

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Modelos de Distribución Actual y Futuros de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins Ante Escenarios de Cambio Climático en México

Por:

FÁTIMA MONSERRAT MÉNDEZ ENCINA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Modelos de Distribución Actual y Futuros de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins Ante
Escenarios de Cambio Climático en México

Por:

FÁTIMA MONSERRAT MÉNDEZ ENCINA

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. Mario Alberto García Aranda
Coasesor

Dr. Luis Samaniego Moreno
Coasesor

Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2019



DEDICATORIA

A mis padres:

*María Antonieta y José Luis, por su gran apoyo incondicional en **todo**, sus esfuerzos, cariño, ser fuente de motivación, amor, compasión, por enseñarme a nunca rendirme, gracias infinitas por estar siempre.*

A mi adorada hermana Reyna Guadalupe (†), por todo lo que me enseñaste y lo sigues haciendo, por esa valentía para vivir la vida, por tu carisma e infinitos recuerdos que me dejaste, porque el amor que nos une es más grande que la distancia que nos separa...

Con mucho cariño, admiración y respeto al Dr. Jorge Méndez González, por ser mi motivación hacia la investigación, por sus consejos, sabiduría y sobre todo por su grata e incondicional amistad, por ser un gran ejemplo, excelente catedrático, pero sin duda alguna mejor persona.

A todos y cada uno de mi familia, amigos y compañeros de generación que estuvieron siempre acompañándome en esta travesía

Este logro es de todos.

¡Gracias, gracias, gracias!

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

A mi Alma Terra Mater, esta noble institución que me acogió, formó y brindó esa dicha de pertenecer y ser parte de su legado.

A todos los maestros del Departamento Forestal

A todos y cada uno de ustedes Maestros, por sus conocimientos brindados dentro y fuera del aula.

Por cada una de esas aportaciones que son ahora parte de mi formación profesional.

Al Dr. Jorge Méndez González

Agradezco profundamente su tiempo, disponibilidad, confianza y dedicación a este trabajo, además de sus consejos y aprendizajes que me brinda, gracias por ser fuente de inspiración a contribuir con la investigación y dar el mayor de los esfuerzos siempre. ¡Mil gracias!

Al Dr. Mario Alberto García Aranda y al Dr. Luis Samaniego Moreno

A mis coasesores por sus revisiones, consejos, contribuciones y tiempo dedicado a esta investigación.

A la Universidad Estatal de Oregon

Por permitirme realizar mi estancia de prácticas profesionales en su reconocida casa de estudios y ser parte de mi formación profesional, por esa experiencia tan grata y amena llena de aprendizajes, en especial al Ph. D. Doug Maguire y al M.Sc. Doug Mainwairing. Al Dr. Eladio Cornejo Oviedo por la vinculación para realizar dicha estancia. A Patti McCarthy por su hospitalidad y cariño.

Thank you so much!

A mis compañeros y amigos de la Generación CXXVII

Rocío Mendieta, Cristabel Salazar, Xitlali Peralta, Greta Silva, Cecilia Monsiváis, Jesús Pérez, Santiago Mendoza, Edgar Guzmán y Enrique Hernández, por todos los momentos compartidos. ¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Biodiversidad en México	5
Emisiones de Gases de Efecto Inverno	5
Modelos de nicho ecológico y de distribución de especies.....	5
Modelos de Circulación General.....	7
Algoritmos para distribución de especies.....	7
MaxEnt (máxima entropía)	8
Aplicaciones de modelos de distribución de especies.....	8
R software estadístico	9
Estudios de distribución del género <i>Dendroctonus</i> spp.	9
Algunos estudios de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
Área de estudio.....	12
Obtención registros y variables bioclimáticas.....	13
Área de calibración y espacio ambiental.....	14
Selección de variables bioclimáticas.....	15
Calibración y creación del modelo.....	15
Validación de los modelos	16

Superficies de idoneidad por estados	16
Proyecciones de modelos futuros	16
Riesgo de extrapolación futura.....	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Correlación entre variables.....	17
Espacio ambiental	18
Modelo de distribución actual de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins	19
Validación del modelo y contribución de variables	22
Superficie de idoneidad por estratos	25
Modelos de idoneidad de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins al año 2050	27
Riesgo de extrapolación de los modelos de idoneidad de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins	32
Mapas de diferencias entre variables futuras y actuales.....	33
CONCLUSIONES	36
LITERATURA CITADA.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables bioclimáticas usadas para generación de los modelos de distribución actual y futuro de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	13
Cuadro 2. Estadísticas de los criterios de selección de modelos de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	19
Cuadro 3. ROC parcial de los modelos actuales y futuros de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	22
Cuadro 4. Contribución de las variables bioclimáticas al modelo actual y futuros de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Correlación entre variables bioclimáticas empleadas para generar el modelo actual y futuro de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	18
Figura 2. Espacio ambiental de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins usando temperatura media anual (Bio 1) y precipitación anual (Bio 12).	19
Figura 3. Mapa de idoneidad actual estratificada de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins, a) sin extrapolación a) con extrapolación b) y con clamping c).	21
Figura 4. Superficie estimada en México por estratos de idoneidad baja, media y alta de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins.	26
Figura 5. Dendrograma de idoneidad de cinco Modelos de Circulación General de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins para el año 2050.	27
Figura 6. Idoneidad promedio y coeficiente de variación de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins acorde a cinco Modelos de Circulación General para el RCP 4.5 (a y b) y para el RCP 8.5 (c y d).	28
Figura 7. Transferencia del modelo de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins a todas las regiones del mundo a), con acercamiento a México b) y a Sudamérica c).	29
Figura 8. Áreas de idoneidad actual y futura de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins para el año 2050.	31
Figura 9. Mapas de clima novel tipo 1 y 2 de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins para el RCP 4.5 (a y b) y para el RCP 8.5 (c y d).	32
Figura 10. Cambios absolutos actual y futura de variables bioclimáticas que determinan la distribución de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins. a) temperatura media del 1/4 anual más cálido Bio 10 b) temperatura media anual Bio 1 c) y precipitación media anual Bio 12.	34
Figura 11. Histograma de frecuencia relativa de modelos generados de los registros de <i>Dendroctonus mexicanus</i> Hopkins en relación a la variable Bio 10.	35

RESUMEN

Los cambios en el clima global están alterando el rango de distribución de muchas especies, los insectos descortezadores se relacionan con el aumento de temperatura y son parte natural de los ecosistemas, pero también, son los de mayor relevancia en el ataque a los bosques de coníferas, contribuyendo a grandes pérdidas biológicas y económicas. El objetivo de este estudio fue generar modelos actuales y futuros (2050) de distribución de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, utilizando variables bioclimáticas y cinco Modelos de Circulación General a dos RCP 4.5 y 8.5, y 67 registros de la especie, obtenidos de GBIF y publicaciones científicas. La calibración, creación, selección y transferencia del modelo se realizó en R software usando “kuenm R package”, y el algoritmo MaxEnt 3.3.3 k. Acorde a los criterios de selección (ROC parcial, tasas de omisión y el criterio de información Aikaike), el modelo que mejor explica la distribución de *D. mexicanus* es el lineal+cuadrático, usando la temperatura media del 1/4 anual más cálido (°C) y 0.2 de regularizador. Los estados que presentan mayor idoneidad de *D. mexicanus* fueron: Estado de México (17,879.71), Michoacán (15,669.86) y Puebla (14,693.04 km²). El modelo de idoneidad indica que esta especie podría desplazarse hasta 100 m más de altitud, en 2050, y modificar su distribución geográfica desplazándose en promedio 30 km hacia mayores latitudes, y menor longitud en la SMO y SMO. La idoneidad de esta especie podría disminuir especialmente en el centro del país.

Palabras clave: Clima, kuenm, modelos de distribución, MaxEnt, MCG's,

ABSTRACT

Changes in global climate are altering the species distribution ranges, bark beetles are related with temperature rise but they are part of the ecosystem, but also are the most relevance attack in conifers forest, contributing to big economics and biologist losses. The objective of this study was to generate current and future distribution models (2050) of *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, using bioclimatic variables and five General Circulation Models in two RCP 4.5 and 8.5, and 67 species records, obtained from GBIF and scientific papers. Selection, transference, creation and calibration model, it has been done using R software and "kuenm R package", in MaxEnt 3.3.3k. According to selections criteria (Partial ROC, omission rates and Information criteria Aikaike). The model that best explains the distribution of *D. mexicanus* is linear+quadratic, using mean temperature of the warmest quarter (°C) and 0.2 regularizer. The states that showed high suitability were Estado de México (17,879.71), Michoacán (15,669.86) and Puebla (14,693.04 km²). The suitability model shows that this species could move until 100 m of altitude in 2050, and change its geographic distribution, shift in average 30 km toward higher latitudes and lower longitudes in SMO and SMO. The suitability of this species could decrease specially in country center.

Key words: weather, kuenm, distribution models, MaxEnt, CGM's.

INTRODUCCIÓN

México cuenta aproximadamente con 138 millones de ha de vegetación, que equivalen al 70 % del territorio nacional y de éste se tiene un 17 % de bosques templados (CONAFOR, 2014), desempeñan una función primordial para determinar la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al actuar como sumideros de carbono (FAO, 2018). La emisión de GEI modifican las condiciones climáticas, el aumento de la temperatura en el periodo de 2006 - 2015 por las actividades antropogénicas fue de 0.87 °C, si esta actividad continua, se podrían alcanzar los 1.5 °C para al año 2040 (Allen, 2018), y todo parece indicar que esto podría modificar la distribución de especies, por ejemplo, Ungerer *et al.* (1999) estimaron que un aumento de 3 °C en la temperatura mínima anual podría extender los límites de distribución de *Dendroctonus frontalis* Zimmerman hasta por 170 km.

Los insectos descortezadores son parte de la estructura y del funcionamiento de los ecosistemas (Wood, 1982). La alteración de la estructura del ecosistema por la extracción de especies, conversión de uso de suelo, e incendios forestales, entre otros, provocan debilitamiento y estrés en los bosques, haciéndolos susceptibles a plagas forestales (Salinas *et al.*, 2010), en este sentido, Cibrián *et al.* (1982) señalan que los descortezadores son la plaga más importante en los bosques de coníferas, responsables de enormes pérdidas biológicas y económicas. *Dendroctonus mexicanus* Hopkins se considera una de las especies de descortezadores más importante, se distribuye desde el sur de E. U. A., hasta la Sierra Madre del Sur en un rango de elevación de 1600 a 2800 msnm (Salinas *et al.*, 2010).

La distribución de escolítidos se ha relacionado con el aumento de temperatura (FAO, 2007; Mendoza *et al.*, 2011; Ruiz *et al.*, 2018), con la variación de precipitación (Mendoza *et al.*, 2011; Cuellar *et al.*, 2013), con sequías prolongadas (Pinzón *et al.*, 2018;

Cervantes *et al.*, 2019), pero también con las características del bosque (Ruiz *et al.*, 2018), invariablemente de esto, los descortezadores afectan negativamente la viabilidad de los bosques, y se consideran la plaga más destructiva y México es de los países más afectados (FAO, 2009).

