extrapolación Clamping (parte media) y no extrapolación (parte baja), con RCP 4.5 y 8.5 (f) y MOP (g, h, i).22
- Figura 5.** Área de idoneidad actual y futura de *Pinus engelmannii* Carrière para el 2050, promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG) en dos trayectorias de concentración representativas RCP's 4.5 a) y 8.5 b).24
- Figura 6.** Histograma de frecuencias elaborado con 343 registros de *P. engelmannii* Carrière, representando a tres variables ambientales de mayor contribución Bio 1 (a), Bio 17 (b) y Bio 15 (c), en el periodo actual (barras color verde) y promedio de cinco MCG (líneas) en dos trayectorias de concentración RCP's 4.5 y 8.5.27
- Figura 7.** Altitud (a) y temperatura media anual Bio 1 (b) actual y futura promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG's) estimada para *Pinus engelmannii* Carrière en nuevas áreas (N.A.) y áreas de alto impacto (A.A.I.) con RCP's 4.5 y 8.5.28

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue generar modelos de distribución actuales y futuros para *Pinus engelmannii* Carrière, a través del algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt). La calibración, creación y evaluación del modelo final se realizó en paquete de R “*Kuenn*”. Los modelos de nicho fueron calibrados usando 346 registros y 15 variables bioclimáticas actuales (1979 – 2013) y futuras (2050) obtenidas de CHELSA. Para las predicciones a futuro se usaron cuatro modelos de circulación general (MCG’s): HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4 y CNRM-CM5 con escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas 4.5 y 8.5. El modelo seleccionado tuvo un regularizador de 3.5, tipo de clase quadratic + threshold (qt), con una tasa media de AUC de 1.3, ROC parcial de cero, tasa de omisión de (0.05), AICc de 3107, y las variables: Bio 1, 17, 16, 15 y 5 con contribución de 75.6, 6.3, 0.4, 0.3 y 0.2 % respectivamente. La idoneidad más alta de esta especie ocurre en Chihuahua, Durango y Sonora. En base a los MCG’s se predicen nuevas áreas idóneas para *P. engelmannii* hacia nuevas latitudes de 33° a 64° N y 25° a 55° S, posiblemente a menores altitudes, y en temperaturas más bajas (predichas en ambos RCP’s). No se predice pérdida de áreas en la distribución actual de la especie. Los resultados de este estudio deben tratarse con precaución, sugiriendo probar más modelos y más algoritmos de modelado de nicho ecológico.

Palabras clave: distribución potencial, *Pinus engelmannii*, temperatura, cambio climático, idoneidad.

ABSTRACT

The objective of this study was to generate current and future distribution models for *Pinus engelmannii* Carrière, through the Maximum Entropy algorithm (MaxEnt). The calibration, creation and evaluation of the final model was carried out in a package of R "*Kuenm*". The niche models were calibrated using 346 records and 15 current bioclimatic variables (1979 - 2013) and future (2050) obtained from CHELSA. For future predictions, four general circulation models (MCG's) were used: HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4 and CNRM CM5 with scenarios of Representative Concentration Paths 4.5 and 8.5. The selected model had a 3.5 regularizer, type of class quadratic + threshold (qt), with an average rate of AUC de 1.3, ROC partial zero, omission rate of (0.05), AICc of 3107, and the variables: Bio 1, 17, 16, 15 and 5 with contribution from 75.6, 6.3, 0.4, 0.3 and 0.2 % respectively. The highest suitability of this species occurs in Chihuahua, Durango and Sonora. The MCG's predict new areas suitable for *P. engelmannii* towards new latitudes from 33° to 64° N and 25 to 55° S, possibly to lower altitudes, and in lower temperatures (predicted in both RCP's). Loss of areas in the current distribution of the species is not predicted. The results of this study should be should be treated with caution, suggesting to try more models and more ecological niche modeling algorithms.

Keywords: potential distribution, *Pinus engelmannii*, temperature, climate change, suitability.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático consecuencia de los gases de efecto invernadero (GEI) origina grandes problemas a nivel mundial como la pérdida de ecosistemas y biodiversidad, eventos climáticos extremos como olas de calor, fuertes lluvias, sequías prolongadas e incendios forestales (IPCC, 2018b), efectos que son atribuidos a las altas concentraciones de emisiones de CO₂ causadas por actividades antropogénicas (IPCC, 2018a; IPCC, 2018b; Alberto, 2010). Hoy en día las concentraciones de Dióxido de Carbono son las más altas de los últimos 800 000 años (Zoellick, 2009).

El aumento estimado de las temperaturas para el siglo XXI es de 0.3 a 1.7 °C bajo el escenario RCP 2.6 (escenario nivel de concentración CO₂ baja) y de 2.6 a 4.8 °C bajo el RCP 8.5 (escenario alto) (IPCC, 2014) aunque se espera que sea 1.5 °C para el 2030 (IPCC, 2018a, IPCC, 2018b; Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Se calcula que para evitar que la temperatura no rebase los 2 °C las emisiones deberían reducirse en un 25 % para el 2030 (IPCC, 2018b).

Los bosques de coníferas en México, cubren aproximadamente 10 millones de ha (SEMARNAT, 2006; Challenger y Soberón, 2008; Alberto, 2010) y juegan un papel importante por su capacidad de almacenar dióxido de carbono y contribuir en la mitigación del cambio climático (Alberto, 2010). Sin embargo, se ha evidenciado que los bosques son también susceptibles a los cambios del clima (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

Pinus engelmannii Carrière es una especie de importancia comercial la cual es usada en programas de reforestación (Bustamante-García *et al.*, 2012) y en plantaciones forestales comerciales para la producción y aprovechamiento de madera en rollo (CONAFOR, 2011). Es una especie característica de las zonas montañosas de México que se distribuye en la

Sierra Madre Occidental (SMO) (Martínez, 1948), en climas templados, semifríos, semicálidos y cálidos húmedos y subhúmedos (INEGI, 2017).

Actualmente existen diferentes algoritmos para modelación de nichos y distribución de especies tales como: BIOCLIM (Busby, 1991), GARP (Stockwell y Peters, 1999), Máxima Entropía (MaxEnt: Phillips, Dudík y Schapire, 2004), etc., este último es considerado como buen predictor de la idoneidad ambiental para las especies (Elith *et al.*, 2006; Phillips, Anderson y Schapire, 2006). MaxEnt ha sido usado para modelar la distribución potencial de especies invasivas (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014), plagas forestales (Trotta-Moreu, Lobo y Cabrero-Sañudo, 2008; Sosa *et al.*, 2018), conservación (Ramos-Dorantes, Villaseñor, Ortiz y Gernandt, 2017), especies en peligro de extinción (Kumar y Stohlgren, 2009), así como distribución potencial del género *Pinus* (Miranda, Geada, Sotolongo, 2016; Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte y Jaramillo-Correa, 2016; Aceves-Rangel, Méndez-González, García-Aranda y Nájera-Luna, 2018; Manzanilla *et al.*, 2019). Se ha demostrado que la respuesta de las especies ante el cambio climático será diferente dependiendo de cada taxa y la zona geográfica, algunas de las cuales irán a mayores latitudes y altitudes (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016; Aitken, Yeaman, Holliday, Wang y Curtis-McLane, 2008) así como a menores latitudes (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Ortega-Rodríguez, Marín-Togo y Madrigal-Sánchez, 2015).

También existe la posibilidad de simular su distribución futura a través de modelos de circulación general (MCG) los cuales contemplan escenarios con diferentes niveles de concentración de CO₂ o RCP (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016), como lo realizado por Evangelista, Kumar, Stohlgren y Young (2011) que emplearon tres MCG cada uno con dos escenarios de emisiones 4.5 y 8.5. Para el presente estudio se emplearon cuatro MCG con

dos escenarios de emisiones RCP's 4.5 y 8.5 para realizar una aproximación a la distribución potencial actual y futura de *P. engelmannii*.

1.1. Objetivo general

Proyectar la distribución potencial actual (2019) y futura (2050) de *P. engelmannii* con variables bioclimáticas y diferentes escenarios climáticos mediante cuatro modelos de circulación general (MCG).

1.1.1. Objetivos específicos

- Modelar la distribución potencial actual de *P. engelmannii* Carrière usando registros de presencia y variables bioclimáticas que representa el clima actual (1979 - 2013).
- Proyectar la distribución potencial de *P. engelmannii* Carrière a futuro al año 2050, con variables bioclimáticas de mayor contribución, dos escenarios de emisiones de CO₂ RCP's 4.5 y 8.5 y cuatro MCG's: HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4 y CNRM-CM5.
- Conocer las variables climáticas que mayor influencia tienen sobre la distribución potencial de *P. engelmannii*.
- Determinar nuevas áreas idóneas y áreas idóneas próximas a desaparecer para *P. engelmannii*.

1.2. Hipótesis

H₀: El cambio climático proyectado en trayectorias de concentración de CO₂ (RCP's) de 4.5 y 8.5 no afectará la cantidad de hábitat idóneo para *P. engelmannii* Carrière al año 2050.

H_a: El cambio climático afectará la cantidad de hábitat idóneo para *P. engelmannii* Carrière en su área de modelación en trayectorias de concentración de CO₂ (RCP's) 4.5 y 8.5 proyectadas al 2050.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cambio climático

Definido como variación del proceso natural o antropogénica, estos cambios pueden persistir por décadas, pero últimamente se ha venido acelerando mostrando cambios notorios en el aumento de la temperatura, la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) carbono (CO_2), metano (CH_4), y óxido nitroso (N_2O) han aumentado debido a la actividad humana, la concentración de los GEI han aumentado en un 40 % desde los tiempos pre-industriales debido a la quema de los combustibles fósiles y por el cambio y uso de la tierra. La atmósfera ha aumentado su temperatura al igual que en los océanos, lo cual genera el deshielo de glaciares y aumento del nivel del mar. Los periodos han marcado historia tras al tener en las últimas tres décadas las temperaturas promedio más altas en los últimos 30 años desde los últimos 14000 años (IPCC, 2013).

Con el aumento de la temperatura, modelos de predicción sugieren que a finales del siglo XXI habrá cambios en la temperatura, aumentando $1.7\text{ }^\circ\text{C}$ con el modelo más ligero, mientras que con el modelo más severo existe la probabilidad de aumentar a $4.8\text{ }^\circ\text{C}$ para todo el mundo (IPCC, 2014). Mientras que para la región de México (sur de EE.UU., Cuba, Belice y Guatemala), utilizando las normales meteorológicas (1961 - 1990) de temperatura y precipitación, con tres diferentes escenarios de emisiones se estimó que habrá un aumento de la temperatura de $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ al 2030, $2.3\text{ }^\circ\text{C}$ al 2060 y $3.7\text{ }^\circ\text{C}$ al 2090, así como una disminución de la precipitación de 6.7 % para el año 2030, 9.0 % en el año 2060 y 18.2 % para el año 2090 (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Estudios de modelación de distribución futura de especies arbóreas demuestran un riesgo de extinción debido al cambio climático que se ha generado en el siglo actual,

especialmente por las condiciones de variabilidad y condiciones extremas de temperatura, así como el aumento o disminución de precipitación. Así mismo habrá cambios severos en las zonas montañosas y el rango altitudinal de muchas especies (Lenoir, Gégout, Marquet, De Ruffray, y Brisse, 2008; Telwala, Brook, Manish, Pandit, 2013; IPCC, 2014; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). Sin embargo, algunas especies se verán favorecidas con el cambio climático (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016) y otras perecerán ya que no evolucionan con la misma rapidez que la tasa de cambio climático (IPCC, 2014). Las especies con una mejor respuesta de adaptabilidad la variación genética junto con la longevidad les permitirá sobrevivir unas cuantas décadas más, lo que permitirá generar genotipos adaptados a las nuevas condiciones ambientales adversas (Hamrick, 2004).

