

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



DISTRIBUCIÓN ACTUAL, POTENCIAL Y FUTURA DE *PINUS CULMINICOLA*,
PINUS JALISCANA Y *PINUS RZEDOWSKII*; BAJO DOS ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

Tesis

Que presenta JASIEL NOÉ JUÁREZ RÁBAGO

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2019

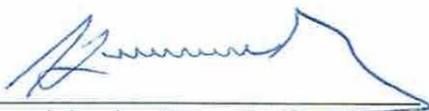
DISTRIBUCIÓN ACTUAL, POTENCIAL Y FUTURA DE *Pinus culminicola*,
Pinus jaliscana y *Pinus rzedowskii*; BAJO DOS ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO EN MÉXICO

Tesis

Elaborada por JASIEL NOÉ JUÁREZ RÁBAGO como requisito parcial para obtener el
Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN con la supervisión y Aprobación del Comité de Asesoría



Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla
Asesor Principal



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez
Asesor



Dr. Mario Alberto García Aranda
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida, fuerza, sabiduría y perseverancia para lograr mis objetivos, por no dejarme solo y caminar conmigo a cada paso que doy, tomarme de su mano a lo largo de mi vida.

A la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de seguir creciendo y logrando metas en mi carrera profesional y acogerme como alumno de su institución.

A mis padres Guillermo Juárez S. y Martha Rábago P. y hermanos Diana Juárez R. y Guillermo Juárez R. por todo el apoyo recibido a lo largo de mis estudios, por sus consejos y buenos deseos.

A mi novia y futura esposa Diana Cota. U., por apoyarme en todos mis proyectos de vida y estar a mi lado siempre para darme tiempo, paciencia y tolerancia, y nunca dejarme solo.

A mi comité de asesoría los doctores; José A. Villarreal, Alejandro Zermeño, Homero Ramírez, Mario A. García, por su infinito apoyo y tiempo dedicado.

A CONACyT por el apoyo brindado a lo largo del proyecto de investigación y la formación profesional.

DEDICATORIA

A mis padres **Guillermo Juárez Soto** y **Martha Apolonia Rábago Pérez** con todo el amor y cariño, que siempre han estado ahí para mí, me han apoyado a lo largo de mi formación profesional y mi formación como persona, con amor y esfuerzo incondicional me han llevado a lo largo de la vida a ser el ser humano que hoy en día mi persona refleja, los amo, eternamente agradecido por lo que han hecho por mí, que Dios me los cuide siempre.

A mis dos hermanos, **Diana Guadalupe Juárez Rábago** y **Guillermo Juárez Rábago**, por su apoyo incondicional, consejos que nunca me han faltado en la vida, siempre han estado para mí, a mis sobrinos, **Christian Guillermo**, **Emmanuel Gerardo**, **Guillermo** y **Naydelin Geraldin**, que Dios me los cuide siempre.

A mi novia y futura esposa, **Diana Cota Ungson**, que siempre me apoya en mis proyectos de vida, me aconseja y me guía para ser una mejor persona día con día, por estar ahí siempre y no dejarme de apoyar, gracias por apoyarme en mi carrera profesional y ayudarme a seguir creciendo como persona y profesionista, eternamente agradecido por lo que has hecho por mí, te amo, que Dios te cuide siempre.

A mi comité de asesoría, por el gran apoyo recibido, por no dejarme solo, por sus consejos y recomendaciones, por ayudarme a concluir mis estudios en tiempo y forma, por su basto profesionalismo.

A todos aquellos que aportaron su granito de arena para que todo esto fuera posible, mil gracias.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
Índice de Cuadros.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Género <i>Pinus</i>	3
Problemática de los Bosques de México	3
Distribución de Especies	4
Modelos de Distribución de Especies.....	4
Evaluación de Modelos de Distribución.....	5
Perfil Bioclimático.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Área de Estudio y Datos de Presencia de Especies.....	7
Variables para Modelación	7
Generación de Modelos de Distribución Potencial	8
Área Potencial y Amplitud Ecológica	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Ajuste y Validación de Modelos de Distribución	9
Distribución Potencial	10
Variables que Predicen la Distribución de Especies	12
Usos de Suelo en Área Potencial	15
CONCLUSIONES	23
REFERENCIAS.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Distribución potencial actual de <i>P. culminicola</i> en México basado en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	13
Figura 2.- Distribución potencial de <i>P. culminicola</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	14
Figura 3.- Distribución potencial de <i>P. culminicola</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	14
Figura 4.- Distribución potencial actual de <i>P. jaliscana</i> en México basa en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	16
Figura 5.- Distribución potencial de <i>P. jaliscana</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	16
Figura 6.- Distribución potencial no accesible de <i>P. jaliscana</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	17
Figura 7.- Distribución potencial de <i>P. jaliscana</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	18
Figura 8.- Distribución potencial no accesible de <i>P. jaliscana</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	18
Figura 9.- Distribución potencial actual de <i>P. rzedowskii</i> en México basada en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	19
Figura 10.- Distribución potencial de <i>P. rzedowskii</i> en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....	20

Figura 11.- Distribución potencial de *P. rzedowskii* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.....21

Figura 12.- Análisis de componentes principales de los modelos de distribución potencial actual y futuros.....22

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Variables bioclimáticas.....	9
---	---

RESUMEN

DISTRIBUCIÓN ACTUAL, POTENCIAL Y FUTURA DE *PINUS CULMINICOLA*,
PINUS JALISCANA Y *PINUS RZEDOWSKII*; BAJO DOS ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

POR

JASIEL NOÉ JUÁREZ RÁBAGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ ÁNGEL VILLARREAL QUINTANILLA-ASESOR

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2019

El cambio climático tendrá un efecto sobre la distribución de las especies, sobre todo aquellas que su rango es muy restringido a pequeñas localidades o regiones, por lo tanto el objetivo del presente estudio fue generar patrones de distribución potencial actual y futuro bajo escenarios de cambio climático, para tres especies de pinos endémicos de México en peligro de extinción. Se obtuvieron registros de presencias de las especies del portal Global Biodiversity Information Facility, y 19 variables bioclimáticas para el presente y el futuro (2041-2060) bajo dos escenarios de concentración de emisiones (Rcp45 y Rcp85) del modelo MPI-ES-MR. Los patrones se calibraron, depurando los datos de entrada por medio de correlación espacial y clasificación, se seleccionaron mediante una prueba binomial y se evaluaron con un análisis de componentes principales en el paquete NicheA de R. Los resultados muestran valores de AUC de 0.997 para *Pinus culminicola* y *Pinus jaliscana*; 0.995 para *Pinus rzedowskii*, un aumento con relación a su distribución natural, en las zonas de distribución potencial actual de 5.3%, 15.8% y 16.2% sucesivamente, con un aumento de 8.4%, 45% y 99.4% para el escenario Rcp45, 9.6%, 78.4% y 98.9% para el escenario Rcp85 sucesivamente, se mostraron dos grupos significativos de patrones en el PCA de NicheA, el primer grupo para los tres patrones actuales y un segundo grupo para los seis patrones futuros. Los ajustes a los modelos dependieron de las variables y número de registros.

Palabras claves: analista de nicho; modelo del sistema terrestre; maxent; pinos; patrones; vías de concentración representativas

ABSTRACT

CURRENT AND FUTURE POTENTIAL DISTRIBUTION OF *PINUS*
CULMINICOLA, *PINUS JALISCANA* AND *PINUS RZEDOWSKII*; UNDER TWO
SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE IN MEXICO

POR

JASIEL NOÉ JUÁREZ RÁBAGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ ÁNGEL VILLARREAL QUINTANILLA-ASESOR

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2019

Climate change will have an effect on the distribution of species, especially those whose range are very restricted to small locations or regions, therefore the objective of this study was to generate patterns of current and future potential distribution under climate change scenarios, for three Mexican species of endemic pines in danger of extinction status. Presence records of the species of the Global Biodiversity Information Facility portal were obtained, and 19 bioclimatic variables for the present and the future (2041-2060) under two emission concentration scenarios (Rcp45 and Rcp85) of the MPI-ES-MR model. The patterns were calibrated, debugging the input data using spatial correlation and classification, data were selected using a binomial test and then evaluated by a principal component analysis in the NicheA package of R. The results showed AUC values of 0.997 for *Pinus culminicola* and *Pinus jaliscana*, and 0.995 for *Pinus rzedowskii*, an increase in relation to its natural distribution, in the areas of current potential distribution of 5.3%, 15.8% and 16.2% successively, with an increase of 8.4%, 45% and 99.4% for the Rcp45 scenario; 9.6%, 78.4% and 98.9% for the Rcp85 scenario successively, two significant groups of patterns were shown in the NicheA PCA, the first group for the three patterns current and a second group for the six future patterns. The patterns adjustments depended on variables and number of records.