Los modelos de distribución de especies relacionan las condiciones de su ambiente con su posible distribución geográfica (Guisan y Zimmermann, 2000), identificando potenciales áreas para diferentes fines (Phillips *et al.*, 2006; Philips y Dunik, 2008). Un trabajo de gran importancia en México fue el realizado por Salinas *et al.* (2010), quienes modelaron la distribución potencial de 12 especies de descortezadores, Mendoza *et al.* (2011) modelaron la distribución de *Dendroctonus rizophagus* Thomas y Bright, en la Sierra Madre Occidental, mientras que *Dendroctonus ponderosae* Hopkins fue modelado por Régnière, (2009), *Dendroctonus valens* LeConte en California, E. U. A. (Maldonado *et al.*, 2015), Williams y Liebhold (2002), relacionaron el cambio climático y los rangos de distribución de *D. frontalis* y *D. ponderosae* en Norte América, en general se demuestra que las variables altamente relacionadas a este género son temperatura y precipitación.

A través del tiempo, se ha incrementado el número registros de las diferentes especies, ampliando el conocimiento de sus rangos y límites de distribución (Armendáriz, 2012), a la par, se generan nuevas técnicas de modelación de especies, mejorando día a día las estimaciones (Cobos *et al.*, 2019), pero también se generan enormes bases de datos actuales y futuras, para la modelación de las diferentes especies (Karger *et al.*, 2017) y la modelación hoy día se ha mejorado usando programas estadísticos como R (Phillips *et al.*, 2006; Core Team. 2016), por lo que cada vez se ha más necesario generar estudios de

distribución de especies, evaluando los impactos del cambio climático sobre la distribución actual y futura de las especies.

En este estudio se presentan modelos generados de la distribución actual y potencial de *D. mexicanus*, por ser una de las especies de mayor importancia como plaga de los bosques, bajo diferentes escenarios de cambio climático futuros para el año 2050, usando cinco modelos de circulación general: MIROC5, HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CSM4 y CNRM-CM5, bajo emisiones de bióxido de carbono RCP 4.5 y 8.5, los modelos fueron generados en el programa R los cuales fueron entrenados, calibrados y validados, usando metodologías actuales (Cobos *et al.*, 2019) para obtener predicciones más precisas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Modelar la distribución actual y futura de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, usando el algoritmo de Máxima Entropía y variables bioclimáticas, bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Objetivos específicos

- Generar mapas de distribución actual y futura de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, usando el algoritmo de Máxima Entropía y variables bioclimáticas, bajo diferentes escenarios de cambio climático: MIROC5, HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CSM4 y CNRM-CM5, bajo emisiones de bióxido de carbono RCP 4.5 y 8.5.
- Determinar qué variables bioclimáticas son más significativas en la distribución de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.
- Evaluar los riesgos de extrapolación de los modelos de distribución sobre las áreas de idoneidad de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Hipótesis

Con el cambio de clima global, de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins aumenta su rango de distribución, el cual es dependiente de variables climáticas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Biodiversidad en México

México se considera dentro de los siete países megadiversos del planeta (Mittermeir, 1988), que alberga un 60 - 70 % de la diversidad de especies en el planeta (Sarukhán *et al.*, 2009), esto se presenta por el conjunto de climas y relieves que ocurren en el país (Flores y Gerez, 1994). La importancia de los bosques no solo radica en su producción maderable, sino además en los bienes y servicios que se generan, fuentes de empleo e ingreso para las comunidades, producción no maderable, entre otros (CCMSS, 2012).

Emisiones de Gases de Efecto Inverno

El aumento continuo de los gases de efecto invernadero (GEI), como el vapor de agua, metano, dióxido de carbono, ozono, óxido de nitrógeno, por mencionar algunos, reducen la eficiencia de la Tierra al remitir la energía recibida frenando la salida de esta al espacio, y con esto la temperatura aumenta (Martínez y Osnaya, 2004). La concentración de estos GEI desde el año 2000 es de 20 ppm por década aproximadamente (Ayres *et al.*, 2018). Conde (2007) resalta para México país en desarrollo, la importancia de los estudios en diferentes índices, para la mejora en la toma de decisiones de mitigación de cambio climático.

Modelos de nicho ecológico y de distribución de especies

Los modelos de nicho ecológico permiten conocer la distribución geográfica de las especies, así como identificar aquellas variables que contribuyen a sus límites (Peterson *et al.*, 2011), estos modelos de nicho ecológico cada vez se estudian más por la comunidad científica, es por esto que se deben conocer los nuevos métodos que se actualizan hoy en

día constantemente acorde a las preguntas de investigación que están surgiendo (Robayo *et al.*, 2017). Soberón *et al.* (2017) especifican la importancia del significado no solamente semántico, más bien en concepto entre los modelos de nichos ecológicos y modelos de áreas de distribución, los primeros se presentan en el espacio ambiental y los segundos en el espacio geográfico. El propósito de los modelos del nicho ecológico y modelos de distribución de especies, conllevan ambos a identificar aquellos sitios idóneos para la sobrevivencia de las especies, a través de identificar los requerimientos ambientales y de éstas (Soberón y Nakurama, 2009).

Soberón y Peterson (2005) proponen el diagrama de BAM el cual considera factores bióticos (B), abióticos (A) y la movilidad (M), los cuales son indispensables para explicar y proyectar la distribución de las especies, además este sirve como referencia para estimar las posibles combinaciones entre estos factores (Peterson *et al.*, 2011).

Robayo *et al.* (2017) desarrollaron un seminario plausible donde presentan una introducción al modelamiento de distribución de especies, donde se explica cómo evaluar modelos y seleccionar umbrales utilizando la validación cruzada (Area Under Curve (AUC) y true statistical skill (TSS), transferencias de modelos a otros periodos y regiones y la configuración de argumentos para los modelos resultantes en MaxEnt a través de R.

Elith *et al.* (2006) muestran los diferentes métodos de modelización para la generación de modelos de distribución de especies, así como sus ventajas y desventajas, caracterizadas principalmente en: 1) técnicas discriminantes; aquellas que necesitan datos de presencia y ausencia, 2) técnicas descriptivas; solo requieren datos de presencia y 3) técnicas mixtas; las cuales emplean las anteriores, a la vez que generan sus propias pseudo-ausencias.

Algunas de las limitaciones en los modelos de distribución de especies son: la hipótesis de pseudo-equilibrio y representatividad relaciones bióticas, ausencia del componente espacial y temporal en proceso, pero continúan en proceso de investigación y mejora (Mateo *et al.*, 2011).

La evaluación de la calidad de los modelos puede realizarse con diferentes estadísticos como: ROC (Receiver Operating Characteristics), AUC (Area Under the Curve), validación cruzada, análisis de correlación, entre otros; comúnmente el más utilizado es el AUC y ROC, así como la prueba binomial, otro método de validación para muestras más pequeñas empleando solamente presencias (Johnson y Omland, 2004). Cobos *et al.* (2019) han integrado el paquete *kuenm*, el cual realiza la calibración y evaluación del modelo final, así como posibles riesgos de extrapolación.

Modelos de Circulación General

Una de las herramientas más útiles y disponibles para proyecciones del clima y cambio climático son los Modelos de Circulación General (MCG) (Houghton *et al.*, 1992), los cuales son modelos tridimensionales globales, que simulan a la atmósfera, océanos, temperatura terrestre y marina y de manera simple la orografía continental (Magaña *et al.*, 2000). Además generan la simulación de las condiciones globales de temperatura, precipitación y radiación incidente bajo escenarios futuros de concentraciones de bióxido de carbono (Heywood *et al.*, 1995).

Algoritmos para distribución de especies

Existen varios algoritmos que se utilizan para este tipo de investigación como BIOCLIM (Nix, 1986) GARP (Stockwell, 1999), GLM (Austin y Smith 1989) y uno de los más

comúnmente usado MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) , con la ventaja que utiliza solo datos presencia, puede evitar el sobre ajuste usando regularizaciones, las variables de salida son continuas lo que permite distinciones entre estas y además de permitir variables discretas.

MaxEnt (máxima entropía)

Es basado en aprendizaje automático, que es designado a realizar predicciones de datos incompletos, con un enfoque estima la mayor distribución uniforme (máxima entropía) (Baldwin, 2009). Se describe este algoritmo como que modela todo lo que es conocido, pero no supone nada sobre lo desconocido (escoge la distribución más uniforme) (Phillips *et al.*, 2006).

La proyección de la distribución de especies con MaxEnt (Máxima Entropía) se basa en la predicción con datos de presencia de una especie, el cual llega a evitar el sobre ajuste del modelo (Phillips *et al.*, 2006) y se clasifica como un software versátil y ventajoso en comparación de otros, por su requerimiento mínimo de datos de ocurrencia, así como su disponibilidad (Elith *et al.*, 2006).

Aplicaciones de modelos de distribución de especies

La modelación de la distribución de especies se ha realizado con diferentes fines como: estudios de conservación de especies de fauna (Robayo y Vilchis, 2012;), reintroducción de especies amenazadas (Martinez *et al.*, 2006), vulnerabilidad de flora ante escenarios de cambio climático (Felicísimo *et al.*, 2012), abundancia y escenarios de dispersión de especies (Osorio *et al.*, 2016), especies invasoras (Ordaz y Rodríguez, 2014) modelos del pasado (Varela *et al.*, 2011) al futuro (Magaña *et al.*, 2000), distribución potencial de

especies bajo escenarios de cambio climático (Cárdenas *et al.*, 2016) por mencionar algunos.

R software estadístico

Hoy en día un elemento concurrenemente utilizado en el lenguaje estadístico es R (R Core Team 2016), la estadística es una ciencia a la par de la investigación científica, el uso de R en ciencias ecológicas e ingeniería, propone un mayor control de los análisis conducidos, con la capacidad de emplearse otras áreas, además de ofrecer uso de libre acceso (Salas, 2008). El modelamiento de distribución de especies en los últimos años se ha realizado con MaxEnt en R, se ha estado usando a través del paquete dismo (Phillips *et al.*, 2006) y recientemente se ha creado el paquete kuenm (Cobos *et al.*, 2019), el cual realiza la calibración y evaluación del modelo final, así como posibles riesgos de extrapolación.

Estudios de distribución del género *Dendroctonus* spp.

El género *Dendroctonus* es una de las mayores fuentes de perturbación en el continente Americano (Logan *et al.*, 1998). Ungerer *et al.* (1999) estimaron que un aumento de 3 °C en la temperatura mínima anual podría extender los límites de distribución de *D. frontalis* hasta por 170 km., además que los modelos basados en la fisiología de las especies proporcionan una herramienta para la predicción de efectos de los patrones climáticos sobre la distribución de los organismos.

Maldonado *et al.* (2015) han identificado áreas de distribución potencial de *D. valens* en el Estado de California, E. U. A. y generaron un modelo de distribución de nicho ecológico mediante MaxEnt, la base de datos usada fue de GBIF, usando capas ambientales de Worldclim, y un Modelo Digital de Elevación. Los parámetros para el modelo fueron tipo

“bootstrap” 20 réplicas, las variables de mayor contribución a la distribución de esta especie fueron: Bio 5 (37 %), Bio 14 (22.5 %) y altitud (18.9 %) con valores de AUC mayores a 0.91 en los 20 modelos.

Ayres y Lombardero (2000), señalan que los insectos responden más rápidamente en comparación a las plantas al incremento de la temperatura, el cambio climático altera los patrones de herbívoros y patógenos, por sus cortos ciclos de vida.

Salinas *et al.* (2010) han elaborado un atlas de distribución de 12 especies de descortezadores en México, usando el algoritmo BIOCLIM, en él, se muestra la distribución geográfica por especies, las regiones geográficas de preferencia y las condiciones climáticas idóneas de cada una de ellas, ubicándose preferentemente en los principales sistemas montañosos del país, exceptuando la Sierra de Baja California.