2.2. Distribución potencial de especies

La distribución y frecuencia de especies está determinada por una serie de condiciones fisiográficas, climáticas y edáficas (Rzedowski, 1991). En proyecciones de vegetación se ha encontrado que las condiciones ambientales de mayor respuesta en la distribución potencial de especies son altitud y temperatura (Aceves-Rangel *et al.*, 2018), así como las especies de mayor rango de distribución la variable de mayor respuesta son las temperaturas altas (Cruz-Cárdenas, Villaseñor, López-Mata, y Ortiz, 2012), mientras que las de menor rango de distribución influye más la altitud en la distribución de las especies (Martínez-Méndez *et al.*, 2016).

Existen diferentes modelos para hacer proyecciones y que permiten conocer las áreas con las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo o establecimiento de una especie (Evangelista *et al.*, 2011; Perosa *et al.*, 2014; Palacios, Rodríguez, y Hernández, 2016), esta información es vital en caso de especies que sufren procesos de degradación, puesto que al

señalar áreas idóneas para la especie (Perosa *et al.*, 2014) se pueden implementar acciones de conservación como la llamada “migración asistida” (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

2.3. Modelos de distribución

Los modelos de distribución potencial de especies son conocidos como la representación parcial cartográfica de las áreas idóneas para su desarrollo, estas áreas son el reflejo del manejo que se le da a los registros únicos de la especie y las variables que se utilizan para caracterizar el ambiente de las mismas (Mateo, Felicísimo y Muñoz, 2011). Tales predictores pueden ser climáticos, topográficos, geológicos, edáficos, biogeográficos y de teledetección ya sea de forma individual o combinadas pueden ser utilizadas para delinear la distribución potencial de la especie (Guisan y Zimmermann, 2000; Phillips *et al.*, 2006).

En la modelación de la distribución de especies también se puede tener una sobrestimación o subestimación de las áreas de distribución (Guisan y Zimmermann, 2000). Por ello es recomendable hacer un análisis de correlación, eliminando aquellas con r superior a 0.8. Así mismo se debe disminuir la autocorrelación entre los puntos de presencia, es decir, que los puntos de muestreo no estén situados tan cerca uno del otro, para respetar el postulado de independencia entre observaciones (Guisan y Zimmermann, 2000; Cobos, Townsend, Barve, y Osorio-Olvera, 2019). Por lo anterior, queda claro que el éxito en estos modelos depende de la calidad y cantidad de las variables y los datos de registro de la especie (Leal-Nares *et al.*, 2012).

En la literatura científica se ha encontrado que los modelos han tenido diferentes denominaciones en función de su interpretación. Por ejemplo, modelos de nicho, modelos de idoneidad o modelos predictivos del hábitat, aunque últimamente se están unificando en un

término más utilizado “modelos de distribución de especies” (species distribution models) (Mateo *et al.*, 2011).

2.4. Proyecciones en algoritmo MaxEnt (actual y futuro)

Según Phillips y Dudik (2008) MaxEnt (Máximo Entropy) es un programa que estima la probabilidad de ocurrencia de máxima entropía (cercana a la uniforme) a partir de variables ambientales y datos de ocurrencia (presencia) representadas finalmente en un mapa, que permite conocer el área en la que podría desarrollarse una especie de planta o animal, mediante su representación en cartografía (Mateo *et al.*, 2011). MaxEnt ha sido usado en diferentes áreas como la ecología, conservación de la biodiversidad, especies en riesgo de extinción, evaluación del impacto del cambio climático sobre la distribución de organismos, patrones de distribución de fauna silvestre, detección temprana de enfermedades forestales y áreas semilleras de especies amenazadas (Mateo *et al.*, 2011; García-Aranda, Méndez-González y Hernández-Arizmendi, 2018).

Actualmente existen alrededor de 16 métodos que ayudan a la determinación de las áreas idóneas para el desarrollo de una especie, usando variables y metodologías diferentes de los cuales la mayoría ocupa datos de presencia y ausencia (Elith *et al.*, 2006). MaxEnt presenta también una ventaja a diferencia de la mayoría de los programas es que genera sus propias ausencias (background) (Mateo *et al.*, 2011) y es uno de los que mejor se ajusta para la modelación de especies cuando se utilizan datos de solo presencia (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007). Además, proporciona la contribución porcentual de cada variable utilizada en el modelo con la prueba Jackknife (Evangelista *et al.*, 2011).

En la construcción de modelos de distribución de especies regularmente se utilizan datos de solo presencia, puesto que son los que se encuentran disponibles en grandes

cantidades en museos y herbarios (Phillips *et al.*, 2006). En el mismo grupo de registros debe indicarse el porcentaje que se utilizará para modelación y evaluación del modelo (Phillips *et al.*, 2006). Algunos de los estudios utilizan 50 % de registros para pruebas de entrenamiento y el resto para validación (Ávila, Villavicencio, y Ruiz, 2014; García-Aranda *et al.*, 2018; Aceves-Rangel *et al.*, 2018).

2.5. Técnicas de evaluación del modelo

El programa MaxEnt genera dos evaluaciones al modelo el AUC (área bajo la curva) y la curva ROC (Curva Operativa por el Receptor) (Evangelista *et al.*, 2011). Estas curvas se obtienen a partir de los valores de sensibilidad (la tasa de verdaderos positivos) y de especificidad (la tasa de falsos positivos) del modelo (Phillips *et al.* 2006).

El AUC se ha utilizado ampliamente en estudios de modelación de la distribución de especies y mide la capacidad que tiene el modelo para determinar los sitios en el cual la especie puede sobrevivir (Elith *et al.*, 2006). El valor de AUC está comprendido entre 0 y 1, un valor de 1 indica que todos los casos se han clasificado correctamente; valores menores a 0.5 indican que el modelo es realmente malo, ya que clasifica erróneamente más casos que el azar (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007; Mateo *et al.*, 2011)

De acuerdo a Araújo, Pearson, Thuillers y Erhard (2005) y Swets (2015) en su clasificación la precisión de los modelos en cinco categorías, en función de los valores de AUC: de 0.50 - 0.60, se cataloga como insuficiente; 0.60 - 0.70 como pobre; 0.70 - 0.80 como valores promedio; 0.80 - 0.90 como bueno y 0.90 - 1, como excelente. Las correspondientes al AUC para los datos de entrenamiento (línea roja) y para datos de prueba (línea azul) describen un ajuste similar (Ávila *et al.*, 2014).

2.6. *Kuenm*

Kuenm un paquete del programa R que ayuda en el modelado de nichos ecológicos (MNE), su principal ventaja es que automatiza la calibración del modelo de distribución, creación de modelos finales, transferencias y evaluaciones. El proceso se implementa en tres fases: 1) calibración, 2) creación del modelo final y de evaluación y 3) análisis de riesgo de extrapolación (Cobos *et al.*, 2019).

Algo caracteriza el paquete *Kuenm* es: (1) que ofrece un proceso de evaluación ROC parcial, que no se considera en otros paquetes similares y automatiza la selección del mejor modelo; (2) permite a los usuarios probar distintos conjuntos de variables ambientales, que pueden ser utilizados para probar la hipótesis de la contribución de la variable, o para probar entre las áreas de calibración; (3) que automatiza los procesos de Modelo de Nicho Ecológico (MNE) que no han sido automatizados antes y (4) que ofrece la oportunidad de utilizar la evaluación de riesgos de extrapolación Paridad Orientada a la Movilidad (MOP) por sus siglas en inglés, la cual se puede analizar para múltiples escenarios a los que se transfirieron los modelos (Cobos *et al.*, 2019). Mobility Oriented Parity

El proceso de calibración y generación de modelos se crean tres modalidades diferentes del resultado con criterios diferentes de modelación: 1) Extrapolación libre; la respuesta de las diferentes áreas del medio ambiente donde se está modelando, sigue la tendencia de los datos ambientales de calibración, 2) Extrapolación Clamping-Sujeción; se sujeta solo al área de la periferia de la región de calibración del espacio ambiental, y 3) No Extrapolación; su respuesta se establece en cero si los entornos de la zona de transferencia son más altos que las zonas a través de la cual se calibraron los modelos (Cobos *et al.*, 2019).

2.7. Diagrama BAM

El diagrama BAM es una representación del área que va a ocupar la especie en un tiempo y espacio determinado, en el que influyen gran cantidad de factores ambientales, adaptabilidad, especies polinizadoras, depredadoras, dispersoras, etc. (nicho fundamental). Otras condiciones a las que se enfrenta la especie es que existan las condiciones bióticas «B» y abióticas «A» necesarias, además de tener accesibilidad de dispersión desde su región de origen «M». El área denotada por G_0 , es aquella que resulta de una intersección entre los tres espacios antes mencionados, la cual cuenta con las condiciones bióticas, abióticas favorables y de accesibilidad histórica a la dispersión (Soberón, Osorio-Olvera y Peterson, 2017).

El espacio G_0 , compuesto por las variables ambientales el nicho realizado (N_R) G_I es la región fuera del área de la capacidad para su dispersión (Soberón *et al.*, 2017). La región «A» es aquella que cuando se hace una reducción del número de interacciones se vuelve más favorable para la especie (Soberón *et al.*, 2017). Cuando se utiliza algún método para encontrar la distribución de la especie, el algoritmo combina los registros de presencia y las variables climáticas en un espacio «E», posteriormente lo proyecta a «G» en la que se convierte en una distribución potencial también conocida como dualidad de Hutchinson (Soberón *et al.*, 2017).

La delimitación geográfica del área de movilidad “M” (diagrama BAM) es importante para la calibración y en lo sucesivo, para la transferencia del modelo a nuevas áreas y tiempos (Soberón *et al.*, 2017). Aquí se identifican las variables ambientales asociadas a la distribución de la especie (Soberón *et al.*, 2017).

2.8. Modelos de Circulación General

Los MCG's son una representación futura en acumulación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) (Rodríguez, 2013) que se han liberado por actividades antropogénicas (PNUMA, 2005; Rodríguez, 2013; IPCC, 2013), estas se miden en concentraciones de (CO₂). Los investigadores han definido un conjunto de escenarios conocidos o sendas definidas llamadas, vías representativas de concentración (Representative Concentration Pathways) (RCP). Los cuales ofrecen los futuros posibles en la composición de la atmósfera siendo cuatro escenarios RCP's definidos para varios GEI (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) (Rodríguez, 2013).

Los modelos de circulación general (MCG's) en la actualidad son una herramienta confiable en la simulación de los efectos del cambio climático mundial y regional en el futuro, mediante la comparación de sus simulaciones con las observaciones de la atmósfera, el océano, la cromósfera y la superficie de la tierra. Sin embargo, la confianza de estos depende de una buena evaluación del desempeño y de una buena fuente de la base de datos con los que se pretenda trabajar (Rodríguez, 2013).