Key words: niche analyst; earth system model; maxent; Pine trees; patterns; representative concentration pathways

INTRODUCCIÓN

México por su gran diversidad de especies del género *Pinus* a nivel mundial, es considerado un centro secundario de diversidad al contar con más de 47 especies, que equivalen a más del 42% de total de las especies en el mundo con porcentaje mayor al 50% (22 especies) de endemismo (Romeu, 1995; Sánchez, 2008; Estrada, *et al.*, 2014; Manzanilla, 2017), de las cuales ocho especies se encuentran catalogadas como en peligro de extinción (SEMARNAT, 2015). Aun así, las especies se encuentran bajo una constante presión de diversos factores como incendios, tala inmoderada, tala clandestina, plagas, enfermedades y el fenómeno del cambio climático (Pérez *et al.*, 2013).

El género se encuentra principalmente distribuido en el Hemisferio Norte y al Norte del Trópico de Cáncer (Estrada, *et al.*, 2014), en Norteamérica se reconoce a México, el estado de California y la parte sureste de los Estados Unidos de América como tres regiones con alta diversidad de especies de pinos (Ávila, *et al.*, 2014). La distribución de este género en México se encuentran en cinco regiones principales; Baja California, Baja California Sur, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra de San Cristóbal, Sierra de Oaxaca y Península de Yucatán (Sánchez, 2008).

En los últimos años (Phillips *et al.*, 2006) los modelos de distribución de especies se han utilizado para conocer la distribución potencial y generar hipótesis geográficas sobre su distribución pasada, presente y futura, siendo MaxEnt uno de los métodos de mayor empleo y con una interface de mayor precisión (Kumar y Stohlgren, 2009). El método de máxima entropía se ha utilizado para modelar la distribución de diferentes especies de pinos en México para conocer los alcances potenciales de su distribución, y el efecto que el cambio climático pueda ocasionar a las especies (Aceves *et al.*, 2018; Ávila, *et al.*, 2014; Castillo, *et al.*, 2018; García, *et al.*, 2018; Manzanilla *et al.*, 2019).

OBJETIVO

El objetivo de la investigación fue generar patrones de distribución potencial actual y futura de tres especies de pino en peligro de extinción en México, por medio de variables bioclimáticas y bajo escenarios de cambio climático (MPI-ES-MR) para poder así, generar conocimiento de los alcances para actividades de restauración, manejo y conservación de la especie y su ecosistema.

HIPÓTESIS

La distribución potencial futura de las especies de pinos en México disminuirá bajo los escenarios de cambio climático (Rcp45 y Rcp85) en relación con su distribución potencial actual.

REVISIÓN DE LITERATURA

Pinus

Los pinos deben su gran importancia a su dominancia en las comunidades vegetales del hemisferio norte, el valor económico que adquieren al proveer diversos productos y servicios. México representa una zona de especiación del género *Pinus*, con alrededor del 40 % de las especies del género reconocidas a nivel mundial (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014), sus estrategias de conservación no aseguran su protección (Aguirre y Duivenvoorden, 2010). Gernandt y Pérez de la Rosa (2014) aseguran que de las coníferas mencionadas para México, 30 son de carácter endémico, sin embargo en la actualidad, solo 20 especies del género *Pinus* se encuentran incluidas en alguna categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010, de las cuales siete, se encuentra restringidas a no más de tres estados, y sin embargo existen especies que igualmente presentan una distribución muy restringida (*Pinus georginae*, *P. luzmariae*, *P. radiata* var. *binata* y *P. yecorensis*) y no están incluidas en dicha norma (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014).

Problemática de los Bosques de México Los bosques de México se encuentran bajo constante presión por diversos factores como lo son las plagas y enfermedades, incendios, sobre aprovechamientos, tala clandestina y por el fenómeno global de cambio climático, aunado al aumento en la demanda diversos insumos y productos para su desarrollo económico y social, producen cambios en los paisajes y sistemas naturales (Pérez *et al.*, 2013). Al respecto, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2002), asegura que muchas especies se desplazarán a latitudes o altitudes mayores respecto de su hábitat actual, ocasionando una reducción en su área de distribución como resultado de cambios en el clima (Gutiérrez y Trejo, 2014), haciéndose más evidente con las especies de altitudes altas. Una especie con las características mencionadas es *Pinus hartwegii* la cual se distribuye en climas sub alpinos de las zonas montañosas más altas del país (Farjon *et al.*, 1997) y que en el estado de Michoacán disminuye su área de distribución hasta un 75 % bajo escenarios climáticos futuros (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

Modelos de Distribución de Especies

Los modelos de distribución de especies son métodos de tipo correlativo, estáticos y no mecanísticos, que funcionan a partir de la correlación de las variables ambientales y los sitios de ubicación de las especies (Phillips *et al.*, 2006), se representan de manera cartográfica de la favorabilidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables ambientales (Mateo *et al.*, 2011), para así, poder predecir la idoneidad del medio ambiente para la especie en función de las características ambientales (Phillips *et al.*, 2006). La idoneidad es la relación matemática o estadística entre la distribución real conocida y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores (Mateo *et al.*, 2011).

Pinus culminicola

También conocido como pino enano o pino de potosí, su distribución endémica del país, solo ocurre en dos estados de México: Coahuila y Nuevo León, en este último solo crece en la cima del cerro del Potosí, por encima de los 3,000 msnm; en Coahuila solo habita una o dos montañas. Como reconocerla: pocos arboles pueden crecer por encima de los 3,000 m, este pino piñonero crece como un arbusto, ramificado desde su base, presenta 5 hojas en cada fascículo (grupo de hojas), sin embargo es su limitada distribución la que ayuda a reconocerlo, solo podrá ser encontrado en las partes altas del cerro del Potosí, en el municipio de Galeana (Musalem, *et al.*, 2008). Se pensó que solo era una forma enana del pino piñonero común (*Pinus cembroides*); sus poblaciones se han reducido considerablemente por incendios forestales. Especies similares: No se puede confundir con otra especie en su hábitat, en las partes bajas de las montañas, es común observar otras especies de piñoneros como *Pinus cembroides*, pero este crece como un árbol, recordemos que *Pinus culminicola* solo crece arriba de los 3,000 msnm (Manzanilla, 2017)

Pinus jaliscana

También conocido como pino de Jalisco, es una conífera de la familia de las pináceas, específicamente al género *Pinus*. Es considerada una Especie casi amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Se distribuye en México: Jalisco, en la parte noroeste de la Sierra Madre del Sur, en la vertiente del Pacífico, principalmente en la Sierra de Cuale y al sur de Villa Purificación (Dvorak *et al.* 2000; Eckenwalder, 2009).

Esta especie se encuentra en altitudes entre 800-1.200 (-1650) m snm en terreno montañoso en suelos profundos, ácidos derivados de rocas graníticas. El clima es subtropical, con una estación seca de 5-6 meses de diciembre a mayo y una precipitación anual de 1.000-1.500 mm dependiendo de la altitud y la exposición. *Pinus jaliscana* es un componente local del pino o pino-encino con una extensión limitada en la mayoría de las localidades conocidas hasta ahora (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014). Especies más comunes y extendidas que crecen con él son: *Pinus maximinoi* y *Pinus oocarpa* y a una altura ligeramente superior también *Pinus douglasiana*. Varias especies de *Quercus* suelen ser codominantes, *Clusia salvinii* también es común (Dvorak *et al.* 2000). Árbol de 20-30 (-35) m de altura, con un tronco y ramas ascendentes rectas. La corteza de los árboles jóvenes es delgada, áspera, de color rojizo, con engrosamiento de 1.5 a 3.5 cm y grietas longitudinales en las placas. Las ramas son largas, corteza delgada y flexible viene en 2 o 3 años, estén lo bastante suave. Las hojas recolectadas en paquetes de (3 -) 4-5, 6.12 cm de largo y muy delgado (desde 0,5 hasta 0,8 mm de ancho), pero no colgante, con bordes finamente dentados y estomas en la superficie, con particiones; envoltorio de haz marrón pálido, 8-15 mm de largo (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014). Conos Subterminal, solitaria o 2-3 en 0,7-1,5 cm de grosor, curvado, parte inferior con escamas, que se mantuvo unido a conos adyacentes, púrpura-rojo, con un período de crecimiento sólo hasta 2 años para convertirse en el final cónica a largo plazo, la reducción de la base y el ápice alcanzando (4,5) 6-8,5 (-9.8) cm de largo por (3-) 4-5 (-6) cm abierta. Las semillas de color marrón oscuro, 3,5-6 x 2-3,5 mm, disecados alas de color marrón claro 12-17 × 5-8 mm (Dvorak *et al.* 2000).