D. rhizophagus ha sido estudiado realizando tres aproximaciones de modelaje predictivo para su distribución geográfica, utilizando BIOCLIM, ENFA y MaxEnt, los registros usados fueron obtenidos de especímenes en museos y de otros estudios reportados un total de 257 registros, 19 variables bioclimáticas; el mapa resultante se categorizó en nulo, moderado, alto y muy altamente. Los resultados muestran que *D. rhizophagus* tiene preferencia en un rango altitudinal entre 2000 y 2600 msnm, indicando que frecuentemente ataca a *Pinus arizonica*. Engelm, *Pinus durangensis* Ehren, *Pinus engelmannii* Carr y *Pinus leiophylla* Sch y Cahm, su perfil bioclimático fue basado en temperaturas medias anuales Bio 1 (10 - 19 °C), Bio 5 (21 - 36 °C), Bio 9 (9 - 19 °C) y Bio 11 (3 - 14 °C). Para precipitación áreas entre 305 y 1046 mm. Se observó que prefiere hábitat templado, aunque se puede suponer que aun con cambios menores de clima, se tienen efectos significativos sobre su abundancia y distribución geográfica (Mendoza *et al.*, 2011).

Por otra parte, Williams y Liebhold (2002), han estudiado los posibles cambios de rango de distribución *D. frontalis* y *D. ponderosae* bajo escenarios de cambio climático, sus áreas de ocurrencia y tipos de bosques susceptibles a ellos, del sureste y oeste de E. U. A., reportan que las áreas disminuyeron a medida que la temperatura aumentó. Las áreas proyectadas con un aumento de 8 °C se acercaron a 21- 22 % de los que se encuentran a temperatura ambiente sin cambios en la precipitación, sus resultados demuestran dos patrones de cambios de rango geográfico previstos en el cambio climático así como cambios relativamente pequeños en el clima pueden cambiar los rangos de estas especies y los bosques que habitan a latitudes más altas y elevaciones en el tiempo.

Algunos estudios de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins

Para México, evaluaciones en el periodo 2008 - 2012 en el municipio de Aramberri, Nuevo León, muestran infestaciones de *D. mexicanus*, donde en 2010 se registró un mayor ataque afectando 916 ha de pino (Cuellar *et al.*, 2013). Se ha analizado el efecto de sequía, expresada como índice de precipitación estandarizada (IPE) sobre la superficie afectada de *D. mexicanus*, en bosques templados de pino y pino-encino en el Parque Cumbres de Monterrey y en la zona oeste-centro de Nuevo León en la Sierra Madre Oriental (Pinzón *et al.*, 2018) reportándose alta relación entre la abundancia de esta especie de descortezador con sequías prolongadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el área de distribución *D. mexicanus*, la cual se ubica en bosques de coníferas de México, éste se encuentra localizado en el continente americano, el país posee una extensión de dos millones de km² y se encuentra a ambos lados del Trópico de Cáncer y sus extremos meridional y boreal, en los paralelos son 14° 30' N y 32° 42' N (Rzedowski, 1978).

En base a cálculo de la precipitación normal de 1981- 2010, en México llueve 1, 449, 471 millones de m³, de los cuales se estima que el 72.5 % se evapotranspira, 21.2 % fluye por ríos y arroyos y el 6.4 % restante, se infiltra a los acuíferos (CNA, 2014). Predominan rocas volcánicas en el noreste, oeste y centro de México, para el este y sureste dominando rocas sedimentarias y rocas metamórficas presentes en la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Chiapas, norte de Oaxaca, manchones en Guerrero y en el Estado de México (Rzedowski, 1978). Se tienen 26 tipos de suelo de los 32 que existen, siendo los principales Leptosoles, Regosoles, Phaeozems, Calcisoles, Luvisoles y Vertisoles (INEGI, 2007). Se tiene una superficie de 164,422.7 km² de bosques de coníferas (FAO, 2007) predominantes el género *Pinus* y *Quercus*, seguidos de *Juniperus* y *Abies* en menor extensión respectivamente (Flores *et al.*, 1971). Estos bosques de coníferas se localizan en las principales serranías montañosas Sierra Madre Occidental, Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur, Sierra del norte de Oaxaca, Sierras de Chiapas, extremos de Baja California y de manera más discontinua en la Sierra Madre Oriental, y predominan temperaturas medias anuales que oscilan entre los 10 y 20 °C, con una precipitación anual

entre 600 y 1000 mm, predominantes en rocas ígneas en suelos con un pH entre 5 y 7 (Rzedowski, 1978).

Obtención registros y variables bioclimáticas

Los registros de presencias de *D. mexicanus* se obtuvieron del portal GBIF, además de artículos científicos, dando un total de 295 registros, de los cuales se realizó una limpieza de datos en R acorde a lo sugerido por Cobos *et al.* (2018) (duplicados, baja precisión, fuera del rango de la distribución de la especie, ceros, errores de identificación de la especie entre otros), además se eliminó la autocorrelación espacial entre los registros que ocurre a 5 km (Lammens *et al.*, 2015), quedando un total de 67 registros, 29 de GBIF y 38 artículos científicos. Se emplearon las variables bioclimáticas propuestas por Karger *et al.* (2017) Chelsa (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) (Cuadro 1) los cuales poseen una resolución de 1 km²; excluyendo cuatro de estas variables: Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19, las cuales no han sido recomendadas para modelación por combinar información de diferentes variables (Escobar *et al.*, 2014) siendo un total de 15 variables para la generación de los modelos.

Cuadro 1. Variables bioclimáticas usadas para generación de los modelos de distribución actual y futuro de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Variable	Descripción
Bio 1	Temperatura media anual (°C)
Bio 2	Intervalo medio diurno (Media por mes [Temp. Máx. - Temp. Mín.])
Bio 3	Isotermalidad (Bio 2 / Bio 7)*(100)
Bio 4	Temporalidad de la temperatura (desviación)

Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio 7	Intervalo de temperatura anual (Bio 5- Bio 6)
Bio 8	Temperatura media del 1/4 anual más húmedo (°C)
Bio 9	Temperatura media del 1/4 anual más seco(°C)
Bio 10	Temperatura media del 1/4 anual más cálido (°C)
Bio 11	Temperatura media del 1/4 anual más frío (°C)
Bio 12	Precipitación anual (mm)
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Bio 14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio 15	Temporalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)
Bio 16	Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm)
Bio 17	Precipitación de 1/4 anual más seco (mm)
Bio 18	Precipitación de 1/4 anual más cálido (mm)
Bio 19	Precipitación de 1/4 anual más frío (mm)

(Hijmans *et al.*, 2005).

Área de calibración y espacio ambiental

Soberón y Peterson (2005) definen el área de calibración (M) como aquella que ha sido accesible a la especie durante un periodo de tiempo relevante, ésta se delimitó en ArcMap 10.1, generando un buffer de 70 km de radio en cada registro, inicialmente se usaron todos los registros, después se fueron identificando “outliers” en el espacio geográfico y en el espacio ambiental, hasta quedar definida.

El espacio ambiental se hizo en R, utilizando los registros después de pasar por el proceso de limpia, distribuyendo aleatoriamente una muestra de 10,000 puntos y extrayendo su valor de las variables Bio 1 (temperatura media anual) y Bio 12 (precipitación media anual), para conocer la distribución de *D. mexicanus* en el espacio ambiental.

Selección de variables bioclimáticas

Para la selección de variables para la modelación, el primer paso fue realizar correlación de Pearson en ArcMap 10.1, de las variables bioclimáticas usando los rasters del área de calibración, identificando aquellas que estuvieran o no correlacionadas entre sí; después, se realizó una primera corrida en MaxEnt 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006) con todas las variables usando 50 % de los registros para entrenamiento y el restante para la prueba. En MaxEnt, se realizaron pruebas Jackknife para determinar la importancia de cada variable. La selección de las variables fue acorde a la biología de la especie, al valor de importancia de la variable, a lo que representa en el modelo (Phillips *et al.*, 2006) y en especial, aquellas variables que no estuvieran correlacionadas entre si acorde a un valor de $r > 0.8$ (Muñoz y Felicísimo, 2004; Elith *et al.*, 2006) el procedimiento de modelación en MaxEnt se repitió para la elección de otros dos set's de variables.

Calibración y creación del modelo

La calibración y creación del modelo se realizó con el paquete kuenm (Cobos *et al.*, 2019) en R. Para obtener el modelo final, kuenm generar un gran número de modelos candidatos, haciendo la evaluación de cada uno de ellos en base a diferentes estadísticos.

Validación de los modelos

Los modelos fueron validados con ROC parcial (Curvas Operada por el Receptor), por sus tasas de omisión y por el criterio de información Aikaike (AICc) (Phillips *et al.*, 2006; Peterson *et al.*, 2008), estos estadísticos han sido considerados apropiados por su significado estadístico en la modelación (Cobos *et al.*, 2019), pero también con pruebas de Jackknife para evaluar la importancia de las variables en el modelo (Hijmans *et al.*, 2005).

Superficies de idoneidad por estados

Los mapas de idoneidad de la distribución actual de *D. mexicanus* fueron estratificados en: alta, media y baja, con el método de Dalenius y Hodges (1959) consistente en la formación de estratos de manera que la varianza obtenida sea mínima al interior de cada estrato y máxima entre cada uno de ellos, formando estratos lo más homogéneos posible, buscando inicialmente qué distribución estadística se ajusta a los datos de idoneidad. La idoneidad se reclasificó acorde a los estratos generados usando ArcMap 10.1 y, posteriormente se obtuvo la superficie de estos estratos por entidad federativa.

Proyecciones de modelos futuros

La transferencia del modelo generado se hizo usando los siguientes modelos de circulación general (MCG): MIROC5, HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, CSM4 y CNRM-CM5, bajo escenarios de concentraciones de bióxido de carbono (RCP) 4.5 y 8.5 para el periodo 2041 - 2060. Posteriormente de estos modelos de idoneidad futura de *D. mexicanus* se obtuvo el promedio y coeficiente de variación para el RCP 4.5 y 8.5, respectivamente.

Riesgo de extrapolación futura

Se realizó con la herramienta ExDet (detección de extrapolación) basada en distancias de Mahalanobis, la cual proporciona una indicación clara de dónde el modelo es propenso a la extrapolación (Mesgaran *et al.*, 2014) dentro del paquete ntbbox de R (Osorio *et al.*, 2016). Así mismo, se generaron mapas de diferencias de los valores de las variables Bio 1 y Bio 12 (temperatura y precipitación) para determinar la influencia de éstas en la distribución futura (2050) de *D. mexicanus*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Correlación entre variables

En el área de calibración del modelo, las variables Bio 3 y Bio 15 no se correlacionaron con ninguna otra variable, con esto se seleccionaron solamente las variables: Bio 3, Bio 7, Bio 10, Bio 11, Bio 15, Bio 16 y Bio 17, por no estar correlacionadas entre ellas (Figura 1). En general la Bio 1 (temperatura media), se correlaciona positivamente con la mayoría de las variables, por el contrario, la Bio 2 (Intervalo medio diurno ([Temp. Máx - Temp. Mín]) se correlaciona negativamente. Es importante resaltar que la correlación es diferente en cada región geográfica del mundo, por lo que en cada área de calibración (área de distribución de cada especie) debe ser evaluada.