Existe gran número de estudios que proporcionan datos del cambio climático algunos de ellos a nivel mundial evaluados por Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) en donde se estiman cambios en la temperatura media global, extensión del hielo marino, elevación del nivel medio global del mar y pH del océano superficial (periodo 2000 - 2100). Con respecto a observaciones de 1986 - 2005 con concentraciones de CO₂, escenario de mitigación estricto (RCP 2.6), intermedios (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5), es probable el aumento de la temperatura

media global a finales del siglo XXI (0.3 a 1.7 °C bajo el escenario RCP 2.6; de 1.1 a 2.6 °C bajo RCP 4.5; de 1.4 a 3.1 °C bajo RCP 6.0; y de 2.6 a 4.8 °C bajo RCP.8.5 (IPCC, 2014).

2.9. Modelos y estudios de proyecciones futuras

Existe algunos estudios a nivel nacional que se han generado para observar el efecto del cambio climático en la distribución potencial de especies arbóreas en el bosque templado de México, usando dos MCG, el alemán (MPIECHAM5) y modelo inglés (UKMOHADGEM1) cada uno bajo dos escenarios de GEI A2 (altas concentraciones) y B2 (bajas concentraciones) aplicados en un horizonte de tiempo al año 2050 (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Otro de los estudios en los que su objetivo fue evaluar los efectos del cambio climático y en la distribución potencial de 16 especies de diferentes tipos de climas: Templado, Tropical y Semi árido a toda la república mexicana, a partir de información de la climatología como escenario base del año (1950 – 2000), tres Modelos de circulación General (GFDL-CM-2.0, MPIECHAM-5 y HADGEM-1) y dos trayectorias de concentración de CO² A2 y B2 bajo al futuro (2050).

En este otro estudio en el cual trabajaron con promedios mensuales de precipitación (mensual y total) y temperatura (máxima, mínima y promedio) a partir de 179 estaciones climáticas, con información recabada del periodo 1961 -1990 al cual fu llamado clima contemporáneo, con el fin de conocer el impacto del cambio climático sobre la vegetación, se hizo una proyección a los periodos 2030, 2060 y 2090 con tres MCG's (CGCM3, HadCM3, CM2.1) y dos escenarios de emisiones (A “pesimista” y B “optimista”) (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

2.10. Áreas de distribución potencial

Según Perosa *et al.* (2014) el área potencial se define como el lugar donde se tengan las condiciones donde una especie puede desarrollarse, entre estas condiciones puede influir las variables climáticas (precipitación, temperatura), edáficas (tipo de suelo y textura) y fisiográficas (Rzedowski, 1991). Con esta información se puede conocer las áreas de distribución potencial de las especies, lo que permitirá definir zonas prioritarias para la conservación y proponer posibles áreas de reforestación (Perosa *et al.*, 2014).

2.11. Distribución del género *Pinus* en México

Los primeros pinos que se establecieron en el actual territorio mexicano lo hicieron a través de grandes glaciaciones en el terciario temprano a través de la Sierra Madre Occidental y en el terciario medio, desde el oriente de estados unidos por la Sierra Madre Oriental y una segunda glaciación, ayudando a la migración que provino del Este por la Sierra madre Oriental. Condiciones climáticas de calor y clima seco ocasionaron que con el retroceso de los glaciares las especies ocuparan lugar en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Sánchez-González, 2008), ahora es considerado como un punto de diversificación (Rzedowski, 1991), aunque varias de estas especies emigraron al norte por estas dos sierras (Sánchez-González, 2008).

La importancia de los bosques se refleja en la ecología, económica, influye en el funcionamiento del ciclo hidrológico, régimen del fuego y ciclos biogeoquímicos, ofrece servicios ambientales como agua, oxígeno, captura de carbono, recreación y regulación del clima regional y local (Sánchez-González, 2008). México es considerado como uno de los países más diversos en cuanto a pináceas se refiere, al contar con 46 especies de *Pinus* 26 consideradas endémicas (55 %) (Sánchez-González, 2008).

Las cinco principales ecorregiones de la distribución del género *Pinus* en México según Rzedowski (1978) y Sánchez-González (2008) son:

- I.** Baja California Norte y Sur
- II.** Sierra Madre Occidental: Chihuahua, Durango, Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Zacatecas.
- III.** Sierra Madre Oriental: Coahuila, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí y Tamaulipas.
- IV.** Faja Volcánica Transmexicana: Aguascalientes, Colima, Distrito Federal, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz.
- V.** Sierra Madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra de San Cristóbal, Sierra de Oaxaca y Península de Yucatán: Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Campeche y Quintana Roo

La diversificación de las masas forestal del genero *Pinus* se desarrolla en altitudes entre los 1500 y 3000 msnm (Rzedowski, 1978).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio y especie

El estudio se llevó a cabo dentro del área de distribución actual de *P. engelmannii*, situada en la Sierra Madre Occidental (SMO), ubicada sobre alturas de 2500 hasta 3340 msnm (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González y López-Enríquez, 2012). Donde las temperaturas promedio están entre los 13 y 28 °C (García, 1998), y la precipitación varía de 500 a 800 mm anuales (Descroix, González y Estrada, 2004). *P. engelmannii* es un árbol de 15 a 25 metros de altura, de entre 60 - 80 cm de diámetro. En México se encuentra en Sonora, Chihuahua, Noreste (NE) de Sinaloa, Durango y una pequeña población en Zacatecas. En altitudes que van desde 1200 a 3000 msnm, más abundantemente entre los 2000 - 2500 msnm (Martínez, 1948; Farjón, Pérez y Styles, 1997) y algunas poblaciones aisladas al sur-este de Arizona y Nuevo México (Farjón *et al.*, 1997). Puede desarrollarse en suelos profundos (Perry, 1991; González-Elizondo *et al.*, 2012). A *P. engelmannii* se le conoce como pino real (Martínez, 1948; Farjón *et al.*, 1997). Es la única especie en la SMO con fascículos muy largos y hojas muy gruesas y largas (Farjón *et al.*, 1997).

3.2. Registros de presencia

Los registros fueron obtenidos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS, 2009), Naturalista (N), Artículos Científicos y Tesis (AC y T), Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) CONABIO. Se hizo limpieza de los registros (Garza-López *et al.*, 2016; Cobos *et al.*, 2019), eliminando duplicados, fuera del área de distribución (altitud, latitud y longitud) y fuera del espacio ambiental representado con precipitación y temperatura (Owens *et al.*, 2013) y a

través de Análisis de Componentes Principales (ACP). Se disminuyó la autocorrelación espacial a través del paquete Sp-Thin de R, usando una distancia de 5 km entre cada punto (Aiello-Lammens, Boria, Radosavljevic, Vilela y Anderson, 2015).

3.3. Variables bioclimáticas y Modelos de Circulación General (MCG)

En este trabajo se utilizaron variables climáticas del sitio CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) en formato raster de 1 km² (0.0083333333 grados angulares) de resolución, del periodo 1979 - 2013 (Karger *et al.*, 2017), omitiendo Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 por combinar información de precipitación y temperatura en la misma capa (Escobar, Lira-Noriega, Medina-Vogel y Townsend, 2014). Los modelos de circulación general utilizados fueron: HadGEM2-AO (Martin *et al.*, 2011), CSIRO-MK3-6-0 (Collier *et al.*, 2011), CCSM4 (Gent *et al.*, 2011) y CNRM-CM5 (Voldoire *et al.*, 2012), utilizando el RCP's 4.5 y 8.5, para los periodos 2041-2061.

3.4. Área de calibración (M)

Ésta se generó mediante un buffer de 70 km de radio de cada registro (Soberón y Nakamura, 2009; Cobos *et al.*, 2019).

3.5. Selección de variables

Para la selección de variables se realizó una modelación previa en MaxEnt 3.3.3k en «M», con los parámetros establecidos por default (Phillips *et al.*, 2006), empleando 50 % de los registros para entrenamiento y 50 % para evaluación (Ávila *et al.*, 2014; García-Aranda *et al.*, 2018; Aceves-Rangel *et al.*, 2018). La importancia de cada variable fue evaluada mediante pruebas de Jackknife (Ávila *et al.*, 2014; García-Aranda *et al.*, 2018). Las variables seleccionadas fueron aquellas con mayor contribución, de acuerdo a la biología de la especie y aquellas no correlacionadas ($r \leq 0.8$) (Elith *et al.*, 2006; Cruz-Cárdenas, Villaseñor, López-

Mata, Martínez-Meyer y Ortiz, 2014; Martínez-Méndez *et al.*, 2016). Las variables resultantes del proceso de selección se organizaron tres grupos con diferentes variables cada uno, usadas para probar la distribución de *P. engelmannii* (Cobos *et al.*, 2019), con el paquete ‘FactoMineR’ (Lê *et al.*, 2008) se obtuvo el índice de Kaiser Meyer Olkin (KMO) con quince variables bioclimáticas actuales (Hair, Black, Babin, Anderson y Tatham, 2006; Quillfeldt, Masello, Navarro y Phillips, 2013).

3.6. Calibración, generación, validación y transferencia

La calibración, creación, evaluación y transferencia del modelo se realizó en el programa R (R Core Team, 2019) utilizando el paquete *kuenm* (Cobos *et al.*, 2019). Los modelos generados fueron evaluados a través de su significancia estadística, ROC parcial (Curvas Operada por el Receptor), tasa de omisión ($E = 5\%$) ($\leq 5\%$), Criterio de Información Aikaike corregido para muestras pequeñas (AICc; Phillips *et al.*, 2006) y pruebas Jackknife (Cobos *et al.*, 2019). Se empleó ROC parcial para determinar el ajuste del modelo, omitiendo el AUC (Area Under Curve) ya que no predice en todo el espectro de área proporcional predicha presente de la curva ROC (Peterson, Papeş y Soberón, 2008), los registros se emplearon 241 para modelación de las fuentes (AC y T, N, INFyS, 2009, REMIB CONABIO) y para evaluación 105 de la fuente (GBIF).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. El modelo de idoneidad y el espacio ambiental

De un total de 507 registros de *P. engelmannii*, quedaron 241 para modelación y 105 independientes para evaluación. Se evaluaron 21 multiplicadores de regularización, 29 tipos de respuesta y tres grupos de variables ambientales, resultando 1 827 modelos candidatos. El modelo seleccionado fue de un regularizador de 3.5, quadratic + threshold (qt), resultados de modelación y evaluación del modelo AUC (1.327, 1.149), ROC parcial (0, 0), tasa de omisión de (0.05, 0.17) respectivamente. ROC parcial de cero indica un modelo de mayor robustez, AICc de 3107 con 11 parámetros y las variables, Bio 1 [Temperatura media anual °C], Bio 17 [Precipitación de 1/4 anual más seco (mm)], Bio 16 [Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm)], Bio 15 [Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación) (mm)] y Bio 5 [Temperatura máxima del mes más cálido °C]. Bio 6 [Temperatura mínima del mes más frío °C], tomada solo para construir el espacio ambiental Figura 1 inciso (a).