Pinus rzedowskii

Esta especie inusual, aunque generalmente se clasifica con los pinos de piñón en el subgénero *Strobus* sección *Cembroides*, contiene ciertos caracteres esperados en el subgénero *Pinus*. Tiene un nivel relativamente alto de variación genética, en comparación con la mayoría de las coníferas, pero con una endogamia considerable en cada una de las poblaciones, y evidencia de un tamaño de población sustancialmente mayor en el pasado reciente (evolutivamente) (Delgado *et al.* 1999). Se Distribuye México: Michoacán: a (1710-) 2100-2480 m de elevación en la Sierra Madre del Sur, Distrito de Coalcomán, en tres localidades disjuntas, una cerca del pueblo de Dos Aguas y las otras aproximadamente 40 km al oeste: Cerro de Chiqueritas , Cerro Ocotoso y Puerto del Pinabete. Cada lugar tiene de 1 a 4,000 árboles, con la especie en su conjunto compuesta por 12 poblaciones que suman entre 6,000 y 6,500 árboles (Delgado *et al.* 1999).

Todas las poblaciones "ocurren en suelos calizos empinados y muy rocosos; las precipitaciones en el área se estiman en 1,500 mm anuales, casi todas ocurren durante el período de junio a octubre; la temperatura se estima en un mínimo de -5 ° C a un máximo de 30 ° C en abril, justo antes de la temporada de lluvias. En el mejor sitio, Puerto del Pinabete, la especie se asoció con *P. pseudostrobus* , *P. herrerae* , *P. michoacana* y *P. oocarpa* . En Cerro Chiqueritas y Cerro Octoso, ambos sitios muy rocosos, no se encontraron otros pinos con las pequeñas poblaciones de *P. rzedowskii* (Perry, 1991).

Un árbol (15-) 20-25 (-30) m de alto y 30-60 cm de tronco recto o curvado, a menudo ramificado bajo. Los árboles jóvenes son piramidales con ramas espirales regularmente espaciadas, pero en la madurez la copa es generalmente abierta e irregularmente ramificada. La corteza de los árboles jóvenes es delgada, lisa, de color verde grisáceo, se vuelve escamosa, descamativa, marrón rojiza, y aún más tarde se vuelve gruesa y áspera con profundas fisuras horizontales y longitudinales que dividen la corteza en placas rectangulares que son ásperas, escamosas y de color marrón oscuro (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Las ramillas son delgadas, grises, lisas. Las bases de las brácteas de las hojas no son decurrentes; Las agujas nacen a lo largo de toda la ramificación y persisten de 2 a 3 años. Las agujas son flexibles, delgadas, en grupos de (3-) 4-5, 6-10 cm de largo y 0.6-

0.8 mm de ancho, los bordes finamente serrados; estomas en las dos superficies internas solamente; canales de resina 2-3, ocasionalmente 4, externo en la superficie dorsal con ocasionalmente 1 externo en una superficie ventral; haz fibrovascular individual (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Las vainas del fascículo forman una roseta de escamas recurvadas y luego son de hoja caduca. Los conos jóvenes son erectos sobre los pedúnculos de 1.5-2.0 cm de largo, con escamas gruesas, anchas y recurvadas. Los conos maduros son oblongos, afilados ligeramente, simétricos, colgantes, nacidos solos y en espirales de 2-4; 10-15 cm de largo y 6-9 cm de ancho cuando está abierto; color marrón amarillento a ocre brillante ocre cuando está maduro, madura en el otoño y pronto caducifolio; el pedúnculo delgado, curvado, 1.5-3.0 cm de largo, cayendo con el cono. Hay 80-120 escamas de cono que tienen 15-22 mm de ancho; la apófisis es subpiramidal con una prominente quilla horizontal, el ápice en ángulo agudo; el umbo es dorsal, pequeño, de color marrón oscuro, deprimido, con una espina muy pequeña, curvada hacia abajo (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Las apófisis y el umbo generalmente tienen una pequeña gota de resina ámbar transparente. Las semillas de color marrón oscuro tienen (6-) 8 (-10) mm de largo y (4-) 5-6 mm de ancho con un ala articulada de 20-30 (-35) mm de largo y 8-13 mm de ancho. Cotiledones 9-14, principalmente 10, 11 y 12. La madera es moderadamente dura, el duramen lustroso marrón pálido, la albura blanco cremoso, no muy resinoso (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Como objeto de estudio se seleccionaron tres especies del género *Pinus* de México que se encuentran catalogadas como especies en peligro de extinción (SEMARNAT, 2015), las cuales fueron; *P. culminicola* Andresen & Beaman, *P. jaliscana* Pérez de la Rosa y *P. rzedowskii* Madrigal & M.Caball.

Datos de entrada

La modelación de la distribución de las especies requiere de dos clases de conjuntos de datos de entrada: datos ambientales y registros geográficos de presencia de la especie, los datos ambientales pueden incluir variables de precipitación y/o temperatura, mientras que los registros geográficos de presencia son lugares únicos donde la especie ha sido referenciada geográficamente (Peterson *et al.*, 2011), utilizando el algoritmo Maxent ver. 3.3.3k. (Maximum Entropy Species Distribution Modeling) (Phillips *et al.*, 2006). Los datos de registro de presencia de las especies se obtuvieron del portal Global Biodiversity Information Facility (GBIF), donde se descargaron registros geográficos (coordenadas geográficas) para las tres especies de pinos mexicanos a partir del año 1950 hasta el año 2018, con DOI de consulta de los datos para cada una de las especies: *P. culminicola* DOI10.15468/dl.yebp0g, *P. jaliscana* DOI10.15468/dl.hxx9hc y *P. rzedowskii* DOI10.15468/dl.bi4nem.

Procesamiento de datos

Los datos de presencia se filtraron en pasos secuenciales para mejorar la calidad del modelo; en primer lugar se eliminaron los registros que se encontraban repetidos, por consiguiente se descartaron los registros que se encontraban fuera el rango de distribución natural de la especie y al final se depuraron los registros de presencia que se encontraban a una distancia entre sí menor de 2000 metros a la redonda, con el fin de no encontrar más de un registro dentro del mismo pixel ambiental, la distancia mínima entre puntos fue de 2000 metros, ya que la distribución de las especies a modelar es muy restringida.

Las variables ambientales se obtuvieron del portal de CHELSA (climatologies at high resolution for the earth's land surface areas), con un total de 19 variables bioclimáticas (Cuadro 1) actuales y para el futuro (2041-2060) se obtuvieron 19 variables bioclimáticas

del Modelo del Sistema Tierra del Instituto Max Planck (MPI-ES-MR) del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) bajo dos escenarios de cambio climático (vía de concentración representativa) Rcp45 (escenario de estabilización de emisiones) y Rcp85 (escenario de altas concentraciones) a una resolución espacial de 2.5 minutos de arco para estimar las condiciones climáticas adecuadas para las especies.

Cuadro 1.- Variables bioclimáticas

Variables
BIO1 = Temperatura media anual
BIO2 = Rango Diurno Medio (Promedio de mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))
BIO3 = Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)
BIO4 = Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)
BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
BIO12 = Precipitación anual
BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
BIO14 = Precipitación del mes más seco
BIO15 = Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)
BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17 = Precipitación del trimestre más seco
BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido
BIO19 = Precipitación del trimestre más frío

Se excluyeron cuatro capas de datos ambientales, la Bio08, Bio09, Bio18 y Bio19 (temperatura de cuarto más húmedo, temperatura de trimestre más seco, precipitación de trimestre más cálido, la precipitación de trimestre más seco respectivamente) ya que estas capas ambientales están compuestas por la combinación de más de dos variables ambientales las cuales registran problemas en la interface en la ejecución de los modelos de predicción (Escobar *et al.*, 2014). Se realizó un recorte a cada una de las capas ambientales utilizando el contorno de límite geopolítico de los Estados Unidos Mexicanos.

Calibración de variables

Para las variables ambientales se realizó una prueba de correlación espacial entre las variables en el programa ArGIS 10.5. Descartando las variables que tuvieran una correlación mayor a 0.8, como resultado de variables a utilizar; Bio02 (Rango diurno medio), Bio03 (Isothermalidad), Bio04 (Temporalidad de la temperatura), Bio05 (Temperatura máxima del mes más cálido), Bio13 (Precipitación del mes más húmedo), Bio14 (Precipitación del mes más seco), Bio15 (Estacionalidad de precipitación) y Bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo).