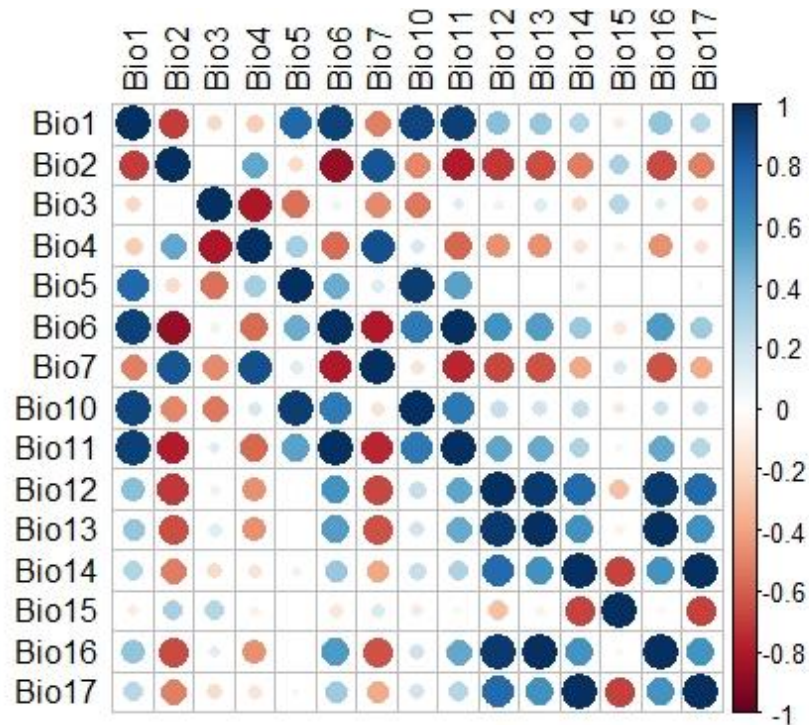


Figura 1. Correlación entre variables bioclimáticas empleadas para generar el modelo actual y futuro de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Espacio ambiental

Los resultados indican que, en el espacio ambiental, los registros se distribuyen acorde a un nicho de forma elíptica en relación a Bio 1 y Bio 12, pero puede notarse claramente que *D. mexicanus* pudiera no encontrarse en equilibrio, debido a la forma dispersa de los registros (Figura 2); es decir, no están llenando los espacios de su nicho ecológico, pero también se debe a la falta de registros en esta parte de su espacio ambiental. Aunque es sabido que esta especie es ampliamente distribuida en México (Salinas *et al.*, 2010), identificarla, es complicado, se requiere personal especializado. Acorde a los datos colectados, la especie se registra en temperaturas promedio que van desde 9 hasta 21 °C y donde ocurren desde 450 hasta 1,700 mm aproximadamente (Figura 2). Aunque se han reportado registros de esta

especie en el sur de E. U. A. (Moser *et al.*, 2005), no se incluyó en este estudio por no tener más registros en esa área.

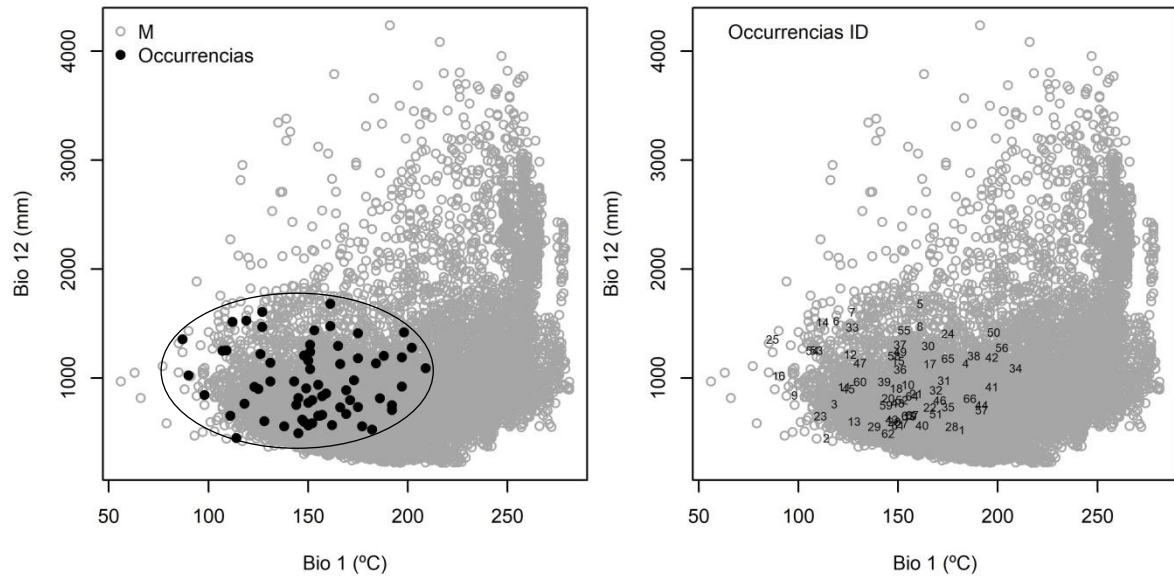


Figura 2. Espacio ambiental de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins usando temperatura media anual (Bio 1) y precipitación anual (Bio 12).

Modelo de distribución actual de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins

El resultado de la calibración del modelo a ser generado fue un total 1,479 modelos candidatos de los cuales, el modelo con mayor robustez (sin extrapolación, con extrapolación y con clamping), fue con el tipo de respuesta lineal+cuadrático (lq), con un regulizador 0.2 y el set de las variables, Bio 3, Bio 7, Bio 10, Bio 11 y Bio 17 (Figura 3), siendo éstas las que más explican la distribución de *D. mexicanus*, en base sus criterios de selección que determinaron ser el mejor modelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticas de los criterios de selección de modelos de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Criterio	Número de modelos
Todos los modelos candidatos	1479
Modelos estadísticamente significantes	1463
Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión	15
Modelos que cumplen con el criterio AICc	1
Modelos estadísticamente significantes que cumplen con el criterio tasa de omisión	15
Modelos estadísticamente significantes que cumplen con el criterio AICc	1
Modelos estadísticamente significantes que cumplen con el criterio tasa de omisión y AICc	1

En todos los casos (idoneidad sin extrapolación, con extrapolación y con clamping)), los datos de idoneidad se ajustaron a una distribución Gamma, de la cual se derivaron los estratos (Figura 3). Los parámetros de forma de la distribución fueron de: 0.6002973 y 2.7177555; 0.5372597 y 1.6480061; 0.6158027 y 2.1976274 respectivamente.

Según los resultados, la idoneidad de *D. mexicanus*, se concentra en los principales sistemas montañosos del país, a excepción de la Sierra de Baja California, dicha idoneidad se representa fuertemente en el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 3). Resultados afines a la distribución de *Dendroctonus* spp. el potencial se incrementa en esta área, concentrada en el centro del país (Sosa *et al.*, 2018).

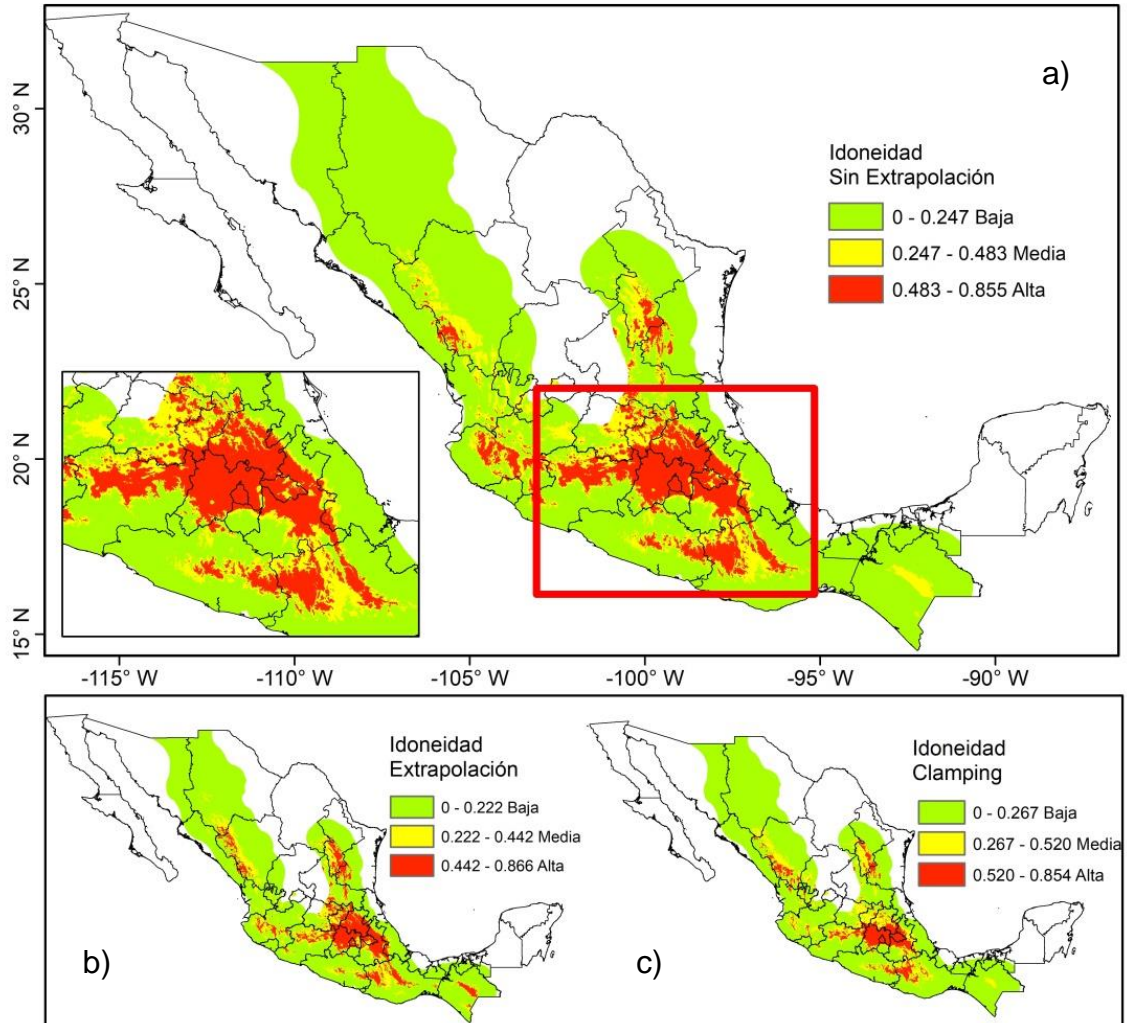


Figura 3. Mapa de idoneidad actual estratificada de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, a) sin extrapolación a) con extrapolación b) y con clamping c).

Salinas *et al.* (2010) muestran resultados muy similares de idoneidad geográfica de esta especie, incluso documentan que *D. mexicanus* es la especie con la más amplia distribución en los bosques de México, pero es más común en el centro del país (Estado de México y Jalisco), muy similar a lo encontrado en este estudio, documentado también que se ubica entre límites altitudinales entre los 800 y 3,650 m, preferentemente entre los 2,000 y 2,500 m.

En estudios de distribución potencial de especies hospederas, Cárdenas *et al.* (2016) muestran resultados de distribución potencial de pinos y abetos en México semejantes a las áreas idóneas en este estudio, exceptuando en la Sierra de Baja California como áreas no idóneas puesto que los requerimientos ambientales debido a que las especies no se satisfacen.