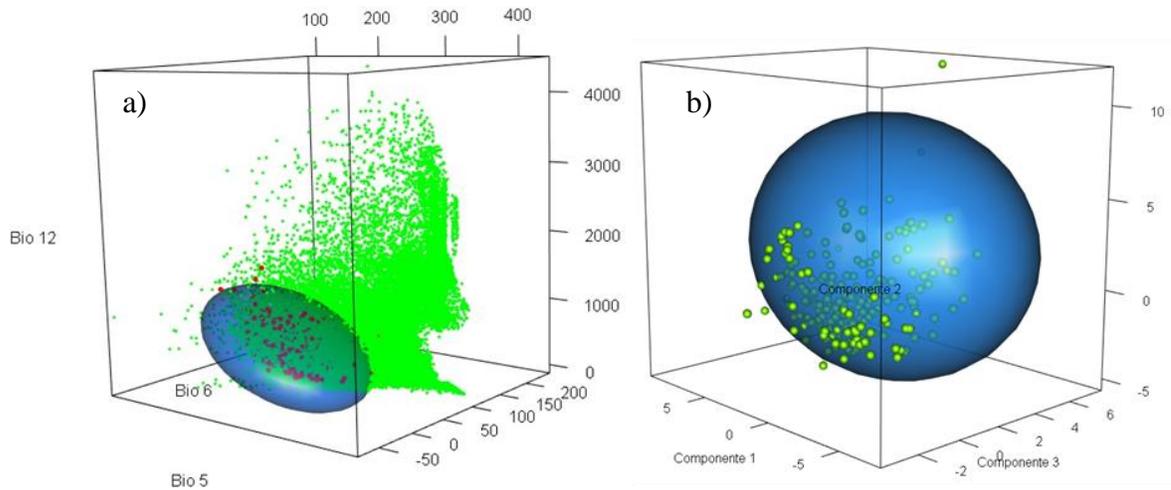


Figura 1. Espacio ambiental de *P. engelmannii* Carrière elaborado con: a) Bio 5, 6 y 12; y b) con 15 variables bioclimáticas a través de Análisis de Componentes Principales con 346 registros y elipsoides al 99 %.

El espacio ambiental de *P. engelmannii* con $n = 346$ registros, se muestran las tolerancias de la especie como sigue: precipitación entre 1682 y 113 mm, temperatura Bio 5 de 20 a 36°C y Bio 6 de -3 a 15°C (Figura 1a). En el espacio ambiental del ACP, se observa que algunos de los mismos registros, el 12.71 % del total tienden hacia el componente 1. Los primeros tres componentes principales explican el 87.28 % de la varianza total, el índice de Kaiser Meyer Olkin (KMO) de *P. engelmannii* (0.67) fue mayor a 0.5 lo que justifica el ACP (Figura 1b).

4.2. Idoneidad actual por estrato

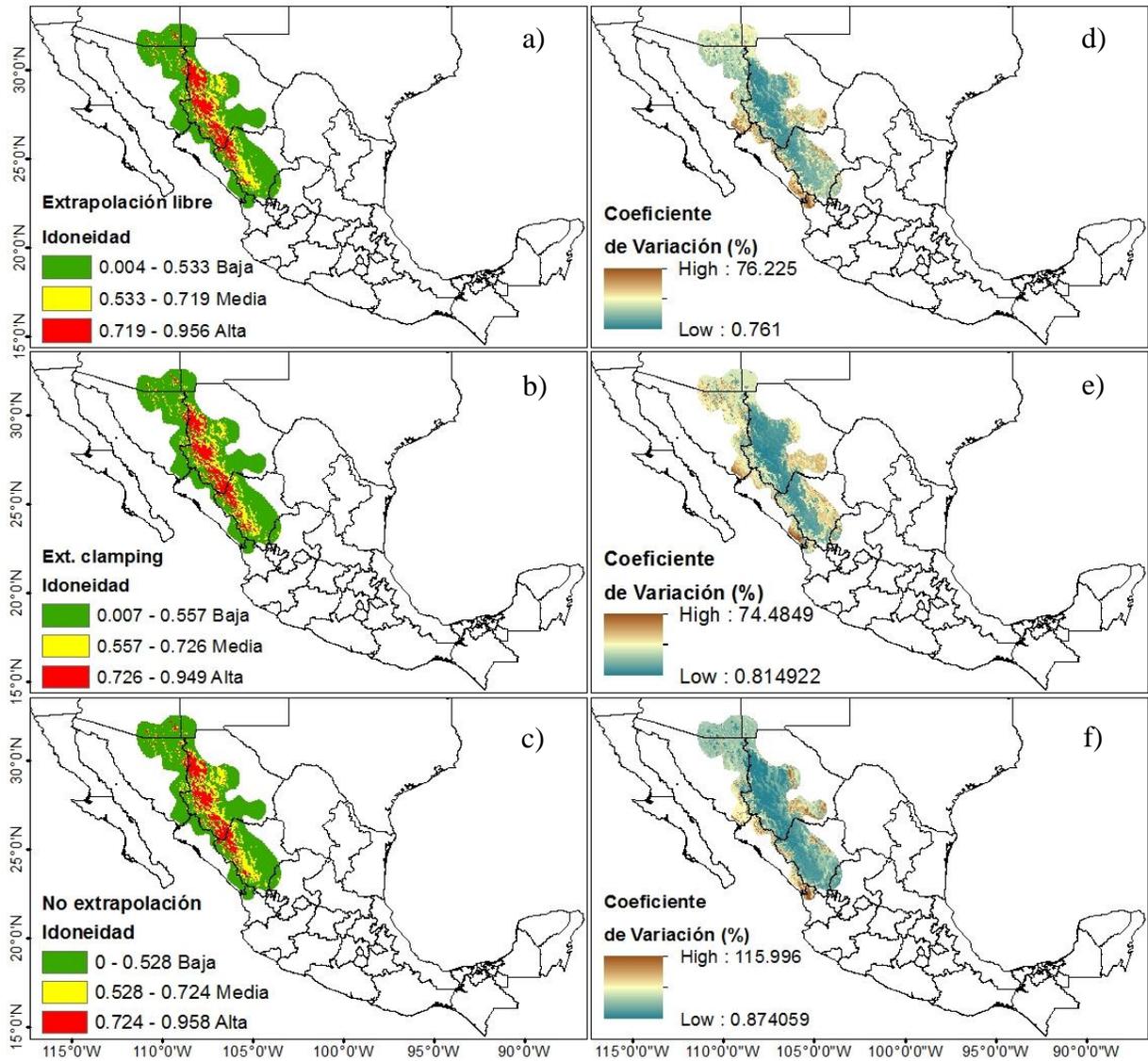


Figura 2. Modelo de idoneidad actual estratificado (alta, mediana y baja) para *P. engelmannii* Carrière: Extrapolación libre (a), Extrapolación Clamping (b), No Extrapolación (c) y el coeficiente de variación en cada tipo de extrapolación (d - f).

En los tres tipos de modelación, se observa una idoneidad similar de *P. engelmannii* en el área de calibración «M» (Figura 2a-2c). Las superficies en la idoneidad alta (no extrapolación) en los estados: Chihuahua (29 090 km²), Durango (9 310 km²) y Sonora (2 080 km²) representan el 12.82 % total del área de calibración. El estrato medio (51 080 km²)

constituye el 15.75 % y el bajo (231 570 km²) el 71.42 % (Figura 3). En cuanto a incertidumbre que tiene el modelo para predecir la distribución de esta especie, se observa que los lugares de donde se predice idoneidad alta, el coeficiente de variación (CV) es entre 2.36 y 11.09 % con un promedio de 6.60 % en la modalidad no extrapolación (Figura 2d-2f).

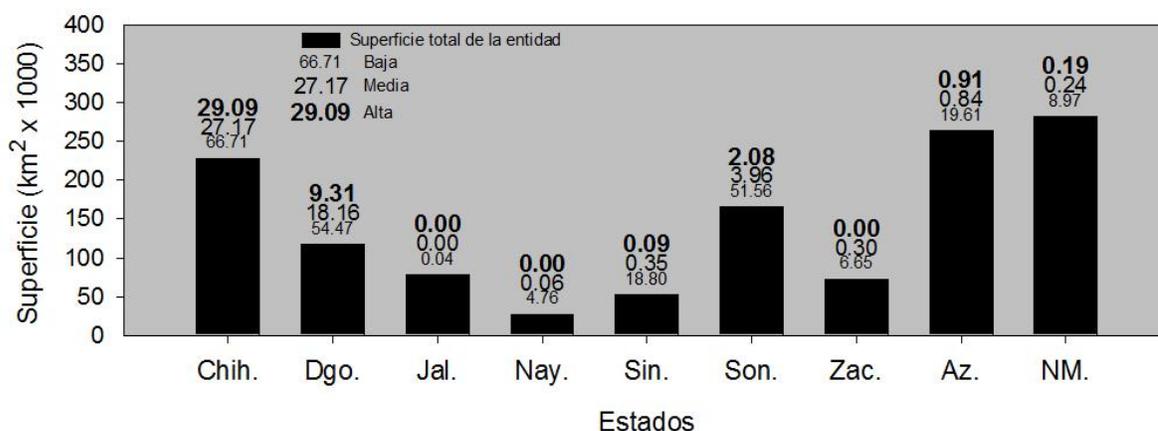


Figura 3. Superficie en cada tipo de idoneidad (alta, media y baja) para *Pinus engelmannii* Carrière por entidad federativa, en el escenario actual.

En la modelación de *P. engelmannii* la variable de mayor contribución fue Bio 1 [Temperatura media anual °C] con 75.6 % y Bio 17 [Precipitación del cuarto anual más seco (mm)] con 6.3 % el resto Bio 16 [Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm)], Bio 15 [Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación) (mm)] y Bio 5 [Temperatura máxima del mes más cálido °C] representaron solo el 0.9 %.