Modelación de distribución geográfica

Se realizó la modelación de distribución potencial para cada especie utilizando el programa Maxent ver. 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006) con una salida logística (Freeman, 2019) y un total de 500 interacciones, creando curvas de respuesta y pruebas Jackknife para validar los modelos con el 50% de registros para pruebas de entrenamiento y el resto para las pruebas de modelación. La salida del modelo consiste en una cubierta geográfica formato grid con valores probabilísticos de 0 a 1 de hábitat potencial, donde 0 indica pixeles que no representan hábitat y valores cercanos a 1 representan mayor probabilidad de ocurrencia de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

Se realizó una clasificación de las áreas de distribución en referencia al valor del porcentaje de probabilidad que arroja el modelo: los dos primeros deciles (0.81 a 1.0) corresponde al aérea idónea para la distribución de la especie (área idónea para la distribución de la especie), del tercer al cuarto decil (0.61 a 0.8) corresponden a el área

accesible (existen condiciones para que la especie subsista pero no permanezca), del quinto séptimo decil (0.31 a 0.6) corresponde a áreas sumidero (la especie puede explorar pero no puede habitar por mucho tiempo), y del octavo al noveno decil (0.0 a 0.3) a las áreas no idóneas (no existen las condiciones para que la especie subsista).

En la modelación se consideraron pruebas de precisión a través de un análisis de omisión y comisión, una prueba de sensibilidad gráfica de área bajo la curva (AUC) y pruebas de Jackknife que analizan el comportamiento independiente de cada variable bioclimática para determinar su peso y grado de participación en la creación del modelo. Los mejores modelos para cada especie fueron seleccionados en base a su ROC parcial y pruebas de significancia binomiales, y la complejidad del modelo, donde los valores más altos de AUC indican un mejor modelo, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para todos los modelos generados utilizando el programa NicheA evaluado en R (R Development Core Team, 2013) el cual analiza los resultados de los patrones comparándolos entre sí.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los patrones de distribución de las tres especies del género *Pinus* son considerados adecuados por sus valores mayores de 0.85 (Elith, 2000) y se expresaron de manera geográfica por medio de mapas de distribución marcados por deciles de 0 a 1.0, obteniendo un mapa para la distribución potencial actual y dos mapas para cada uno de los escenarios de cambio climático (Rcp45 y Rcp85) del escenario futuro para cada una de las especies, resultados del ajuste y calibración de los modelos de distribución.

Determinación de distribución potencial actual y futura bajo los dos escenarios de *P. culminicola* se utilizaron los siguientes ajustes durante la ejecución: 29 registros de presencia utilizados para el entrenamiento, nueve para las pruebas, 10029 puntos utilizados para determinar la distribución de Maxent (puntos de fondo y puntos de presencia).

Las capas ambientales utilizadas (todas continuas): bio14 bio15 bio2 bio3 bio5. Valores de regularización: lineal / cuadrático / producto: 0.269, categórico: 0.250, umbral: 1.710, bisagra: 0.500. Tipo de características utilizadas: bisagra lineal de respuesta cuadrática, curvas: verdadera, navaja: verdadero. El AUC de prueba es 0.997, la desviación estándar 0.001. Algoritmo determinado después de 500 interacciones.

El patrón de distribución potencial actual para *P. culminicola*, refleja las zonas adecuadas para la distribución de la especie en los primeros dos deciles (Fig. 2). García y colaboradores en el 2018 mencionan la distribución potencial para *P. culminicola* se mantiene restringida a la región noreste de México, el modelo generado muestra que se concentran en las zonas de alta montaña entre Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí reportado por Villaseñor en el 2016, teniendo un mayor rango de área de idoneidad para el hábitat de la especie, destacando la zona del cerro del Potosí como se han reportado (García y González, 1991), esta área es de suma importancia para el manejo, restauración y conservación del hábitat en los estados de Coahuila y en mayor parte el estado de Nuevo León, área de distribución restringida en la Sierra Madre Oriental (Favela, 2010; Villaseñor, 2016) formando parte de la vegetación alpina-subalpina de la región como lo describe Villarreal y Encina (2005) .

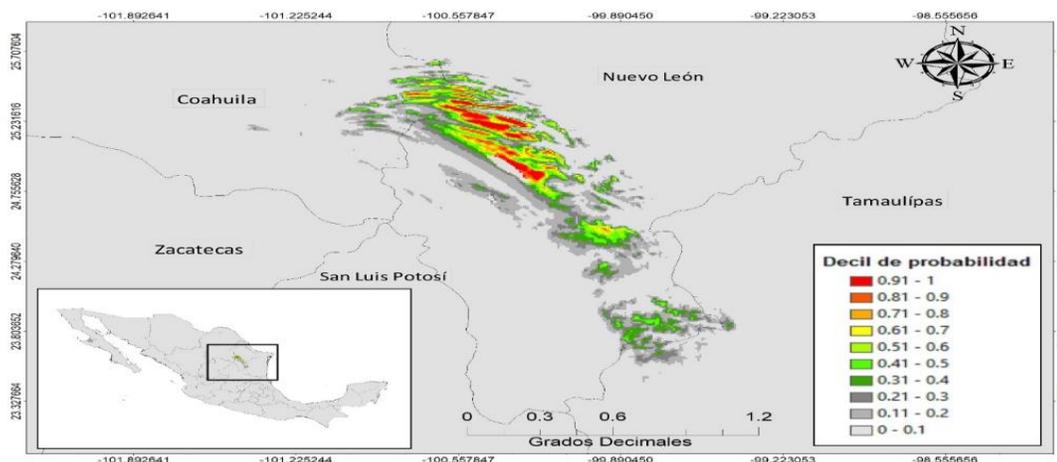


Figura 1.- Distribución potencial actual de *P. culminicola* en México basado en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Los modelos de distribución potencial futura reflejaron la expansión del potencial distributivo de *P. culminicola* para los dos escenarios de cambio climático: con un incremento del 8.4% para el escenario Rcp45 (Figura 3) y 9.6% para el escenario Rcp85 (Figura 4) con respecto a la distribución potencial actual de la especie, en contraste con las predicciones climáticas que han realizado para la región noreste de México, donde Hernández y colaboradores en el 2013 indican que habrá una disfunción promedio anual de las temperaturas y la distribución de la lluvia cambiará para la zona noreste del país. El incremento de la potencial distribución de esta especie no cambia en relación con la distribución reportada por autores como Garza y colaboradores en el 2003 y Manzanilla en el 2017, aumentando en superficie de distribución siguiendo presente en los mismos estados de Coahuila, Nuevo León, y reconociéndose un porcentaje de probabilidad de distribución del 0.3 a 0.7 para el estado de Tamaulipas y San Luís Potosí como zona sumidero para la especie *P. culminicola*, una de las especies más vulnerables a la reducción de su hábitat por efecto del cambio climático (Gómez y Arriaga, 2007). Lo resultados encontrados junto a lo reportado por Manzanilla en el 2017 y García y colaboradores en el 2018, *P. culminicola* presentan una distribución restringida pero que aumenta en superficie bajo los dos escenarios de cambio climático (Figura 3 y 4), zonas

de suma importancia para el manejo, conservación y restauración del hábitat del pino potosino.