Validación del modelo y contribución de variables

Las pruebas para evaluar el modelo final, muestran valores de ROC parcial cercanos a 1 (Cuadro 3), indicando buen ajuste del modelo. En otros estudios en el modelo de nicho ecológico para el género *Abies* en México (Martínez *et al.*, 2016) en sus resultados del ROC parcial arrojaron razones de AUC con valores significativos ($p < 0.0001$) mayores a 1, esto indica que los modelos generados son estadísticamente mejores que el azar. Los valores de ROC parcial para el modelo de idoneidad al 2050 para los RCP's 4.5 y 8.5 son muy similares al actual.

Cuadro 3. ROC parcial de los modelos actuales y futuros de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Modelo	AUC ratio	AUC parcial
Actual	1.8629	0.9314
Futuro RCP 4.5	1.8971	0.9485
Futuro RCP 8.5	1.8951	0.9475

Las variables que más explican la distribución de *D. mexicanus*, según los resultados son Bio 10 y Bio 7 explicando un 76.6 y 12.5 % respectivamente según modelo actual; sin

embargo, la aportación de estas variables es ligeramente mayor en la modelación al 2050, siendo de hasta 80.6 en promedio para el RCP 8.5 para la Bio 10 (Cuadro 4). En la modelación de la distribución potencial de esta misma especie realizada por Salinas *et al.* (2010), no se muestra la contribución de las variables bioclimáticas. Las variables que explican la distribución de cada especie es distinta, e.g. para *D. valens* en el Estado de California, E.U.A. las variables que más explican su distribución potencial son Bio 5, Bio 14 y la altitud (Maldonado *et al.*, 2015).

Mendoza *et al.* (2011), muestran en sus resultados de la distribución geográfica de *D. rhizophagus* que la especie tiene preferencias por hábitats más templados, similar a *D. mexicanus* de este estudio, al evidenciar desplazamientos hacia mayores altitudes. Mientras que Williams y Liebhold (2002), señalan que *D. frontalis* y *D. ponderosae*, en sus áreas proyectadas la ocurrencia de los bosques susceptibles al ataque, aumentó conforme a más precipitación, diferente a lo expuesto en este estudio para *D. mexicanus*.

Cuadro 4. Contribución de las variables bioclimáticas al modelo actual y futuros de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Variable	Actual	RCP4.5					RCP8.5				
		MIROC5	HADGEM	CSIRO	CSCM4	CNRM5	MIROC5	HADGEM	CSIRO	CSCM4	CNRM5
Bio 10	76.6	80.6	79.9	81.4	79.6	78.1	81	80.2	81.3	79.7	80.7
Bio 7	12.5	11.3	10.9	10.8	10.1	12.4	12.1	10.4	10.9	10	10.6
Bio 17	5.5	4.3	4.5	4.3	4.3	4.5	3.9	4.6	4.1	4.5	4.5
Bio 3	2.3	2.5	2.5	2.4	4.5	3.6	2.1	3.3	2.6	3.7	2.8
Bio 11	3.1	1.3	2.2	1.1	1.5	1.5	1	1.5	1	2.1	1.4

En su investigación, Cervantes *et al.* (2019) generaron una base de datos de brotes históricos de descortezadores y analizaron su relación con la sequía y muestran que, en los últimos 120 años, existe una relación significativa entre estas variables, de una u otra forma, se evidencia que las variables de temperatura contribuyen a la abundancia y distribución de los descortezadores.

Por otra parte, Aceves *et al.* (2018) muestran que la variable Bio 10 es de las tres más importantes en la distribución potencial de nueve especies de *Pinus*, variable que también explica la distribución de *D. mexicanus* en este estudio, lo cual explica que ambos géneros (*Pinus* y *Dendroctonus*) coexistan en el mismo espacio geográfico, las especies que ocurren con *D. mexicanus* son: *Pinus patula* Schl y Cham, *Pinus hartwegii* Lindl, *Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus herrerae* Martínez, *Pinus ayacahuite* Ehren, *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Pinus teocote* Schiede ex Schltldl y *P. leiophylla*, todas ellas, huéspedes de *D. mexicanus*.

De forma similar, García *et al.* (2018) en su investigación muestran que la distribución potencial de *Pinus cembroides* Zuccarini, es también Bio 10, indicando que esta especie se adapta a ambientes de temperaturas templadas con veranos cálidos. Cruz *et al.* (2012) demuestra que temperaturas altas, se relacionan a la distribución del género *Pinus*.

Superficie de idoneidad por estratos

Los tres estados del país que presentan mayor superficie de alta idoneidad (Figura 3 y 4) de *D. mexicanus* son: Estado de México 17,879.71, Michoacán 15,669.86 y Puebla 14,693.04 km²; idoneidad media: Jalisco 18,672.47, Oaxaca 16,558.64 y Durango 15,173.74 km² e idoneidad baja: Chihuahua con 156,060.94, Durango 79,011.84 y Chiapas 66,732.43 km² (Figura 3 y 4). Los estados más susceptibles al ataque de *D. mexicanus* son Chihuahua y

Durango, como muestran en su investigación, Sosa *et al.* (2018) por ser áreas boscosas con diversidad de hospederos. Así mismo Zuñiga *et al.* (1999) indican que la mayor vulnerabilidad de ataque a pinos por *Dendroctonus* spp. es debida la sobreposición de áreas potenciales de ambos, por su riqueza biológica y condiciones climáticas similares en su área de distribución.

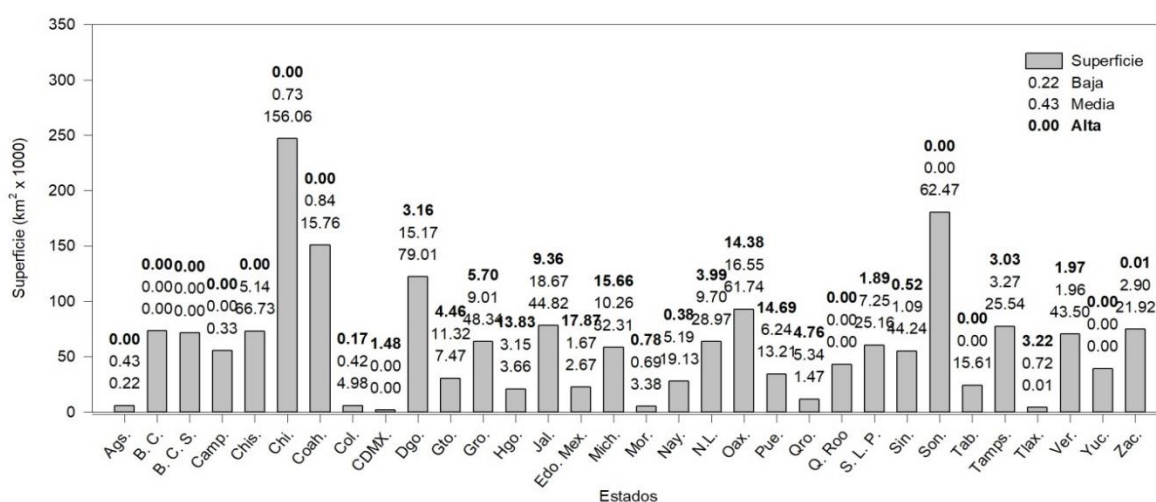


Figura 4. Superficie estimada en México por estratos de idoneidad baja, media y alta de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins.

Cambrón *et al.* (2018) usando variables climáticas, dasométricas y topográficas, para modelar la distribución potencial de *Dendroctonus* spp. muestran resultados similares, el mayor número de registros a nivel género se observó en Chihuahua, Durango y Oaxaca, pero indicando que la del mes de mayo, temperaturas mayores a 35 °C, edad y número de especies hospederas, contribuyen de forma importante a predecir la distribución del género *Dendroctonus*.

Modelos de idoneidad de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins al año 2050

El dendrograma de modelos de idoneidad promedio de los cinco MCG's al año 2050 generó dos grupos de similitud entre ellos siendo de un grupo: MIROC5, HadGEM2-AO, CSM4 y el otro: CSIRO-Mk3-6-0CNRM-CM5 (Figura 5). Aunque se observan patrones de idoneidad similares entre todos ellos (MCG's) el análisis pudo agruparlos, de la misma forma se observa que esta idoneidad es muy similar al modelo actual.

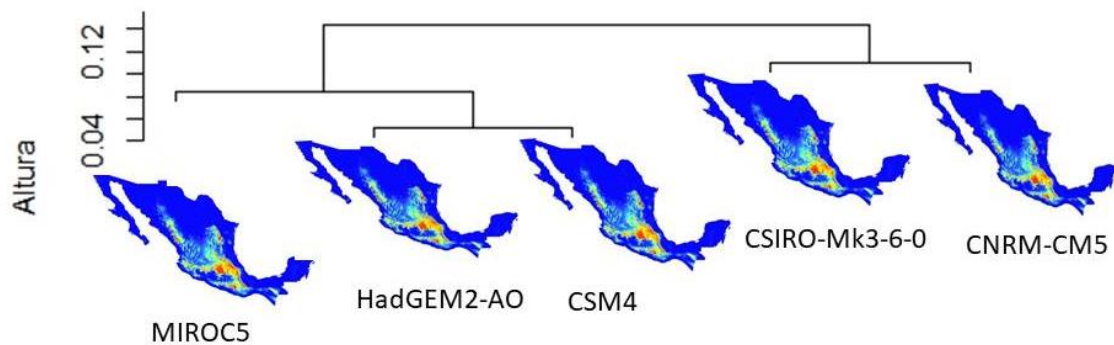


Figura 5. Dendrograma de idoneidad de cinco Modelos de Circulación General de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins para el año 2050.

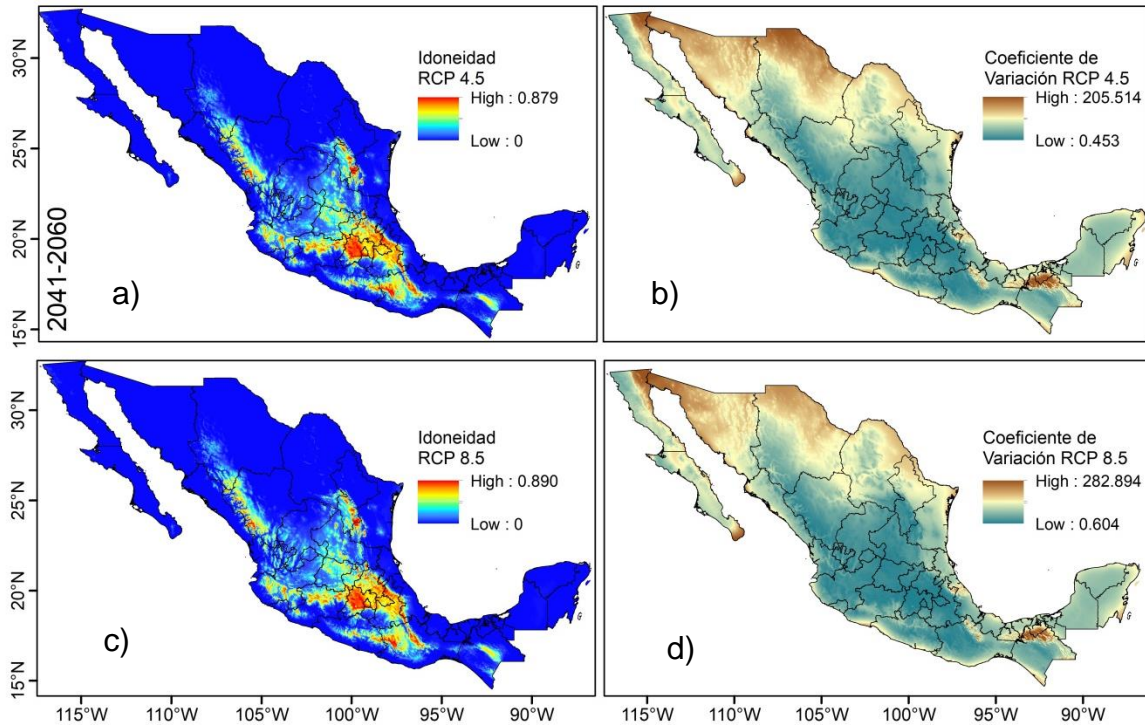


Figura 6. Idoneidad promedio y coeficiente de variación de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins acorde a cinco Modelos de Circulación General para el RCP 4.5 (a y b) y para el RCP 8.5 (c y d).