4.3. Distribución potencial futura (2050) de *Pinus engelmannii* Carrière

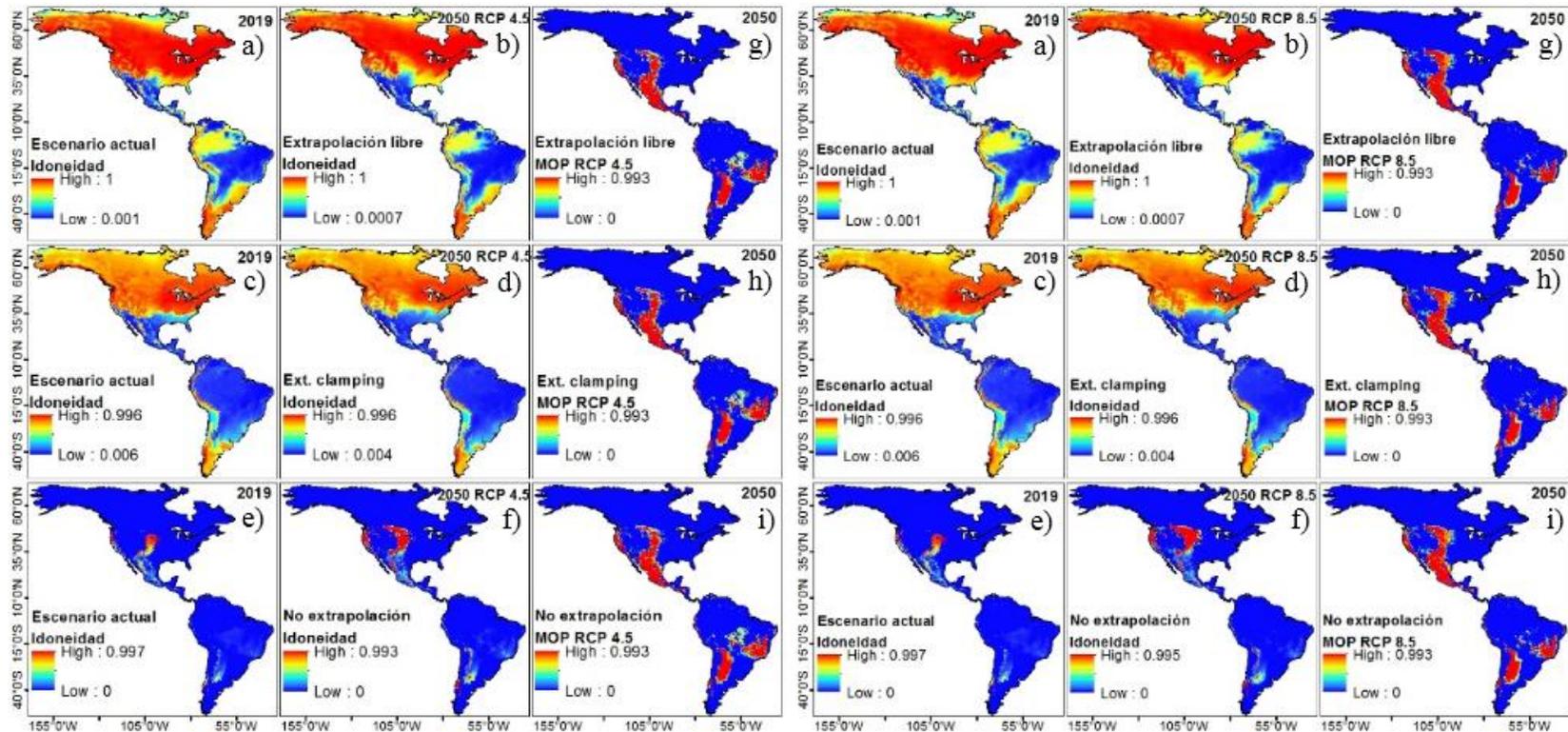


Figura 4. Modelo de distribución potencial para *P. engelmannii* Carrière con modalidades extrapolación libre (parte superior), extrapolación Clamping (parte media) y no extrapolación (parte baja), con RCP 4.5 y 8.5 (f) y MOP (g, h, i).

Los resultados demostraron que la idoneidad potencial predicha para *P. engelmannii* es similar entre RCP's 4.5 y 8.5 (Figura 4a-d). Se predice menor idoneidad en no extrapolación (Figura 4f) y mayor en Extrapolación libre (Figura 4b) esto debido a que el modelo no predijo más allá de las condiciones similares a las del área de calibración «M» (Cobos et al., 2019); la idoneidad se observa hacia mayores latitudes (33 a 64° N) y muy ligeramente hacia Sudamérica (25 a 55° S). En este trabajo se eligió la modalidad no extrapolación ya que la idoneidad predicha se asemeja más al área de distribución actual de la especie (Figura 4f) sin dejar fuera el hecho que la especie no tenga evolución, fue decidido ya que son áreas más creíbles en caso la especie llegara a desplazarse. El análisis de riesgo de extrapolación en la transferencia de modelos evaluada con (MOP) indicó que fue similar en las tres modalidades E, EC y NE por RCP 4.5 diferente en RCP 8.5 (Figura 4g-i).

4.4. Nuevas áreas, áreas de bajo y de alto impacto, predichas para *Pinus engelmannii* Carrière al 2050

Los resultados de transferencia muestran que no se predicen nuevas áreas para *P. engelmannii* en el área de calibración (Figura 5a y b); y la pérdida de áreas idóneas es mínima (área de alto impacto) para el RCP 4.5 y 8.5 (21 490 y 28 358 km²), sin embargo, al transferir el modelo a todo América, se predice gran superficie de nuevas áreas idóneas en ambos RCP's (342 260 y 529 660 km²) en el norte y oeste de EUA (Figura 5a y b) y en menor proporción en Sudamérica (244 280 y 301 100 km²).

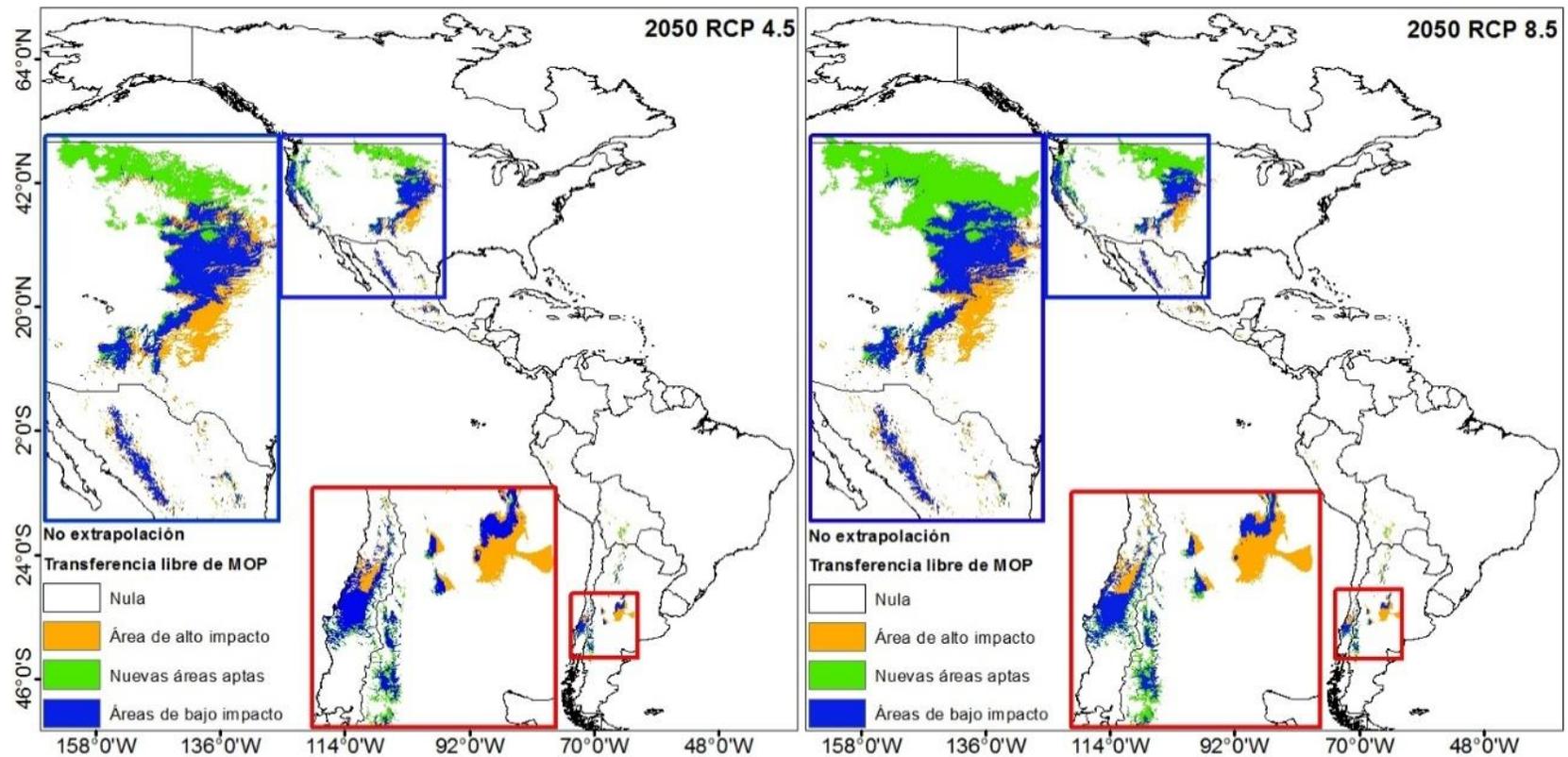


Figura 5. Área de idoneidad actual y futura de *Pinus engelmannii* Carrière para el 2050, promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG) en dos trayectorias de concentración representativas RCP's 4.5 a) y 8.5 b).

Las áreas de alto impacto (áreas idóneas próximas a desaparecer) se observan en el centro de EUA y Argentina, siendo muy similares en ambos RCP's y áreas de bajo impacto las cuales no representan nuevas condiciones de idoneidad en el futuro (2050).

Tabla 1. Superficie de áreas potenciales actual y futuro (2050) de *Pinus engelmannii* Carrière estimada en dos vías de concentración representativa RCP's 4.5 y 8.5, promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG's).

	RCP 4.5	RCP 8.5
Nuevas áreas aptas (km ²)	586 540	830 760
Áreas de alto impacto (km ²)	686 720	726 640
Áreas de bajo impacto (km ²)	1 031 610	95 710

RCP = vías de concentración representativas (Representative Concentration Pathways).

De la superficie total de transferencia a todo América de los modelos resultan nuevas áreas aptas para *P. engelmannii* (Figura 5) a mayor RCP 8.5 (830 mil km²) comparado con las áreas de pérdida de idoneidad (áreas de alto impacto 95 mil km²) la superficie es menor que en RCP 4.5 (686 720 km²). En el RCP 8.5, prevalecen las nuevas áreas sobre la pérdida de áreas idóneas, con 12.54 % más; pero en el RCP 4.5 se tiene una pérdida de 14.59 %. Es decir, la idoneidad aumenta a mayor concentración (Tabla 1) posiblemente alguna condición climática permita que se alcance una mayor superficie de idoneidad a una trayectoria de concentración más alta y se deba a Bio 1 [Temperatura media anual °C] y Bio 17 [Precipitación de 1/4 anual más seco (mm)] que fueron las de mayor respuesta en el modelo.

4.5. Perfil bioclimático actual y futuro para *Pinus engelmannii* Carrière

Tabla 2. Perfil bioclimático actual y futuro de *P. engelmannii* Carrière elaborado con 346 registros y cuatro Modelos de Circulación General y dos RCP's 4.5 y 8.5.

	Actual	CCSM4		CNRM-CM5		CSIRO-Mk3-6-0		HadGEM2-AO	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Bio 1	9.8 - 25.7	11.4 - 27.0	11.8 - 27.8	11.4 - 27.0	11.7 - 27.3	11.9 - 27.5	12.1 - 27.7	21.8 - 27.4	11.9 - 27.5
Bio 17	7 - 72	5 - 60	4 - 51	4 - 50	5 - 47	7 - 74	9 - 86	4 - 55	6 - 68
Bio 16	205 - 1073	185 - 1050	216 - 1064	202 - 1135	216 - 1091	196 - 1069	211 - 1125	186 - 1123	179 - 1072
Bio 15	64 - 120	65 - 119	71 - 127	68 - 123	70 - 124	64 - 120	62 - 119	68 - 125	60 - 121
Bio 5	20.1 - 36.2	21.2 - 37.8	22.0 - 38.9	21.9 - 38.3	21.9 - 38.0	22.3 - 39.2	22.8 - 38.8	22.3 - 38.5	22.2 - 38.6

CCSM4, CNRM, CSIRO y HADGEM = Modelos de Circulación General (MCG). RCP = trayectorias de concentración de CO₂.

La mayoría de los MCG's muestran rangos de distribución similares en el RCP 4.5 excepto HadGEM, no así en el RCP 8.5. La temperatura media podría aumentar aproximadamente 1.7 °C en Bio 1 al 2050. Las variables de temperatura (Bio1 y 5) tienden a aumentar y la precipitación (Bio 16) RCP 4.5 valor mínimo disminuye (12.75 mm) y valor máximo aumenta (21.25 mm) en el RCP 8.5 aumenta en valores mínimos y máximos (.5 - 15 mm), Bio 17 podría disminuir tanto en RCP's 4.5 (2 - 12.25 mm) y RCP 8.5 (1 - 9 mm) en valores mínimos y máximos respectivamente, en promedio de los cuatro MCG.