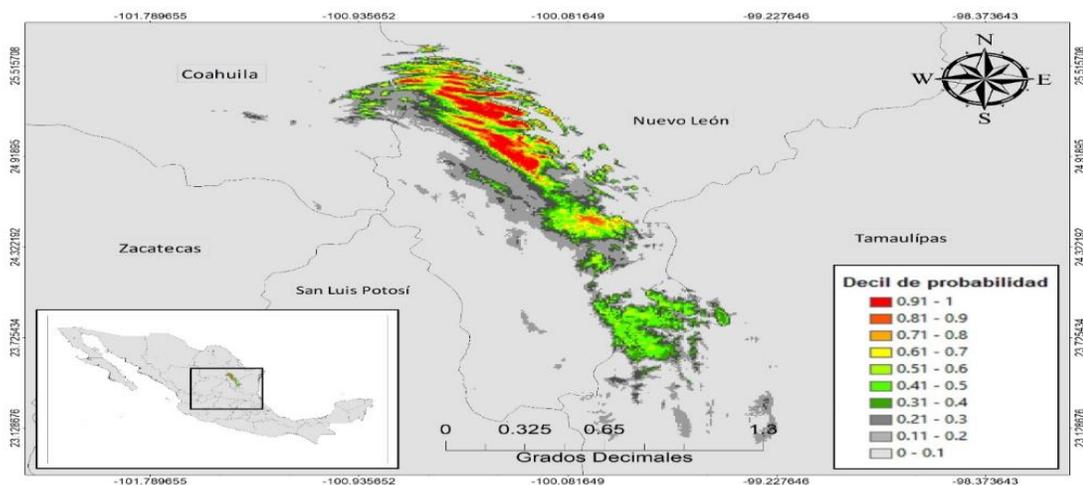


Figura 2.- Distribución potencial de *P. culminicola* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

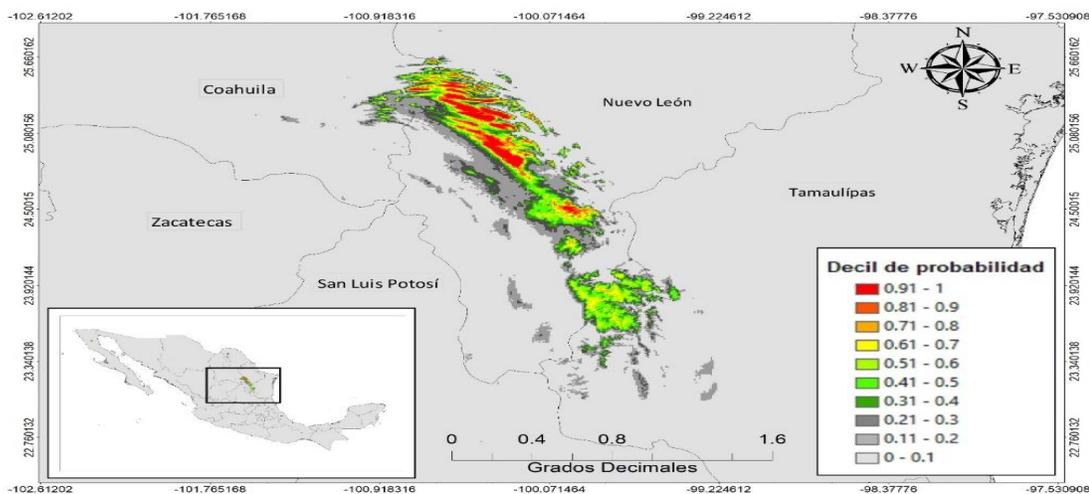


Figura 3.- Distribución potencial de *P. culminicola* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Para el patrón de distribución de *P. jaliscana* se utilizó el aumento de entrenamiento regularizado de 3.982, el AUC de entrenamiento de 0.997, aumento de entrenamiento no regularizado de 4.841. La ganancia de prueba no regularizada fue de 4.612, y el AUC de prueba de 0.997, la desviación estándar 0.001. Algoritmo terminado después de 500 iteraciones.

Los siguientes ajustes se utilizaron durante la ejecución: 18 registros de presencia utilizados para el entrenamiento, 5 para las pruebas, 10018 puntos utilizados para determinar la distribución de (puntos de fondo y puntos de presencia). Capas ambientales utilizadas (todas continuas): bio13 bio14 bio15 bio2 bio3 bio4 Valores de regularización: lineal / cuadrático / producto: 0.481, categórico: 0.250, umbral: 1.820, bisagra: 0.500. Tipos de características utilizadas: bisagra lineal curvas de respuesta cuadrática: navaja real: verdadero.

La especie *Pinus jaliscana* mostró tener su mayor importancia de distribución en la zona donde convergen la Sierra Madre Occidental y la Faja volcánica Transmexicana, en la Sierra de Jalisco donde se encontró la mayor distribución de la especie del 15.8 % como se ha reportado por estudios previos (Dvorak *et al.*, 1998, Ramos *et al.*, 2003, Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014).

En Nayarit, en la región centro y sur en los límites con Jalisco, destaca una zona de distribución potencial y zonas accesibles y en menor porcentaje zonas sumidero para la especie, donde se encuentra otra especie del género que se asocian a las poblaciones de *Pinus jaliscana* presente en los estados donde lo reporta Villaseñor (2016).

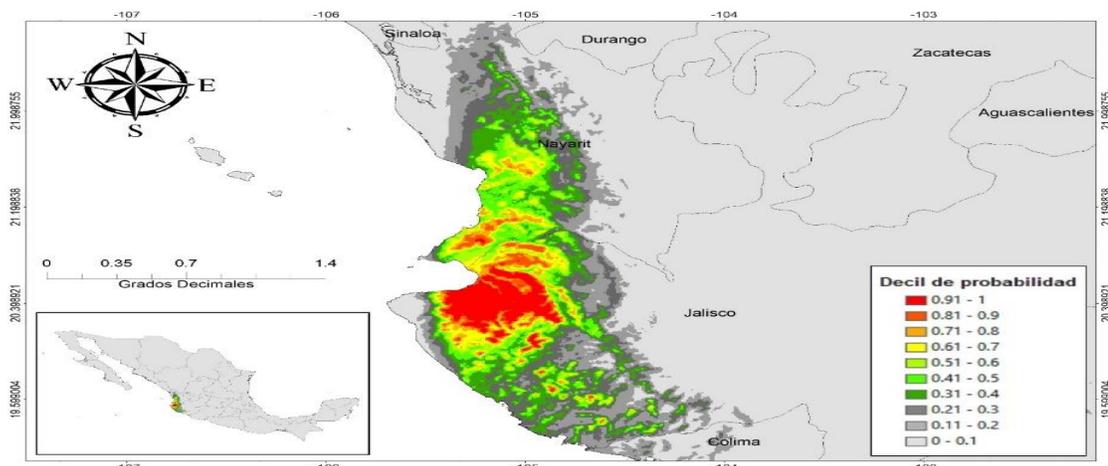


Figura 4.- Distribución potencial actual de *P. jaliscana* en México basa en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Los resultados de la distribución para *P. jaliscana* bajo los escenarios de cambio climático en un futuro Rcp45 (20141-20160), muestran un aumento significativo del 45% en las áreas de distribución potencial de la especie en relación con la distribución potencial actual (Fig. 5), la cual abarca los estados de Jalisco y Nayarit (Dvorak *et al.*, 1998, Ramos *et al.*, 2003, Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014, CO NAFOR, 2016) (Fig.5).

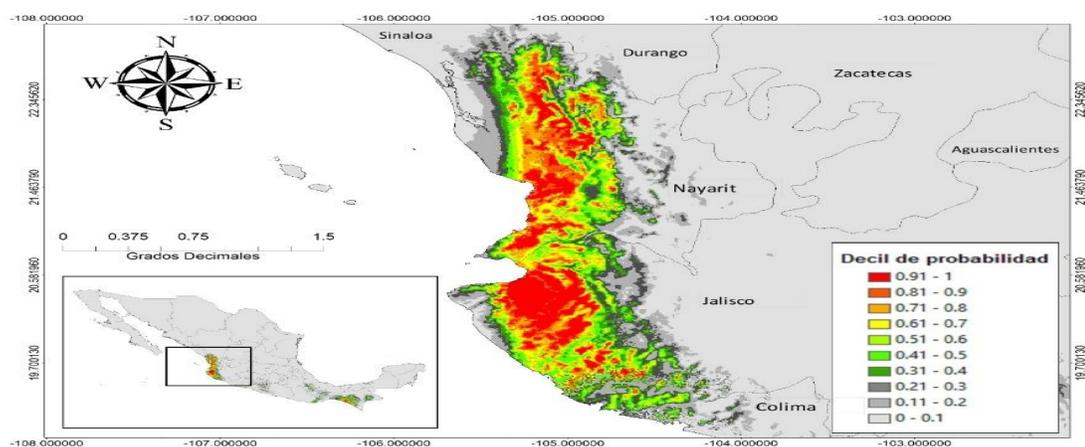


Figura 5.- Distribución potencial de *P. jaliscana* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060,

los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Se encontraron en los estados de Chiapas y una pequeña porción del estado de Oaxaca, áreas de distribución potencial idóneas para la especie, a las cuales se les denominó como áreas de distribución potencial no accesibles para la especie (Fig.6), debido a la capacidad de dispersión de la especie y las barreras geográficas como la Faja volcánica la cual limita que la especie pueda habitar el área.