Los resultados demuestran que la modelación con los cinco Modelos de Circulación General, es muy buena y similar, puesto que en las áreas de mayor idoneidad *D. mexicanus*, se obtiene un coeficiente de variación bajo, de menos de 1 % con patrones similares para ambos escenarios RCP 4.5 y 8.5 (Figura 6b y 6d). Como era de esperarse, la mayor variación ocurre en regiones donde no existe idoneidad de la especie, la cual llega a más de 200 %, pero no puede ni debe ser tomada en cuenta.

Así como parecen ocurrir modificaciones en la distribución geográfica de *D. mexicanus* para el 2050, algunos autores encontraron resultados similares en *P. leiophylla* ya que su distribución no solo es vulnerable al cambio climático sino también a plagas como

Dendroctonus, categorizada como una amenaza alta en zonas del Eje Neovolcánico Transversal (Cárdenas *et al.*, 2016).

Se nota que, al realizar la transferencia del modelo a todas las regiones del mundo (Figura 7a), usando los Modelos de Circulación General, además de México (Figura 7b), se predicen áreas de idoneidad en Sudamérica, en las zonas montañosas de Bolivia, al parecer áreas cubiertas por bosques (Figura 7c). Sin embargo el modelo no presenta idoneidad al sur de E. U. A. como reportan (Moser *et al.*, 2005).

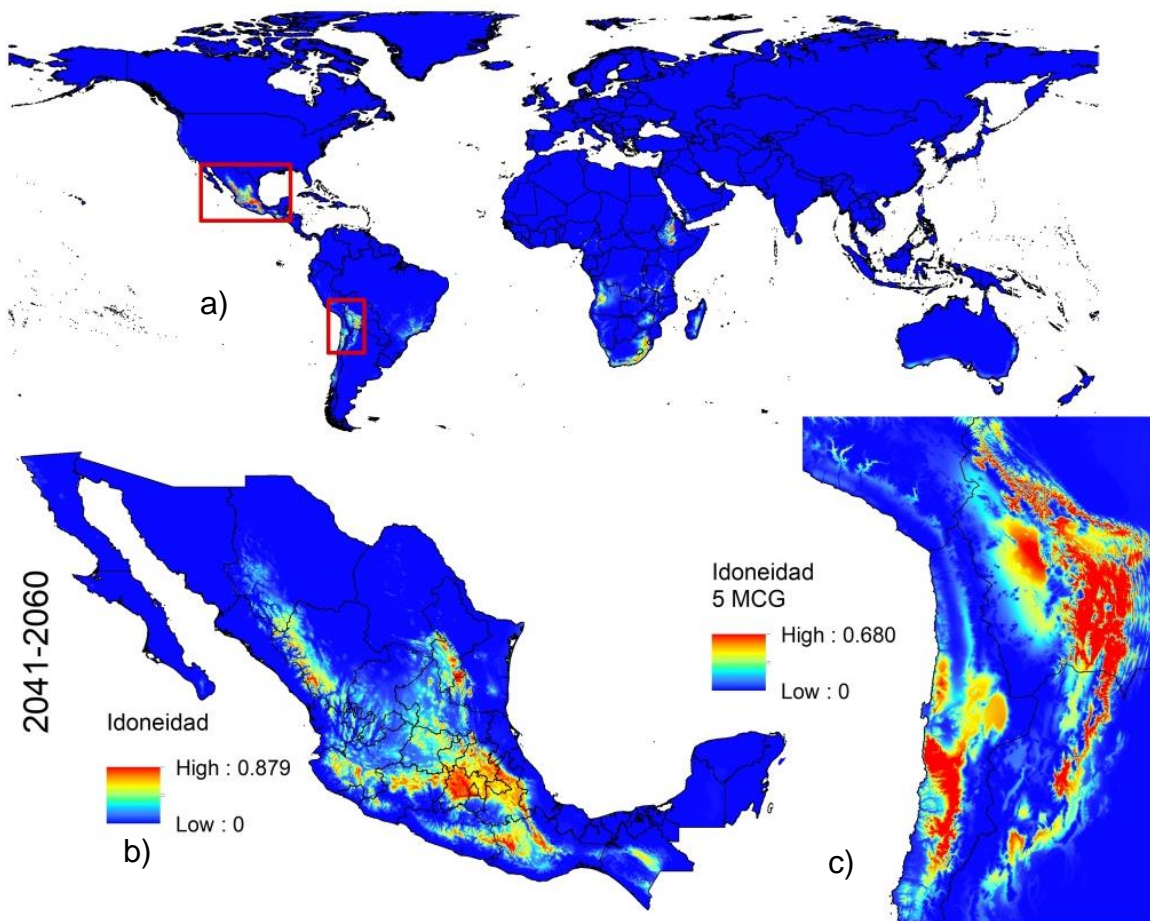


Figura 7. Transferencia del modelo de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins a todas las regiones del mundo a), con acercamiento a México b) y a Sudamérica c).

La modelación de la distribución futura (2015 - 2039 y 2075 - 2099) de algunas especies de coníferas ha sido realizada por Cárdenas *et al.* (2016), éstos, muestran que las especies de *Abies religiosa* Kunth Schltl. et Cham., *P. leiophylla* y *P. teocote* las más afectadas y al igual que *D. mexicanus* podrían sufrir cambios importantes distribucionales al futuro.

Los resultados de la modelación de la distribución futura de *D. mexicanus* de este estudio muestran una expansión de su área (nuevas áreas) para el 2050, de 24,267 y 25,002 km² según el RCP 4.5 y 8.5 respectivamente; esto es, una posible redistribución geográfica de su área desde 25 hasta 30 km aproximadamente hacia latitud norte y longitud este, principalmente en la parte norte de la Sierra Madre Oriental y Occidental (Figura 8). No obstante, se observa que, en el centro del país, algunas áreas señaladas como idóneas por el modelo actual, podrían no ser idóneas en el 2050 en 47,687 y 51,585 km² para el RCP 4.5 y 8.5, respectivamente (Figura 8). Según el mapa de idoneidad, *D. mexicanus* se encuentra actualmente a una altitud media de 2,067 msnm, al año 2050 ésta podría incrementarse a 2,172 y 2,180 msnm según los RCP 4.5 y 8.5, respectivamente lo cual indica, que *D. mexicanus* también podría desplazarse a mayores altitudes.

Se ha encontrado que la altitud resulta indicadora de la expansión del intervalo altitudinal regional de *D. mexicanus* (Pinzón *et al.*, 2018), lo cual concuerda con los resultados obtenidos aquí.

Ungerer *et al.* (2009) muestran que *D. frontalis* ante un aumento de 3 °C en la temperatura mínima anual podría extender los límites de distribución de hasta 170 km, muy superior a lo que podría esperarse para *D. mexicanus*. Régnière (2009) por su parte, relaciona posibles brotes futuros de *D. ponderosae* en la parte occidental de Canadá y que estos podrían ser mayores hacia altitudes y latitudes más altas.

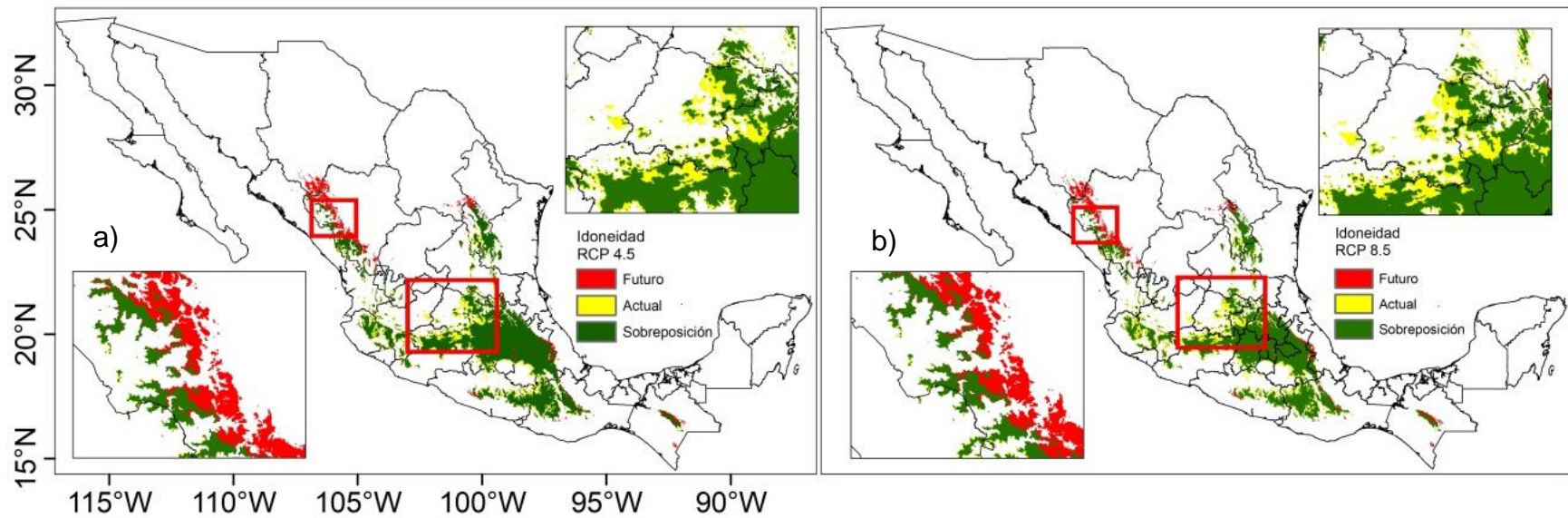


Figura 8. Áreas de idoneidad actual y futura de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins para el año 2050.

Riesgo de extrapolación de los modelos de idoneidad de *Dendroctonus mexicanus*

Hopkins

El resultado de los modelos a futuros y posibles riesgos de extrapolación a considerar en las áreas de mayor idoneidad un clima novedad tipo 1 (NT1) que mide la similitud entre los dominios de referencia y los proyectados tomando en cuenta la desviación de la media fueron de -1.12 para el RCP 4.5 y de -1.15 para el RCP 8.5. Por otra parte, cambios en la correlación de variables (NT2) para el RCP 4.5 y 8.5, los valores fueron de 13.50 y 13.30, respectivamente (Figura 9) presentándose patrones muy similares para ambos escenarios.