4.6. Histograma de frecuencias de variables de mayor contribución al modelo

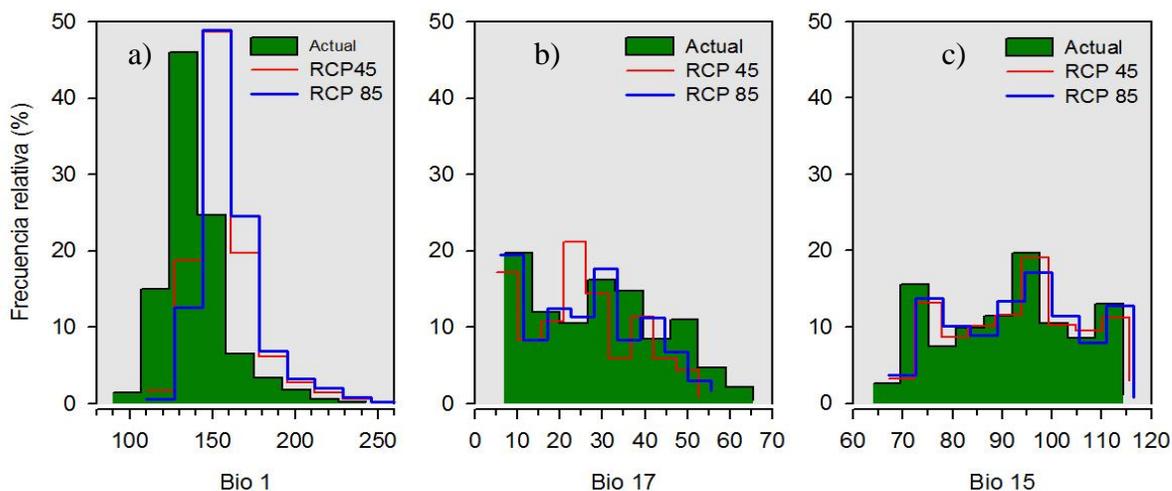


Figura 6. Histograma de frecuencias elaborado con 343 registros de *P. engelmannii* Carrière, representando a tres variables ambientales de mayor contribución Bio 1 (a), Bio 17 (b) y Bio 15 (c), en el periodo actual (barras color verde) y promedio de cinco MCG (líneas) en dos trayectorias de concentración RCP's 4.5 y 8.5.

El análisis de resultados indica que el 87 % de los registros de *P. engelmannii* se ubican actualmente (barras color verde) en una temperatura media anual entre 12 y 17 °C (Figura 6a); pero al 2050 la temperatura en este lugar podría ser aproximadamente 2 °C más en el RCP's 4.5 y 8.5. En Bio 17 los registros se distribuyen heterogéneamente de 10 a 60 mm, pero el 20 % de ellos se detectan en los 10 mm. En Bio 15 (Estacionalidad de la precipitación) el cambio podría ser mínimo hoy y al 2050, pero se distribuye heterogéneamente desde 65 a 115 %.

4.7. Altitud y temperatura en nuevas áreas y áreas de alto impacto estimadas para *Pinus engelmannii* Carrière al 2050

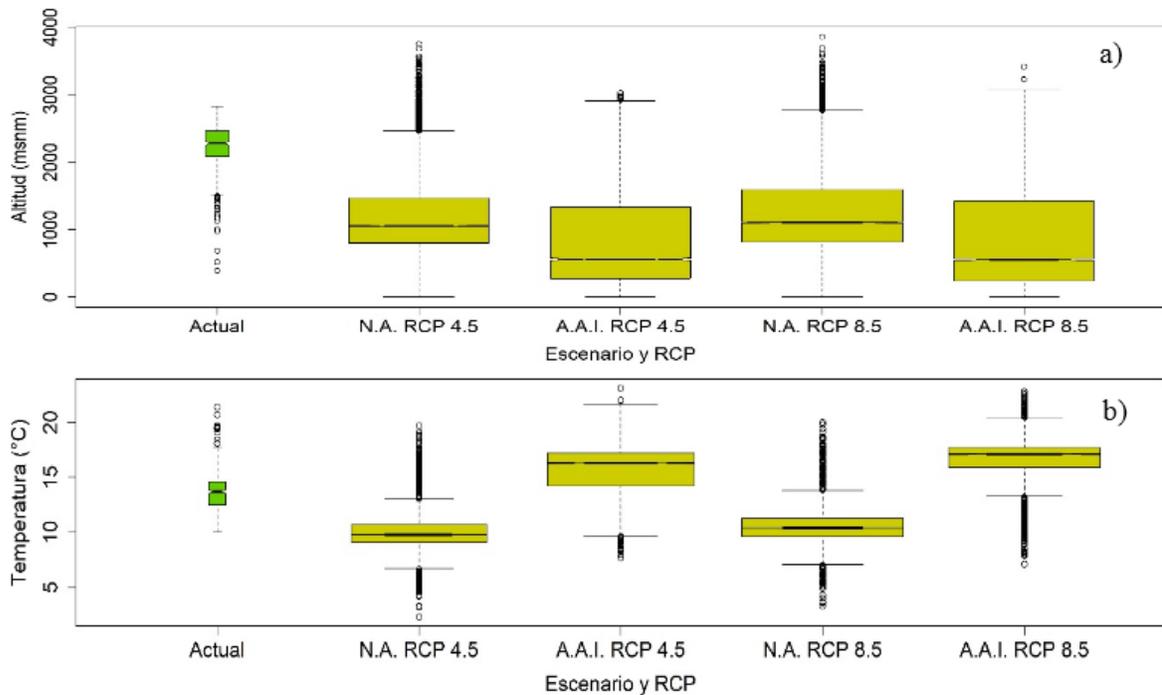


Figura 7. Altitud (a) y temperatura media anual Bio 1 (b) actual y futura promedio de cuatro Modelos de Circulación General (MCG's) estimada para *Pinus engelmannii* Carrière en nuevas áreas (N.A.) y áreas de alto impacto (A.A.I.) con RCP's 4.5 y 8.5.

La varianza de la altitud estimada entre los RCP's 4.5 es igual, como para el RCP's 8.5, pero difieren de la altitud actual (Figura 7a). El traslape de las altitudes de todos los RCP, indica provenir de una misma población. La altitud estimada en nuevas áreas (N.A.) y áreas de alto impacto (A.A.I.) acorde a la mediana para *P. engelmannii* es menor a la actual, aproximadamente 1 600 msnm tanto para el RCP 4.5 y RCP 8.5 (Figura 7a) en (A.A.I.) y 1 000 msnm en (N.A.). La varianza de la temperatura estimada es semejante por tipo de escenario N.A. (RCP's; 4.5 y 8.5) así como en A.A.I (RCP's; 4.5 y 8.5) pero ninguna igual que en escenario actual. El no traslape entre RCP's indican provenir de dos diferentes poblaciones. La temperatura al 2050 para nuevas áreas acorde a la mediana es menor aproximadamente 5 °C y mayor 4 °C en áreas de alto impacto (Figura 7b). En todos los casos

existe gran cantidad de valores atípicos por arriba y por abajo de la mediana en altitud (a) y temperatura (b) (Figura 7).

4.8. Ajuste del modelo de *Pinus engelmannii* Carrière y de otras especies

En la selección del mejor modelo se dio mediante los criterios de evaluación tasa de omisión, AICc y ROC parcial (Cobos et al., 2019), los criterios de evaluación se cumplieron generándose 1 827 modelos por MaxEnt para *P. engelmannii* estadísticamente significativo con una tasa de omisión 0.05, el valor mínimo AICc 3107 y ROC parcial cero el cual indica un modelo de mayor robustez criterios que también fueron evaluados por Cobos et al. (2019) en las especies de garrapata (*Amblyomma americanum* Linnaeus) y sapo *Peltophryne empusa* Cope, donde los valores de los estadísticos del mejor modelo son tasa de omisión (0.04 y 0), Criterio de Información Aikaike AICc (3346.46 y 1508.39) y ROC parcial (0 y 0.03) respectivamente. Vilges *et al.* (2017) encontraron una tasa de omisión similar para las especies *Amblyomma cajennense* s.s. y *Amblyomma sculptum* Berlese con un valor 0.05, lo que indica un buen desempeño del modelo.

4.9. El espacio ambiental de varias especies

Aguirre-Gutiérrez, Serna-Chavez, Villalobos-Arambula, Pérez y Raes (2015) elaboraron un espacio ambiental por medio del método de ACP para cinco especies (*P. ayacahuite*, *P. ayacahuite* var. *veitchii*, *P. strobiformis*, *P. strobus* var. *chiapensis* y *P. lambertiana*) explicando un primer eje que atribuye más en isothermalidad, la radiación solar y la temperatura promedio del trimestre más frío explicando 32,3 % de la varianza y un 28 % de la variación en pH del suelo, la precipitación anual, la elevación y variables de NDVI, los resultados fueron diferentes a los encontrados en el presente estudio para *P. engelmannii* dicha diferencia podría deberse a la diferencia de variables con las que fue construido el

espacio ambiental mediante ACP ya que para *P. engelmannii* los tres primeros ACP aportan un 87.28 % con variables Bio 1 con 75.6 % y Bio 17 con 6.3 % de mayor contribución.

Otros estudios han hecho uso de la misma técnica lo único semejante a nuestros resultados es la forma en que se emplearon las variables con las que se elabora el ACP ya que se está tratando de una especie arbórea *P. engelmannii* a diferencia de los autores Escobar *et al.* (2014) quienes para un hongo *Pseudogymnoascus destructans* (Blehert & Gargas) Minnis & D.L. Lindner reportan su espacio ambiental por ACP el 95 % de la varianza total. Vilges *et al.* (2017) para una plaga de garrapatas realizan el espacio ambiental por medio de ACP para *A. cajennense* y *A. sculptum*, con 7 variables bioclimáticas los primeros tres componentes explican el 92.43 % y el 88.73 % de la información, respectivamente. Esta técnica para la determinación de la varianza que explican las variables con las que se generó el modelo.

En este estudio el espacio ambiental generado por medio de ACP realizado con 15 variables bioclimáticas los primeros tres componentes explican el 87 % de la información de la especie. Owens *et al.* (2013) han obtenido el espacio ambiental con variables de temperatura y precipitación dentro de «M» para dos insectos *Bactrocera invadens* Drew (1.6 a 26.6 °C y de 144 a 4827 mm) y *Anopheles gambiae* Giles (18.5 a 22.3 mm y 214 a 438 mm).

En esta investigación la selección y evaluación de variables mediante ACP's para *P. engelmannii* se justifica con un índice KMO (0.67), Quillfeldt *et al.* (2013) obtuvieron el valor de 0.667 en la comparación de superposición de nichos en aves (*Pachyptila belcheri* Mathews y *Pachyptila desolata* Gmelin) el uso de los ACP's fueron relevantes (> 0.5).

4.10. Las modalidades y sus ajustes

De las tres diferentes modalidades de extrapolación (E, E.C. y N.E.) Owens *et al.* (2013), las consideran para modelación de las especies *B. invadens* y *A. gambiae*, encontraron que las dos primeras extrapolan rangos extremos de temperaturas muy altas y muy bajas de idoneidad, siendo no extrapolación la que aparece libre de extrapolación irrazonable para las dos especies elegida para la transferencia de los dos modelos. Escobar *et al.* (2014) utilizan E y EC para *P. destructans*, Vilges *et al.* (2017) prefiere E y EC para la modelación de *A. cajennense* y *A. sculptum*, ya que no muestran mucha diferencia en la predicción, mientras que Cobos *et al.* (2019) han considerado E el que mejor y elegida para modelación de *A. americanum* y *P. empusa*.