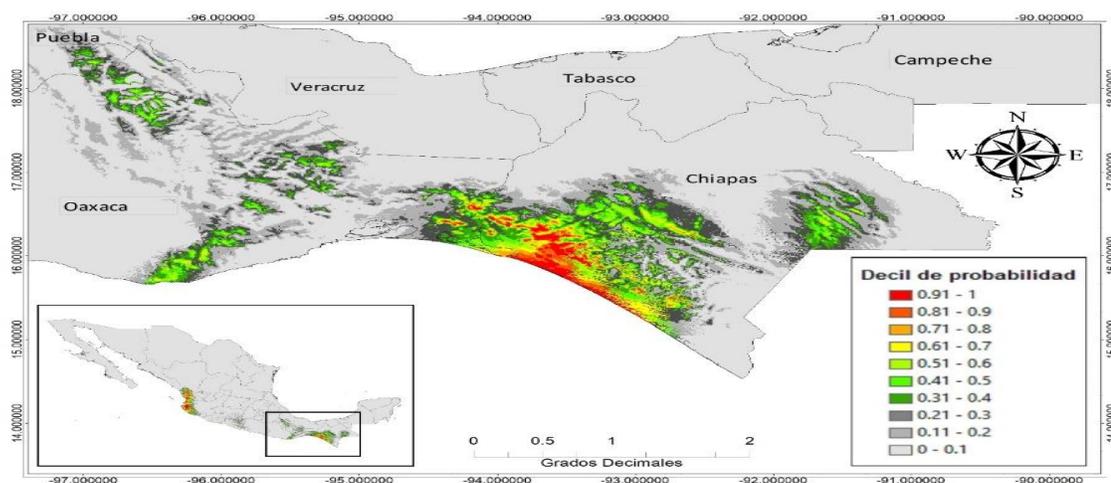


Figura 6.- Distribución potencial no accesible de *P. jaliscana* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

El modelo para jaliscana, bajo el escenario de cambio climático futuro Rcp85 (2041-2060), muestran un aumento significativo del 78.4% en las áreas de distribución potencial de la especie en relación con la distribución potencial actual (Fig. 5), la cual abarca los estados de Jalisco y Nayarit (Dvorak *et al.*, 1998, Ramos *et al.*, 2003, Germandt y Pérez de la Rosa, 2014) (Fig.7).

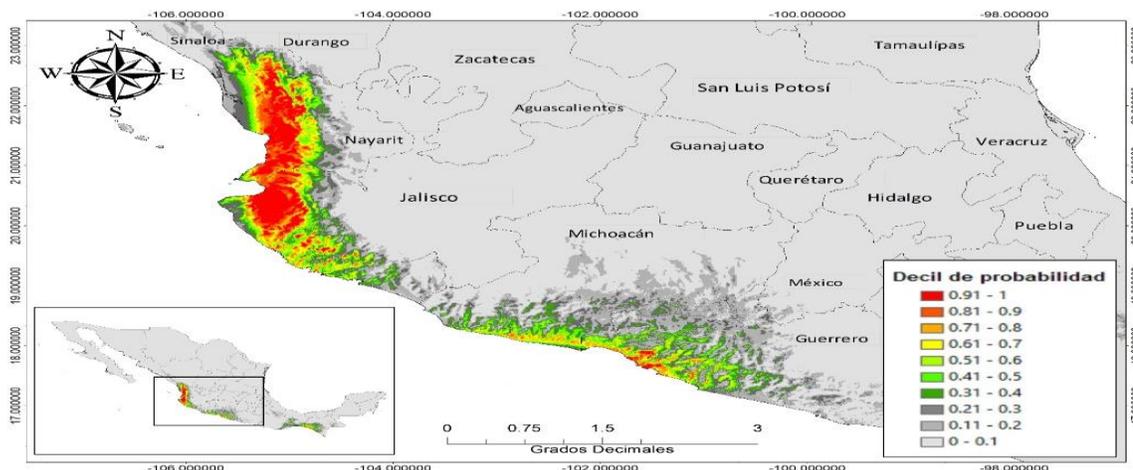


Figura 7.- Distribución potencial de *P. jaliscana* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

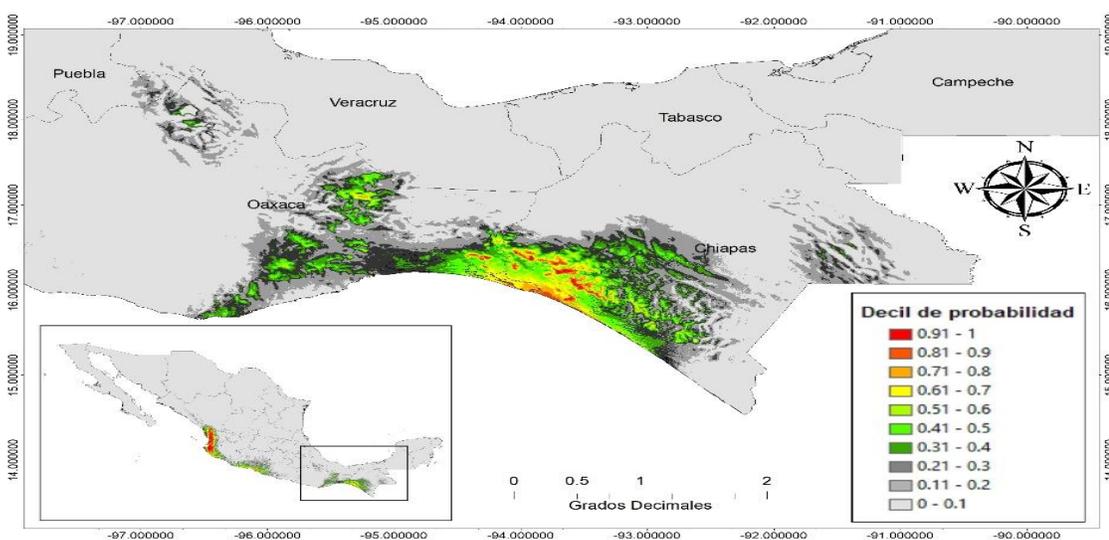


Figura 8.- Distribución potencial no accesible de *P. jaliscana* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Para la modelación de *P. rzedowskii* se utilizó el aumento de entrenamiento regularizado de 3.266, el AUC de entrenamiento de 0.995, el aumento de entrenamiento no regularizado de 4.018. La ganancia de prueba no regularizada de 3.819. El AUC de prueba

de 0.990, la desviación estándar de 0.007. Algoritmo convergido después de 360 iteraciones. Los siguientes ajustes se utilizaron durante la ejecución: 12 registros de presencia utilizados para el entrenamiento, 4 para las pruebas. 10012 puntos utilizados para determinar la distribución (puntos de fondo y puntos de presencia). Capas ambientales utilizadas (todas continuas): bio12 bio13 bio15 bio2 bio3 bio4 bio5. Valores de regularización: lineal / cuadrático / producto: 0.714, categórico: 0.429, umbral: 1.880, bisagra: 0.500. Tipos de características utilizadas: curvas de respuesta cuadrática lineal: navaja real: verdadero.

El resultado mostrado para *P. rzedowskii* muestra una distribución potencial para los estados de Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán y Oaxaca, siendo Michoacán el estado de distribución natural reportada en la sierra de Coalcomán por diversos autores (Álvarez *et al.*, 1997; Delgado *et al.*, 2013 y Villaseñor, 2016), el cual se considera endémico ubicándose en el centro-oeste (Delgado *et al.*, 2013 y Castilleja *et al.*, 2016), donde se obtuvo un aumento del 16.2%, muestran al estado de Guerrero con un gran porcentaje de área potencial para la distribución del pino de Rzedoskii, seguido los estados de Oaxaca, Colima y Jalisco, el estado de México solo presenta zonas accesibles y sumidero para la especie (Fig.9).