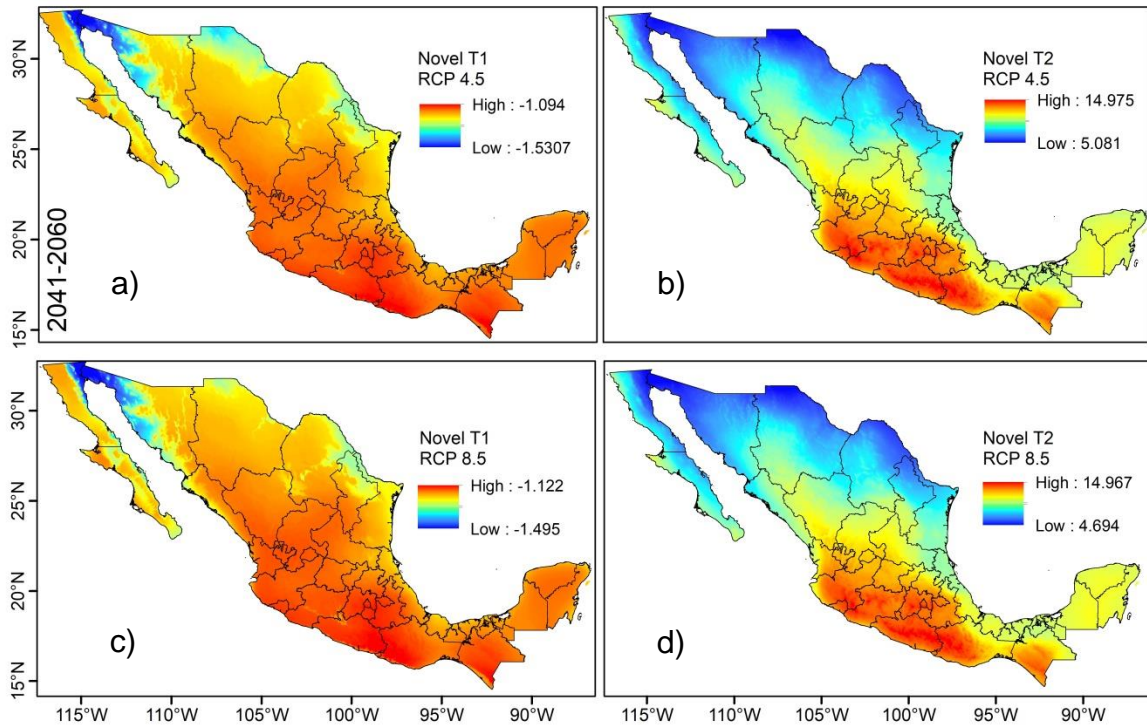


Figura 9. Mapas de clima novel tipo 1 y 2 de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins para el RCP 4.5 (a y b) y para el RCP 8.5 (c y d).

Mapas de diferencias entre variables futuras y actuales

Al realizar las diferencias de rasters, futura menos actual de la Bio 10 (variable que más explica la distribución de *D. mexicanus*) se observa que en el área de mayor idoneidad (centro del país), se espera un aumento de 1.72 °C al 2050, pero esta no parece ser influyente por si sola en la modificación de la distribución de esta especie, puesto que al sur del país, desaparecen áreas idóneas al 2050, pero temperaturas mayores a ésta, parecen determinar los desplazamientos de *D. mexicanus* hacia mayores altitudes y latitudes (Figura 10a). Similarmente, en las zonas de mayor idoneidad de *D. mexicanus* la temperatura media (Bio 1) podría aumentar 1.69 °C (Figura 10b) al 2050, mientras que la precipitación (Bio 12), permanecerá muy similar en esa área (Figura 10c).

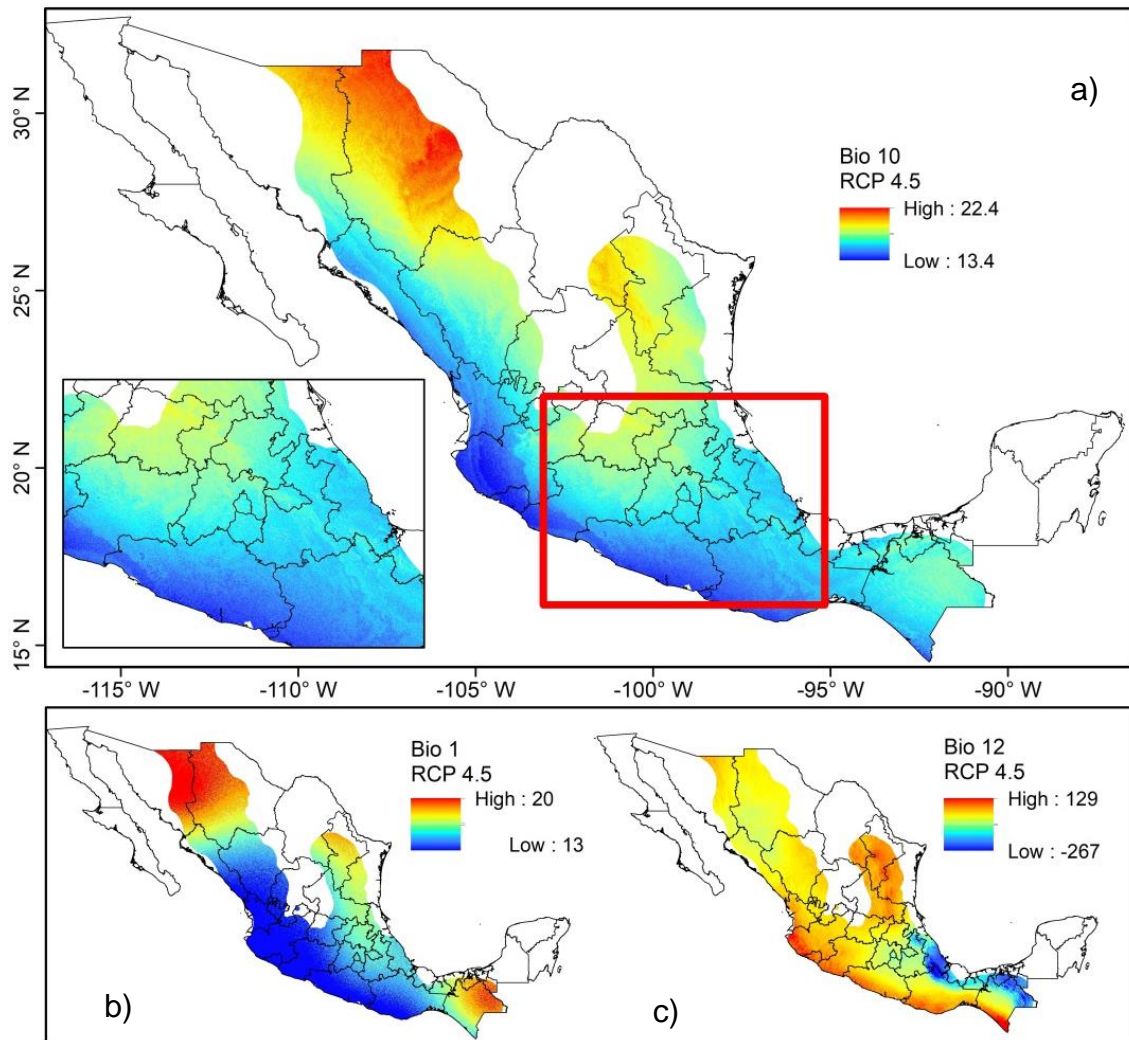


Figura 10. Cambios absolutos actual y futura de variables bioclimáticas que determinan la distribución de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. a) temperatura media del 1/4 anual más cálido Bio 10 b) temperatura media anual Bio 1 c) y precipitación media anual Bio 12.

Acorde a los registros usados en la modelación de *D. mexicanus*, y según la variable que más explica su distribución (Temperatura media del 1/4 anual más cálido, °C), la mayoría de éstos (35 %) actualmente se presentan a una temperatura preferente de 19 °C, pero variando desde 13 hasta 25 °C. Estos mismos registros podrían ocurrir donde la

temperatura al 2050 sea de casi 3 °C más que la actual, es decir, *D. mexicanus* podría tener preferencia por temperaturas más altas, al exhibir menos preferencia por temperaturas bajas (Figura 11).

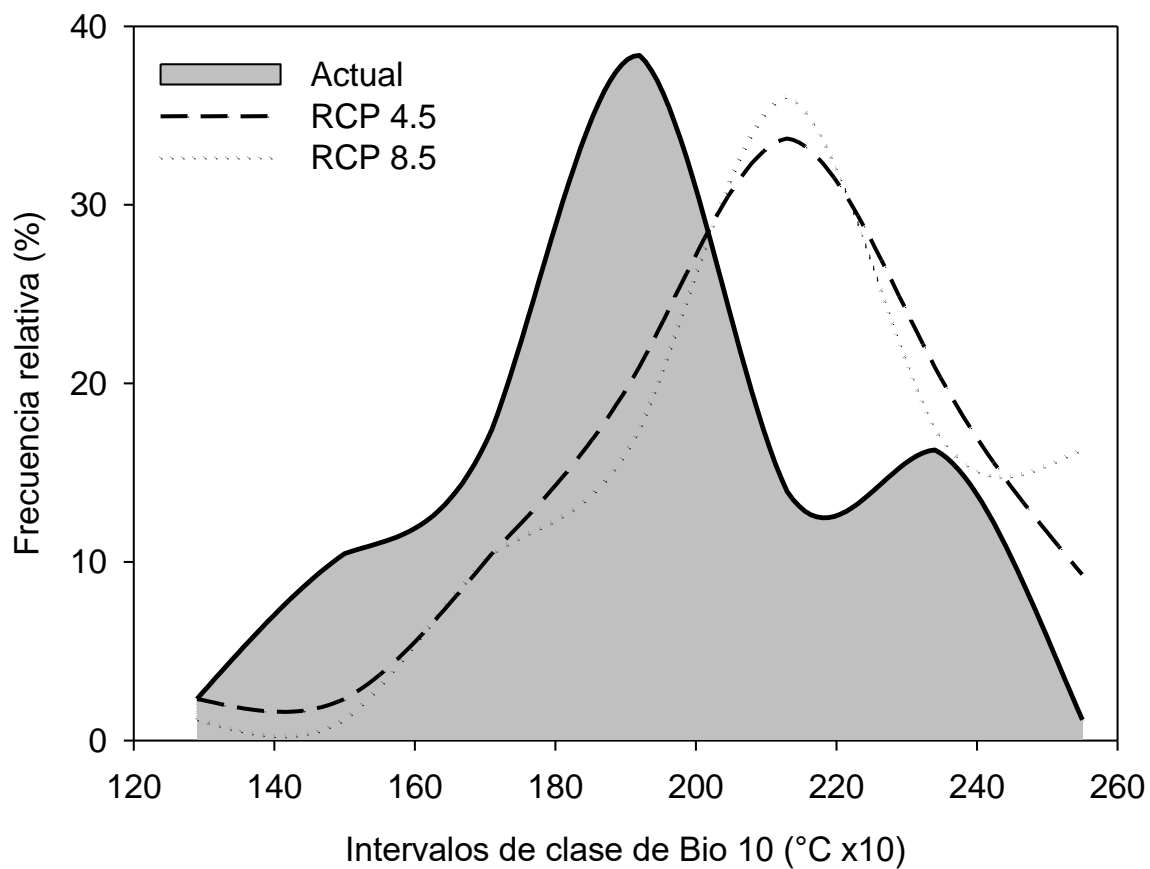


Figura 11. Histograma de frecuencia relativa de modelos generados de los registros de *Dedroctonus mexicanus* Hopkins en relación a la variable Bio 10.