Modelando con parámetros automáticos de MaxEnt, Aceves-Rangel *et al.* (2018) encuentra que la mayor idoneidad de *P. engelmannii* se ubica en los estados de Chihuahua y Durango, como se muestra en este estudio. Así mismo, Aguirre y Duivenvoorden (2010) encuentran una extensión de 318 203.8 km² en México para esta especie, similar al presente estudio donde obtubieron 324 307.80 km² la cifra aumenta ya que no solo se cuenta con la idoneidad encontrada en México sino que también en los estados de Arizona y Nuevo México en EUA (Figura 3). En un estudio realizado más recientemente por Aceves-Rangel *et al.* (2018) reportan que *P. engelmannii* es una de las tres especies con menor distribución potencial actual con superficie 819.1 km² solo en México.

Sánchez-González (2008) indica que la idoneidad de *P. engelmannii* se encuentra en las regiones I (Baja california norte y sur) II (Sierra madre Occidental) y muy poco en la región III (Sierra Madre Oriental). Otros estudios importantes también la mayor idoneidad

de *P. engelmannii* en el estado de Durango (Rzedowski, 2006; González-Elizondo *et al.*, 2012; Bustamante-García *et al.*, 2012).

La evaluación del riesgo de extrapolación del modelo fue realizada con MESS (multivariante similitud ambiental métrica de superficie) para la especie sapo de caña *Bufo marinus* Linnaeus, 1758 (Elith, Kearney y Phillips, 2010), sin embargo, la técnica ha sido mejorada (Owens *et al.*, 2013) para la evaluación del riesgo de extrapolación en la transferencia del modelo (MOP) usándose para las especies de insectos *B. invadens* y *A. gambiae*. En base a este nuevo método otros autores como Escobar *et al.* (2014) en las especies *P. destructans*, Townsend y Lindsay (2015) en especie de mosquito *Aedes notoscriptus* Skuse, Vilges *et al.* (2017) en garrapata *A. cajennense* y *A. sculptum*, Cobos *et al.* (2019) para especies de garrapata *A. americanum* y sapo *P. empusa*. Algunos autores (Mesgaran, Cousens y Webber, 2014) quienes implementaron la técnica de evaluación del riesgo de extrapolación ExDet que es considerada también una técnica correcta.

4.11. La posible migración de las especies

La respuesta de las especies ante el factor cambio climático, para algunas será el desplazamiento. Aunque existen otros factores no climáticos, algunas de estas tenderán a mayores o menores altitudes y latitudes (Aitken *et al.*, 2008; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Sáenz-Romero *et al.*, 2015). En el presente estudio se encontró que las condiciones de idoneidad para *P. engelmannii* se presentan a mayores latitudes (42° N y 44° S), así como hacia mayores altitudes, aproximadamente de 500 m. En un estudio, Sáenz-Romero *et al.* (2010) reportan que para el año 2060 *P. leiophylla* tiende a migrar a menores latitudes, y *P. chiapensis* hacia mayores latitudes. Encuentran también para la migración de la flora de México a EUA, las posibilidades serán mayores durante las tendencias de enfriamiento más

que en las tendencias de calentamiento. Esta trayectoria de rastreo del clima trae complicaciones ya que las dos rutas de migración, Sierra Madre Occidental y Oriental terminan al sur de EUA.

De los resultados encontrados de transferencia del modelo para *P. engelmannii* se obtuvieron nuevas y mayores áreas a mayor concentración del periodo actual hacia el (2050). En otros estudios como el de Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) para dos abetos (*Abies guatemalensis* Rehd. *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham) y diez especies de pino (*P. douglasiana* Martínez, *P. hartwegii* Lindl., *P. lawsonii* Roetzl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. michoacana* Martínez, *P. montezumae* Lamb, *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. rzedowskii* Madrigal & M. Caball. y *P. teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham.) señalan que la mayoría de las especies disminuyen la distribución potencial con escenarios de emisiones altas, aunque solo se está prediciendo en áreas de menor superficie comparadas con las que se realiza para *P. engelmannii* en el actual estudio. Vásquez-Morales *et al.* (2014) reportan que para la especie *Magnolia schiedeana* Schlecht se proyectan una reducción de su distribución potencial actual de 84 333 km² para el periodo 2040 y 82 995 km² para el año 2080. Vilges *et al.* (2017) documentan que la superficie de las especies *A. cajennense* y *A. sculptum*, se verá reducida hasta un 90 % a los periodos (2050 y 2070), mientras que en *P. destructans* es del 50 % (Escobar *et al.*, 2014), después de la evaluación de riesgo de extrapolación con MOP.

4.12. Variables que contribuyen a predecir la distribución en las diferentes especies

En este estudio Bio 1 (75.6 %) fue la que más contribuyó al modelar la distribución de *P. engelmannii* cuyos rangos variaron de 9.8 a 27.8 °C, al igual que lo encontrado por

Aceves-Rangel *et al.* (2018) Bio 1 (24.9 %) con mayor contribución y valores del espacio ambiental de 10.1 a 24.9 °C. De acuerdo con Eguiluz (1982), en donde realiza el estudio de 77 especies del género *Pinus* en México, muestra que la distribución de la mayoría de estas depende de temperatura *P. engelmannii* hasta -23 a 42 °C, con precipitación 500 - 1400 mm, altitud de 1250 - 2600 msnm. En un trabajo de investigación para 16 especies de coníferas por Ramos-Dorantes *et al.* (2017), encuentran que Bio 1 fue la más importante para 10 especies, con una temperatura media 13.39 °C.

Otro estudio realizado por Manzanilla *et al.* (2019) indica que la variable de mayor contribución para *P. pseudostrobus* fue Bio1 (41.3 %), suelo (18.3 %) y Bio12 (precipitación total anual: 14.3 %). Pero no para *P. montezumae*, donde suelo (31.1 %), altitud (29 %) y Bio1 (20.5 %) fueron las más importantes. Eguiluz (1982) reporta condiciones de temperatura máxima y mínimas en las que *P. engelmannii* está incluida, 11 especies de hasta 45 °C y 5 especies de -23 °C, valores máximos y mínimos de temperatura. Con estos datos podría creerse que la temperatura podría ser influyente en la distribución potencial de *P. engelmannii* (Eguiluz, 1982).

4.13. Perfil bioclimático de *P. engelmannii*

Beaumont, Hughes y Poulsen (2005) determinaron que los histogramas se puede encontrar diferentes patrones, si se tiene una distribución normal o sesgada se clasifican como relevante, de gran influencia en el perfil bioclimático, mientras que sin patrón o truncados como irrelevantes. El construir un histograma de frecuencias se debe tener conocimiento estadístico y cuál será el número de clases (Sturges, 1926) ya que estas son manipulables. Los histogramas de frecuencia construidos a lo propuesto por Sturges (1926) con 346 registros, Bio 1 y Bio 17 de *P. engelmannii*, muestran sesgo a la izquierda lo contrario con Bio

15 la cual no responde a ningún patrón, y consideradas Bio 1 y Bio 17 como variables relevantes en la distribución potencial en esta especie.

Algunos autores han creído conveniente la realización de los histogramas de frecuencia de las variables de modelación de mayor contribución García-Aranda, Cantú-Ayala, Estrada-Castillón, Pando-Moreno y Moreno-Talamantes (2012), para la especie *Taxus globosa* Schlecht. García-Aranda *et al.* (2018) en la evaluación de tres especies de coníferas *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola*, de los cuales reportan en su mayoría histogramas sesgados y normales, variables consideradas relevantes para la predicción de distribución potencial de las especies Beaumont *et al.* (2005).

Con el apoyo de la literatura y utilización de gráficos de caja como herramienta útil para el análisis de los resultados Chambers (1983), se pudieron comparar varianzas y medianas de altitud (Figura 9a) y temperatura (Figura 9b), Vásquez-Morales *et al.* (2014) representa mediante tres diagramas de frecuencias y gráficos de caja la altitud de periodo actual (2014), y futuro (2040 y 2080) para la especie *M. schiedeana* Schlecht, con alturas promedio y puntos aberrantes en altitudes cada vez menores a la actual. Sucediendo algo similar a nuestro estudio en la evaluación de *P. engelmannii* donde a escenario de emisiones RCP's 4.5 y 8.5 y periodo 2050 (Figura 9a) con medianas de altitud inferiores a la altura promedio actual.

El análisis de modelación de *P. engelmannii* indica preferencia de climas a menor altitud en ambos RCP's (figura 7a) y a mayores latitudes (figura 5), ir a menores temperaturas al 2050 en (N.A.) y las más próximas a desaparecer (A.A.I.) con temperaturas por arriba de la media actual (Figura 7b).

5. CONCLUSIONES

Se logró proyectar la distribución potencial para *Pinus engelmannii* Carrière actual (2019) y potencial (2050) con los dos escenarios de emisiones de CO₂ RCP's 4.5 y 8.5, y los cuatro modelos de circulación general a partir de las variables ambientales analizadas con la prueba Jackknife y la no correlación entre ellas, se mostró que cinco fueron las de mayor contribución para modelar la distribución potencial de la especie, la temperatura media anual, precipitación de un cuarto anual más seco y húmedo, estacionalidad de la precipitación y temperatura máxima del mes más cálido. Las superficies de mayor idoneidad actual dentro del área de calibración «M» están en los estados: Chihuahua (29 090 km²), Durango (9 310 km²) y Sonora (2 080 km²).

En el área de calibración (distribución actual de *P. engelmannii*) no se predicen nuevas áreas idóneas, pero tampoco pérdida de áreas idóneas. A mayores concentraciones de CO₂ (RCP 8.5), el modelo predice mayor superficie de áreas idóneas para esta especie y al ser un modelo estadísticamente significativo permite rechazar la hipótesis nula donde se plantea que el cambio climático proyectado en trayectorias de concentración de CO₂ (RCP's) de 4.5 y 8.5 no afectará la cantidad de hábitat idóneo para *P. engelmannii* Carrière al año 2050. El desplazamiento de las nuevas áreas idóneas para *P. engelmannii* al año 2050 en el continente americano, se observa hacia mayores latitudes (42° N y 44° S), así como hacia mayores altitudes, aproximadamente de 500 m con respecto a las áreas de alto impacto en ambos RCP's; y hacia menores temperaturas, cerca de 2.5 °C, en ambos RCP's.

6. REFERENCIAS

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J. M., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52, 1043–1057.
- Aguirre G. J. & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 875–882.
- Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chavez, H. M., Villalobos-Arambula, A. R., Pérez, de la R. J. A., & Raes, N. (2015). Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely-related Mexican white pines. *Diversity and Distributions*, 21(3), 245–257. DOI: 10.1111/ddi.12268.
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38, 541–545. Doi: 10.1111/ecog.01132.
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1, 95–111. Doi: 10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x.
- Alberto, P. J. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional De Investigacion Y Tecnologia Agraria Y Alimentaria, Madrid. 253 P. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., &

Zickfeld, K., (2018b). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfeld (eds.)]. In Press. 46–91.

Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuillers, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11, 1504–1513. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x.

Ávila, C. R., Villavicencio, G. R., & Ruiz, C. J. A. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 92–109. Doi: 10.29298/rmcf.v5i24.322.