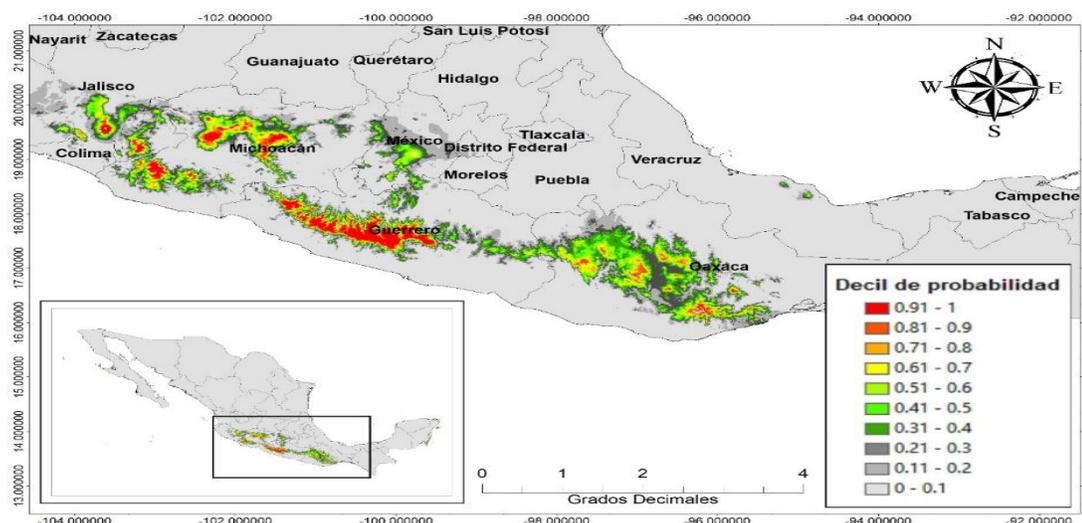


Figura 9.- Distribución potencial actual de *P. rzedowskii* en México basada en variables bioclimáticas, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

Para los escenarios de cambio climático Rcp45 y Rcp85 se muestra un aumento de la distribución potencial para ambos escenarios, un 99.4 % para el primer escenario (Fig.10) y 98.9% para el segundo escenario (Fig.11), en comparación con la distribución potencial actual, presentando un mayor porcentaje probabilidad de distribución de la especie en los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y por último el estado de Chiapas, los estados de México, Tlaxcala, Morelos y Puebla, presentan zonas con alta probabilidad de presencia de la especie pero no accesibles para los dos escenarios, el aumento en la distribución puede ser afectado por el incremento en precipitaciones y eventos meteorológicos que presentará la zona sur del país por efecto del cambio climático (Diario Oficial de la Federación, 2012).

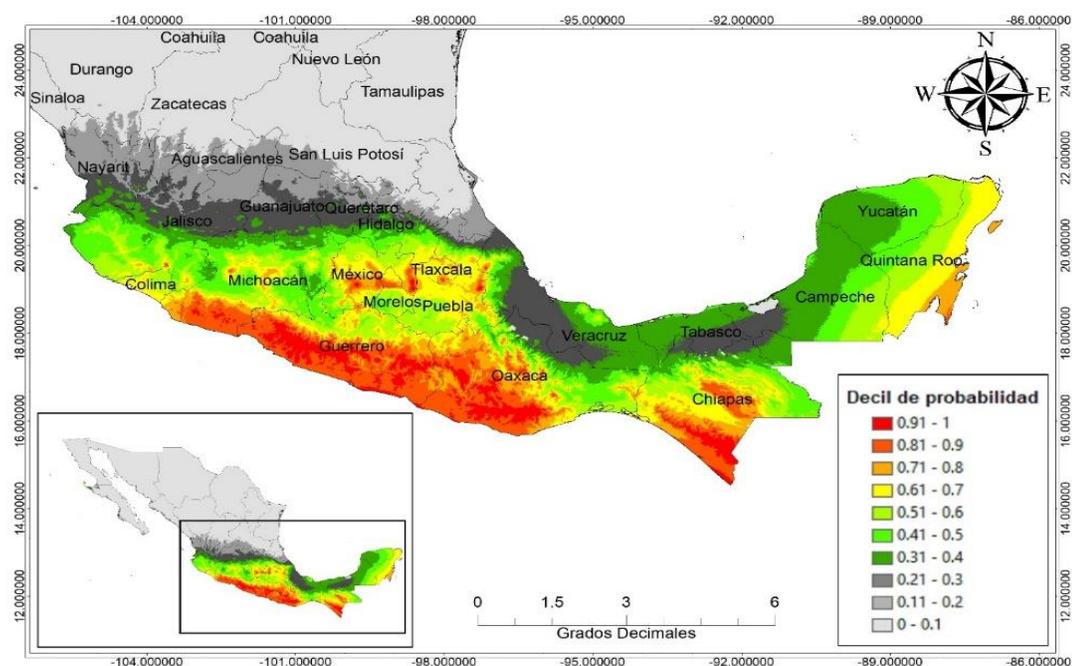


Figura 10.- Distribución potencial de *P. rzedowskii* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp45 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

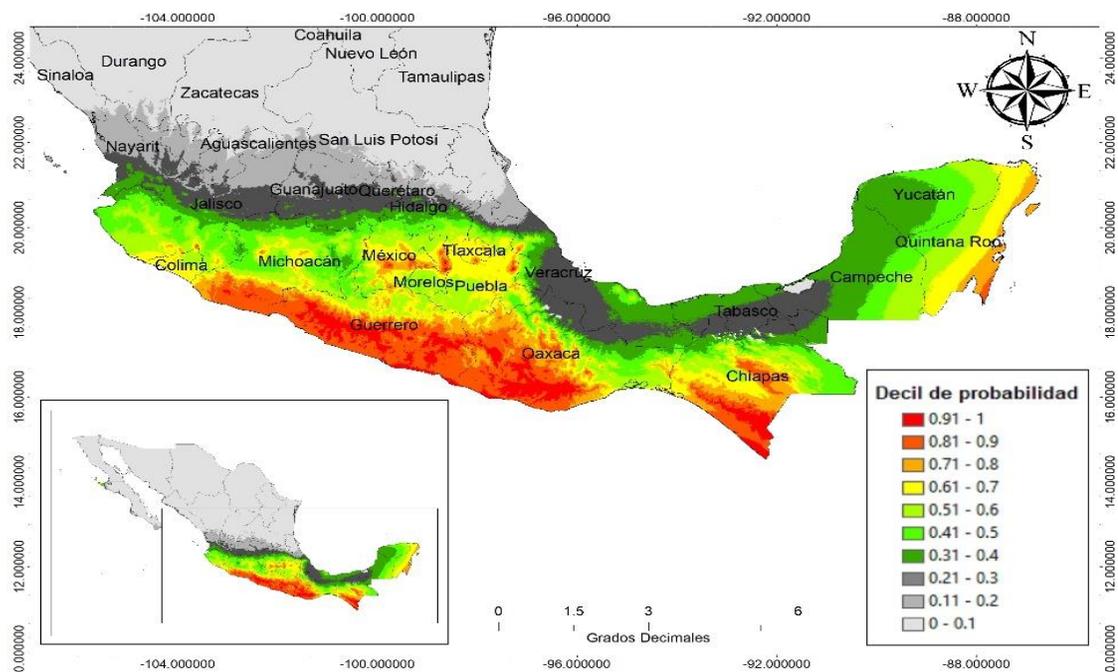


Figura 11.- Distribución potencial de *P. rzedowskii* en México basado en variables bioclimáticas bajo el escenario Rcp85 del modelo MPI-ES-MR para el año 2041-2060, los primeros dos deciles se consideran como zona con mayor probabilidad de presencia de la especie.

El análisis de componentes principales realizado mediante el analista de nicho muestra la existencia de dos grupos claramente definidos (Soberón y Peterson, 2005): un grupo compacto de tres patrones (patrones de distribución actuales) de las especies *P. culminicola*, *P. jaliscana* y *P. rzedowskii*; y un segundo grupo de patrones (patrones de predicciones futuras) de las especies de pinos (Fig.12).

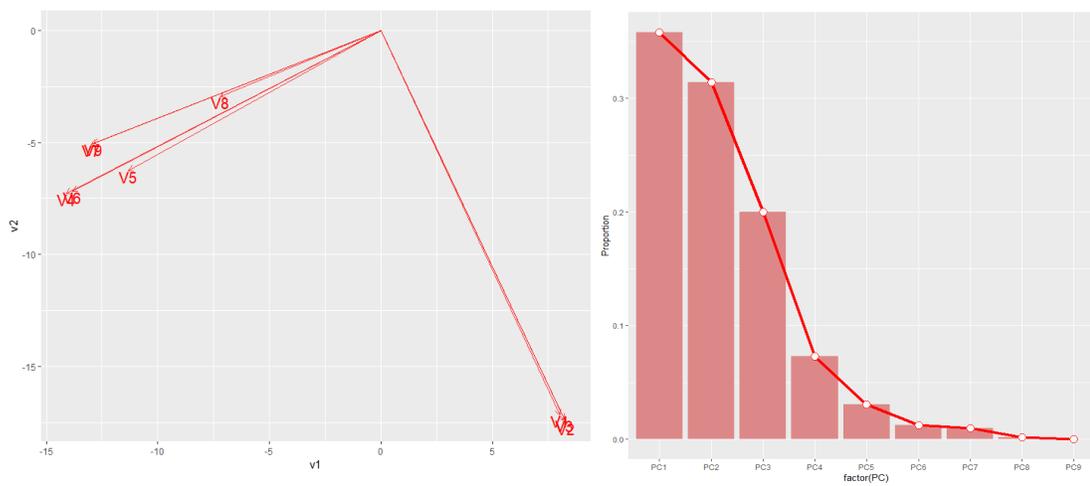


Figura 12.- Análisis de componentes principales de los modelos de distribución potencial actual y futuros.