CONCLUSIONES

Las variables que más explicaron la distribución *D. mexicanus* fueron la temperatura media del ¼ anual más cálido (Bio 10) y el Intervalo de temperatura anual (Bio 7). Los estados con mayor área de idoneidad son Estado de México, Michoacán y Puebla. Se espera una expansión de las áreas de idoneidad sean del orden de 24 mil km² para el 2050, y que algunas de éstas áreas se muevan hacia 100 m más en altitud, se desplacen hasta 25 km hacia la latitud norte y esa misma distancia hacia menores longitudes, en especial en el norte del país. Algunas áreas señaladas como idóneas por el modelo actual en el centro del país, podrían no ser idóneas en el 2050. El modelo de distribución de esta especie generado aquí, así como sus posibles efectos sobre la misma, debe interpretarse con cautela, por la incertidumbre sobre el futuro de las emisiones del CO₂, a pesar de esto, en las áreas propuestas en esta investigación, se puedan establecer estrategias de manejo forestal, para prevención de pérdidas por daño debida descortezadores, logrando su máximo potencial para su perpetuidad.

LITERATURA CITADA

- Aceves, L. D. Méndez, G. J. García, A. M. y Nájera, L. J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*. 52, 1043 - 1057.
- Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld, (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 (pp. 81).
- Armendáriz, T. F., Torres, B. V., López, M. F., Villa C. J. & Zúñiga, G. (2012). New record and extension of the distribution range of the bark beetle *Dendroctonus rhizophagus* (Curculionidae: Scolytinae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 850-853.
- Austin, M. P. & Smith, T. M. (1989) A new model for the continuum concept. *Vegetation*, 83, 35-47.
- Ayres, M. P., & Lombardero, M. J. (2000). Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of the Total Environment*, 262(3), 263-286.
- Baldwin R. (2009). Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*, 11(14), 854-866.

- Cambrón, S. V., Méndez, G. J., Ledesma, C. M., Luna, S. H., García, A. M. Cerano, P. J., Obregón, Z. J., Vergara, P. S. y Soto C. J. C. (2018). Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México. ISBN: 978-607-513-336-2, 74 p.
- Cárdenas, C. G., López, M. L., Silva, J. T. Bernal, S. N., Estrada, G. F., & López, S. J. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135-148.
- Cervantes, R. Cerano, J. Martínez, Villanueva, J. Esquivel, G. Cambrón, V. Méndez, J. and Castruita, L. (2019). Brotes históricos de descortezadores en México, Guatemala y Honduras (1895 - 2015) y su relación con las sequías, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente XXV(2)*, 269-290.
- CCMSS, (Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C.) (2012). Estado de los bosques de México, 217 p.
- Cibrián, T. D., Méndez, M. J. T., Campos, B. R., Yates, III. H. O. y Flores, Lara J. E. (1995). *Insectos Forestales de México*. Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México. Publicación no. 6, 43 p.
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio, O. L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281.

- Cobos, M. E., Jiménez C., Nuñez P. C., Romero A. D. & Simoes M. (2018). Sample data and training modules for cleaning Biodiversity information. *Biodiversity Informatics*, 14, 49-50.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2015). Atlas del Agua en México. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS_2015.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). Diagnóstico del Programa Presupuestario U036 PRONAFOR-Desarrollo Forestal 2014. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_U036.pdf
- Conde, C. (2007). México y el cambio climático global. SEMARNAT. ISBN: 978-968-817-868-3, México D.F., 21 p.
- Cruz, C. G., Villaseñor, J. L. Lopez, M. L. Ortiz, E. (2012). Potential distribution of humid mountain forest in Mexico. *Botanical Sciences*, 9: 331-340.
- Cuéllar, G. Equihua, A. Villa, J. Estrada, E. Méndez, T. y Romero, J. (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides* Zucc. atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 42-59.
- Dalenius, T. & Hodges, J. L. (1959) Minimum variance stratification. *Journal of the American Statistical Association*, 54, 88-101.

- Elith, J. Graham, C. Anderson, R. Dudík, M. Ferrier, S. Guisan, A. Hijmans, R. Huettmann, F., Leathwick, J. Lehmann, A. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29; 129-151.
- Escobar, L. E. Lira, N. A. Medina, V. G. & Peterson, T. 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*, 221-229.
- Felicísimo, A. M., Muñoz, J. Mateo, R. G. y Villalba, C. J. (2012). Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 21(3), 1-6.
- Flores, V. O. y Gerez, P. G. (1994). Biodiversidad y conservación en México: vertebrados, vegetación y uso del suelo. CONABIO y UNAM, Segunda edición, Coyoacán, México, ISBN 968-36-3992-5, 439 p.
- FAO. 2018. El estado de los bosques del mundo - Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2009). Global review of forest pests and diseases. Rome Italy, ISBN 978-92-5-106208-1, 156 p.
- García, A. M., Méndez, G. J. y Hernández, A. J. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3-13.
- Guisan A. & N. Zimmermann E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling* 135:147-186.

- Heywood, V. H. & Watson, R. T. (1995). Global biodiversity assessment (Vol. 1140). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, S. E., Parra J. L., Jones P. G. & A. Jarvis (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978.
- Houghton, J. T., Callander, B. A. & Varney, S. K. (1992). Climate Change 1992. The Supplementary report to the IPCC scientific assessment, WMO, UNEP, IPCC Cambridge University Press, p. 16.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía en Informática (INEGI) (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional), escala: 1:250000. edición: 2. Aguascalientes, Ags., México.
- Johnson J.B & Omland, K.S. (2004). Model selection in ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 19: 101-108.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T. Kreft, H., Soria, R. W. & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific data*, 4, 170122.
- Lammens, A. M., 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(5), 541-545.
- Logan, J. A., White, P. Bentz, B. J. Powell, J. A. (1998). Model analysis of spatial patterns in mountain pine beetle outbreaks. *Theor Popul Biol*, 53, 236-255.

- Magaña, V. Conde, C. Sánchez, O. y Gay, C. (2000). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. *Gay, C.(comp.), México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, 15-21
- Maldonado, M. J. Cera, C. J Mendoza, A. R. Sáenz, L. A. Torres, O. M. Bravo, P. L y Alotorre, C. L. (2015) Distribución potencial de *Dendroctonus valens* mediante modelos de máxima entropía: Estado de California, E.U. *Revista Lationamericana el Ambiente y las Ciencias*, 6(12), 194-198.
- Martínez, M. E., Peterson T. A. & Hargrove, W. W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 13(4), 305-314.
- Martínez, M. F. y Osnaya, P. (2004). Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT e INE, Xalapa Veracruz México, 526 p.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M. y Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
- Mendoza, M. Salinas, Olivo, A. and Zúñiga, G. (2011). Factors influencing the geographical distribution of *Dendroctonus rhizophagus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Environmental entomology*, 40(3), 549-559.
- 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(10), 1147-1159.

- Mittermeier, R. A. (1988). Primate diversity and the tropical forest. *Biodiversity*, Chapter 16, 145-154.
- Moser, J. C., B. A. Fitzgibbon & Klepzig K. D. (2005). The Mexican pine beetle, *Dendroctonus mexicanus* (Coleoptera: Curculionidae): First record in the United States and co-occurrence with southern pine beetle, *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae). *Entomological News*, 116(4), 235-249.
- Muñoz J. & Felicísimo, M. A. (2004) A comparison between some statistical methods commonly used in predictive modeling. *Journal of Vegetation Science*, 15, 285-292.
- Nix HA (1986). BIOCLIM - A bioclimatic analysis and prediction system. CSIRO Division of Water and Land Resources Research (Ed.). Annual Report. CSIRO Publishing. Canberra, Australia, 59-60.
- Ordaz, P. S. y Delgadillo, R. J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), 587-597.
- Osorio, O. L. A. Falconi, M. y Soberón, J. (2016). Sobre la relación entre idoneidad del hábitat y la abundancia poblacional bajo diferentes escenarios de dispersión. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 1080-1088.
- 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.

- Peterson, A. T., Papeş, M. & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological modelling*, 213(1), 63-72.
- Peterson, A. T., Soberón, J. Pearson, R. G. Anderson, R. P. Martínez, M. E. Nakamura, M. & Araújo, M. B. (2011). Ecological niches and geographic distributions (Monograph in Population Biology No, 49, 56 p.
- Phillips, S. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31; 161-175.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- Pinzón, M. D. Cuellar, R. L., Jurado, E. y González, T. M. (2018). Efecto de la sequía en la distribución y densidad de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, 1905 en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 463-478.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Régnière, J., & Perlis, A. (2009). Predicción de la distribución continental de insectos a partir de la fisiología de las especies, *Unasylva*, 60, 37-42.
- Robayo, C. A. y Monroy, V. O. (2012). Distribución potencial del jaguar *Panthera onca* (Carnivora: Felidae) en Guerrero, México: persistencia de zonas para su conservación. *Revista de Biología Tropical*, 60(3), 1357-1367.

- Robayo, C. A., Escobar, L. E. Osorio, O. L., Nori, J., Varela, S., Martínez, M. E. y Lira-Noriega, A. (2017). Introducción a los análisis espaciales con énfasis en modelos de nicho ecológico. *Biodiversity Informatics*, 12, 45-57.
- Ruiz, G. C., Méndez, G. J., Cambrón, S.V., García, A. M., Montoya, J. J. y Sosa, D. L. (2018). Distribución altitudinal y estacional de *Dendroctonus adjunctus* Blandford y *Dendroctonus brevicomis* Leconte en Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41 (4-A), 519 - 526.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Ed. Limusa. México, D. F., México. 432 p.
- Salas, C. (2008). ¿Por qué comprar un programa estadístico si existe R?. *Ecología Austral*, 18(2), 223-231.
- Salinas, M. Y., Vargas, M. C., Zúñiga, G., Victor J., Ager A. y Hayes, J. (2010). Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género *Dendroctonus* (Curculionidae: Scolytinae) en México. Instituto Politécnico Nacional. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. 90 p.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorentes, B. J. y Anta, S. (2009). Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 100.
- Soberón, J. & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (Supplement 2), 19644-19650.

- Soberón, J. & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas, *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.
- Soberón, J., Osorio, O. L. & Peterson, A. T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441.
- Sosa, D. L., Méndez, G. J. García, A. M. Cambrón, S. V. Villarreal, Q. J. Ruiz, G. C. y 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.
- Stockwell D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13, 143-158.
- Ungerer, M. Ayres, M. & Lombardero, M. (1999). Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biogeography*, 26(6), 1133-1145.
- Varela, S. Lobo, J. M. & Hortal, J. (2011). Using species distribution models in paleobiogeography: a matter of data, predictors and concepts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310(3-4), 451-463.
- Williams, W. D. & Liebhold, M. A. (2002). Climate change and the outbreak ranges of two North American bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, (4) 87-99.

Wood, S. L. (1982). The bark and Ambrosia beetles of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae), A taxonomic monograph. Utah, United States, Brigham Young University, 1-1359.

Zúñiga, G. Mendoza, C. G., Cisneros, R. y Moreno, S. Y. (1999). Zonas de sobreposición en las áreas de distribución geográfica de las especies mexicanas de *Dendroctonus Erichson* (Coleoptera: Scolytidae) y sus implicaciones ecológico-evolutivas. *Acta Zoológica Mexicana*, 77(77), 1-22.