Beaman, J. H. & J. W. Andresen. (1966). The vegetation, floristics and phytogeography of the summit of Cerro Potosi, Mexico. *American Midland Naturalist*. 75(1), 1-33. Doi: 10.2307/2423480.

Beaumont, L. J., Hughes, L., & Poulsen, M. (2005). Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, 186, 250–269. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.030.

- Benito de Pando B., & Peñas de Giles, J. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7), 100–119.
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM – a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6(1), 8–9.
- Bustamante-García, V., Prieto-Ruíz, J. Á., Merlín-Bermudes, E., Álvarez-Zagoya, R., Carrillo-Parra, A., & Hernández-Díaz, J. C. (2012). Potencial y eficiencia de producción de semilla de *Pinus engelmannii* Carr., en tres rodales semilleros del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 18(3), 7–21. Doi: 10.21829/myb.2012.183355.
- Challenger, A., & Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres, en *Capital Natural de México*, Conocimiento Actual de La Biodiversidad, I, 87–108.
- Chambers, John M., William S. Cleveland, Beat Kleiner, and Paul A. Tukey. "Comparing Data Distributions." In *Graphical Methods for Data Analysis*, 62. Belmont, California: Wadsworth International Group, 1983. ISBN 0-87150-413-8 International ISBN 0-534-98052-X.
- Cobos, M. E., Townsend, P. A., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 1, 1–15. Doi: 10.7717/peerj.6281.
- Collier, M. A., Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Wong, K. K. H., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J. I., Suppiah, R., Antony, J., El Zein, A., & Atif, M.

- (2011). The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: Participation in CMIP5 and data publication. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 2691–2697. Doi: 10.22499/2.6301.001.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2011). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal, Colegio de Posgraduados. Montecillo, Edo. De Méx., México. 472 p.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., y López-Sandoval, J. A. (2016). Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135–148. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., & Ortiz, E. (2012). Potential distribution of humid mountain forest in México. *Botanical Sciences*, 90(3), 331–340.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E., & Ortiz, E. (2014). Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 20(2), 187–201. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.034.
- Descroix, L., González, J. L., & Estrada, J. (2004). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP - IRD. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.
- Eguiluz, P. T. (1982). Clima y distribución del género *Pinus* en México. *Ciencia Forestal*, 7(38), 30–44.

- Elith J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nacazawa, Y., Overton, J. M., Townsend, P. A., Phillips, J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., & Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129–151.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330–342. Doi: 10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x.
- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Townsend, P. A. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221–229. Doi: 10.4081/gh.2014.19.
- Evangelista, P. H., Kumar, S., Stohlgren, T. J., & Young, N. E. (2011). Assessing forest vulnerability and the potential distribution of pine beetles under current and future climate scenarios in the Interior West of the US. *Forest Ecology and Management*, 262, 307–316. Doi: 10.1016/j.foreco.2011.03.036.
- Farjón, A., Perez, J., & Styles, B. (1997). A field guide to the pines of Mexico and Central America, Kew Published, Royal Botanic Gardens, Oxford Forestry Institute, University of Oxford, Oxford. 147 p.

- García, E. (1998). Climas (Clasificación de Köppen, modificada por García) Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México. 90 p.
- García-Aranda, M. A., Cantú-Ayala, C., Estrada-Castillón, E., Pando-Moreno, M., & Moreno-Talamantes, A. (2012). Distribución Actual y Potencial de *Taxus Globosa* (Taxaceae) en México. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 6(2), 587–598.
- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3–13. Doi: 10.19136/era.a5n13.1396.
- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J. M., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Toledo, J. F., Domínguez-Álvarez, F. A., & Sáenz-Romero, C. (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences*, 94(1), 76–87. Doi: 10.17129/botsci.500.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., ... Zhang, M. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991.
- Gómez, D. J. D., Monterroso, R. A. I., Tinoco, R. J. A., Toledo, M. M. L., Conde, Á. C., & Gay, G. C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmosfera*, 24(1), 31–52.

- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100: 351–403. Doi: 10.21829/abm100.2012.40.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147–186. Doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.
- Gutiérrez, 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, 179–188. Doi: 10.7550/rmb.37737.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E. & Tatham, R. L. (2006). *Multivariate Data Analysis*. Recuperado de https://is.muni.cz/el/1423/podzim2017/PSY028/um/_Hair_-_Multivariate_data_analysis_7th_revised.pdf.
- Hamrick, J. L. (2004). Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management*, 197, 323–335. Doi: 10.1016/j.foreco.2004.05.023.
- INEGI. (2017). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VI / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 1–204.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2014). En la base de escritura Equipo, R. K. Pachauri, y L. A. Meyer (Eds.), *El cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III de la evaluación quinto informe de la Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC. 157p.

- IPCC, (2018a). Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1.5 ° C. Un informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 ° C por encima de los niveles preindustriales y las vías de emisión de gases de efecto invernadero globales relacionadas, en el contexto de fortalecer la respuesta global a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos para erradicar la pobreza [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, PR Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, JBR Matthews, Y. Chen, X. Zhou, MI Gomis, E Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 32 pp.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4:170122, 1–20. Doi: 10.1038/sdata.2017.122.
- Kumar, S., & Stohlgren, T. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and The Natural*, 1(4), 94–98.
- Leal-Nares, Ó., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D., Geneletti, D., López-Granados, E., & Carranza, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, 1152–1170. Doi: 10.7550/rmb.27199.

- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768–1771. Doi: 10.1126/science.1156831.
- Manzanilla, Q. U., Delgado, V. P., Hernández, R. J., Molina, S. A., García, M. J. J., & Rocha, G. M. D. C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botanica Mexicana*, 126, 1–25. Doi: 10.21829/abm126.2019.1398.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., ... Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. Doi: 10.5194/gmd-4-723-2011.
- Martínez, M. (1948). Los Pinos mexicanos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 361 p.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5–24. Doi: 10.17129/botsci.508.
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217–240. Doi: 10.4067/S0716-078X2011000200008.

- Mesgaran, M. B., Cousens, R. D., & Webber, B. L., (2014). Here be dragons: a tool for quantifying novelty due to covariate range and correlation change when projecting species distribution models. *Diversity and Distributions*, 20, 1147–1159. Doi: 10.1111/ddi.12209.
- Miranda, S. C. A., Geada, L. G., & Sotolongo, S. R. (2016). Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Avances*, 18(1), 28–35.
- Osorio, O. L., Narayani, B., Soberón, J., & Falconi, M. (2016). Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distributions models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4.
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E., & Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011.
- Palacios, R. A., Rodríguez, L. R., Hernández, F. M. D. la L., Jiménez, M. E., & Tirado, T. D. (2016). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 35–46. Doi: 10.29298/rmcf.v7i34.81.
- Palma-Ordaz, S., & Delgadillo-Rodríguez, J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), 587–597. Doi: 10.17129/botsci.135.

- Perosa, M., Rojas, F., Villagra, P., Tognelli, M. F., Carrara, R., & Álvarez, J. A. (2014). Distribución potencial de los bosques de *Prosopis flexuosa* en la Provincia Biogeográfica del Monte (Argentina). *Ecologia Austral*, 24, 238–248.
- Perry, J. (1991). *The Pines of Mexico and Central America*, Timber Press, Inc. Printed in Hong Kong, Portland, Oregon. 225 p.
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63–72. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008.
- Phillips, S. J. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175. Doi: 10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. P. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning - ICML '04*, 83. Doi: 10.1145/1015330.1015412.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2005). Cambio climático. Manual de Ciudadanía Ambiental Global. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. México, D. F. México. 33p.

- Quillfeldt, P., Masello, J. F., Navarro, J. & Phillips, R. A. (2013). Year-round distribution suggests spatial segregation of two small petrel species in the South Atlantic. *Journal of Biogeography*, 40, 430–441. Doi: 10.1111/jbi.12008.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ramos-Dorantes, D. B., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., & Gernandt, D. S. (2017). Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 215–223. Doi: 10.1016/j.rmb.2017.01.028.
- Rodríguez, M. L. (2013). Estimaciones objetivas sobre la evolución regional y global del cambio climático. *Polígonos Revista de Geografía*, (24), 133–162. Doi: 10.18002/pol.v0i24.844.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Editorial Limusa, México, D.F. 432 p.
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y Orígenes de la flora fanerogámica de México. Mich., México. *Acta Botanica Mexicana*, 14, 3–21.
- Rzedowski, J., (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595–623. Doi: 10.1007/s10584-009-9753-5.

- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*, 93(4), 709–718. Doi: 10.17129/botsoci.86.
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14(1), 107–120. Doi: 10.21829/myb.2008.1411222.
- Saupe, E. E., Barve, V., Myers, C. E., Soberón, J., Barve, N., Hensz, C. M., Peterson A. T., Owens, H. L., & Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 11–22. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.04.001.
- Semarnat. (2006). Capítulo 5. Aprovechamiento de los recursos forestales, pesqueros y de la vida silvestre. Semarnat, Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *PNAS*, 106, 19644–19650. Doi: 10.1073/pnas.0901637106.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 437–441. Doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.011.
- Sosa, D. L., Méndez, G. J., García, A. M., Cambrón, S. V., Villarreal, Q. J., Ruiz, G. C., & Montoya, J. J. (2018). Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 187–208. Doi: 10.29298/rmcf.v9i47.159.

- Stockwell, D., & Peters, D. (1999). The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2), 143–158. Doi: 10.1080/136588199241391.
- Sturges, H. A., (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21 (153), 65–66.
- Swets, J. A. (2015). Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems, *Science*, 240(4857), 1285–1293.
- Telwala, Y., Brook, B. W., Manish, K., & Pandit, M. K. (2013). Climate-induced elevational range shifts and increase in plant species richness in a himalayan biodiversity epicentre. *Plos One*, 8(2), 1–8. Doi: 10.1371/journal.pone.0057103.
- Townsend, P. A., & Lindsay, P. C. (2015). Global potential distribution of the mosquito *Aedes notoscriptus*, a new alien species in the United States. *Journal of Vector Ecology*, 40(1), 191–194. Doi: 10.1111/jvec.12151.
- Trotta-Moreu, N., Lobo, J. M., & Cabrero-Sañudo, F. J. (2008). Distribución conocida y potencial de las especies de Geotrupinae (Coleoptera: Scarabaeoidea) en México. *Acta Zoológica Mexicana*, 24(2), 39–65. Doi: 10.21829/azm.2008.242702
- Vásquez-Morales, S. G., Téllez-Valdés, O., Pineda-López, M. D. R., Sánchez-Velásquez, L. R., Flores-Estevez, N., & Viveros-Viveros, H. (2014). Effect of climate change on the distribution of *Magnolia schiedeana*: A threatened species. *Botanical Sciences*, 92(4), 575–585. Doi: 10.17129/botsci.116.

- Vilges, de O. S., Romero-Alvarez, D., Fernandes, M. T., Pereira, dos S. J., Labruna, M. B., Salles, G. G., Escobar, L. E., & Gurgel-Gonçalves, R. (2017). *Amblyomma* ticks and future climate: Range contraction due to climate warming. *Acta Tropica*, 176, 340–348. Doi: 10.1016/j.actatropica.2017.07.033.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., ... Chauvin, F. (2012). The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics*. 40, 2091–2121. Doi: 10.1007/s00382-011-1259-y.
- Zoellick, R. B., (2009). informe sobre el desarrollo mundial 2010. Panorama general. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, Washington, DC 20433. 50p.