CONCLUSIONES

Los patrones generados son considerados confiables por sus valores de AUC mayores a 0.90, y su relación con las variables seleccionadas para cada una de las especies, ya que estas tienen diferentes requerimientos biológicos, lo que se ajusta para su modelación con diferentes variables bioclimáticas, y aceptar la hipótesis del incremento del potencial distributivo de las especies por efecto de los escenarios de cambio climático. Las variables bioclimáticas que coincidieron en los modelos de distribución fueron; el rango de temperatura diurna medio, la isothermalidad y la estacionalidad de la precipitación que ayudan a la predicción del total de los modelos. Los mapas de distribución potencial no solo facilitan la localización del marco hipotético de ocurrencia, sino también son una herramienta importante en la planeación del manejo, conservación y restauración de zonas de hábitat de las especies.

REFERENCIAS

- Aceves-Navarro, L. A., Rivera-Hernández, B., López-Castañeda, A., Palma-López, D. J., González-Mancillas, R., & Juárez-López, J. F. (2018). Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora P.*) al cambio climático en el estado de Tabasco, México. *Nova scientia*, 10(20), 369-396. doi:10.21640/ns.v10i20.1379
- Álvarez, E. & Medina, F. (1997). Distribución, estructura poblacional y variación genética de algunas especies de pinos en peligro de extinción en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. B156. México D. F.
- Ávila, C., Villavicencio, R & Ruiz, J. (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
- Castilleja-Sánchez, P., Delgado-Valerio, P., Sáenz-Romero, C., Herrerías-Diego, Y. (2016). El éxito reproductivo y la endogamia difieren en las poblaciones fragmentadas de *Pinus rzedowskii* y *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, dos pinos mexicanos endémicos bajo amenaza. *Bosques*, 7(8), 178. doi:10.3390/f7080178
- Castillo-López, A., Santiago-García, W., Vargas-Larreta, B., Quiñonez-Barraza, G., Solís-Moreno, R., Javier-Corral J. (2018). Modelos dinámicos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 49(9). doi:10.29298/rmcf.v9i49.185
- Cruz-Cárdenas. G., L. López.-Mata, J. T. Silva, N. Bernal-Santana, F. Estrada-Godoy and J. A. López-Sandoval. 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. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027
- Delgado, P., D. Piñero, A. Chaos, N. Perez-Nasser y ER Alvarez-Buylla. 1999. Alta diferenciación poblacional y variación genética en el pino mexicano en peligro de extinción *Pinus rzedowskii* (Pinaceae). *American Journal of Botany* 86 (5): 669-676.
- Delgado-Valerio, P., Núñez-Medrano, J., Rocha-Granados, M., & Muñoz-Flores, H. (2013). Variación genética de dos áreas semilleras de pino establecidas en el estado de Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(18), 104-115. doi: OI: 10.29298/rmcf.v4i18.393.
- Diario Oficial de la Federación (2012). Ley General de Cambio Climático. 6 de junio del 2012. México.
- Dvorak, W., Pérez de la Rosa, J. A., Mapula, M., & Reyes, V. J. (1998). The ecology and conservation of *Pinus jaliscana*. *Forest Genetic Resources*, 26, 13-19.
- Dvorak, W. S., J. E. Kietzka, J. K. Donahue, G. R. Hodge y T. K. Stanger. 2000. *Pinus greggii*. In: Conservation & Testing of Tropical & Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative. Central America & Mexico Coniferous Resources Cooperative, North Carolina State University, Raleigh, NC. pp. 52-73.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). Una explicación estadística de MaxEnt para ecologistas. *Diversidad y Distribuciones*, 17, 43-57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725

Equipo Central R Development (2013). R: Un lenguaje y un entorno de Estadística Informática. R Fundación para la Computación de Estadística, Viena. [Http://www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)

Escobar, L. E., Lira, A., Medina, G. & Peterson, A. T. (2014). Potential for spread of White-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: Using Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospat. Health*, 11, 221–229. doi: 10.4081/gh.2014.19

Estrada C. E., Villarreal J. Á., Salinas M., Encina J., Cantú C., González H., Jiménez J. (2014). Coníferas de Nuevo León, México. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León Nuevo León, México. 144p.

Farjon, A., & B.T. Styles. (1997). Pinus (Pinaceae). Flora Neotropica Monograph 75. New York, NY: The New York Botanical Garden.

Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa and B. T. Styles. (1997). A field guide to the pines of México and Central America. The Royal Botanic Gardens, Kew e Forest Institute, University of Oxford.Oxford, EUA. 151 p.

Favela Lara, S. (2010). Variación poblacional de la especie endémica *Pinus culminicola* detectada por rapd. *Polibotánica*, 30, 55-67.

Freeman, B., Roehrdanz, P. R., & Peterson, A. T., (2019). Modelado de distribuciones de especies de mamíferos en peligro de extinción y conectividad forestal en la selva húmeda de las tierras bajas de la Alta Guinea de África Occidental. *Biodiversity and Conservation*, 28, 671-685. doi:10.1007/s10531-018-01684-6

García, A., A. & González E., S. (1991). Flora y vegetación de la cima del Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana*, 13, 53-74. doi:10.1111/j.1526-100X.2005.00012.x

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

Gernandt, D.S., & Pérez de la Rosa J. A. (2014). Biodiversidad de *Pinophyta* (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85:126-133. doi:10.7550/rmb.32195.

Gómez- Mendoza L. & Arriaga L. (2007). Modelando el Efecto del Cambio Climático sobre la Distribución de Especies de Encino y Pino de México. *Society of Conservartion Biology*, 21(6):1545-1555. doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00814

Gutiérrez, E. y I. Trejo. 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

James E. Eckenwalder: Conifers of the World. The Complete Reference. Timber Press, Portland, OR/London 2009, ISBN 978-0-88192-974-4, S. 443–444.

Kumar, S. & Stohlgren, T. J. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ*, 1(14), 94-98. doi:10.1016/j.gecco.2017.02.004

Manzanilla Quiñones, U. (2017). *Pinus culminicola*: un pino mexicano raro, en peligro de extinción y único en el mundo. Desde el Herbario CICY, 9-12.

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamalle, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521804. doi: 10.21829/myb.2019.2521804

Mateo, R. G., Á. M. Felicísimo y J. Muñoz. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 217-240.

Musalem, M.A., Lomas-Barrié, C. T. y Mendoza, M. (2008). Ficha técnica de *Pinus culminicola*. En: Musalem, M.A. (compilador). Fichas de 27 especies de coníferas incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2001. INIFAP-CIRCE-CEVAMEX. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto No. DK003. México, D.F.

Pérez, M., R., Moreno, F., González, A., & Arreola, V. (2013). Escenarios de la distribución potencial de *Pinus patula* Schltld. et Cham. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. Con modelos de cambio climático en el estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 73-86. doi:10.29298/rmcf.v4i15.449

Perry, Jesse P. (1991). The pines of Mexico and Central America. Portland, OR: Timber Press. Outstanding treatment, with sections on geologic history, natural history, taxonomy, present status, and rare/endangered species.

Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49). Princeton University Press. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/j.ctt7stnh>

Phillips, S. J., R. P. Anderson & Schapire, R., E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.

Ramos-Suárez, Y., Mendizábal-Hernández, L., Rebolledo-Camacho, V. (2003). Variación en semillas de cinco poblaciones de *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa. *Foresta Veracruzana*, 5(2), 35-40.

Romeu, E. (1995). Los pinos mexicanos, récord mundial de biodiversidad. CONABIO. *Biodiversitas*, 2, 11-15.

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

SEMARNAT. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2015, Protección ambiental Especies nativas de México de flora y fauna silvestres Categorías

de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación 21 diciembre, 2015.

Soberón, J. & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10. doi:10.17161/bi.v2i0.4

Villarreal-Quintanilla, J., Á., & Encina-Domínguez, J., A. (2005). Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes. *México Acta Botánica Mexicana*, 70,1-46. doi:org/10.21829/abm70.2005.986

Villaseñor, J., L. (2016). Catálogo de las plantas vasculares nativas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. doi:10.1016/j.rmb.2016.06.017