

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LOS PIÑONEROS (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) EN EL NORESTE DE MÉXICO

**Tesis**

Que presenta JOSÉ YUNIOR HERNÁNDEZ ARIZMENDI

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

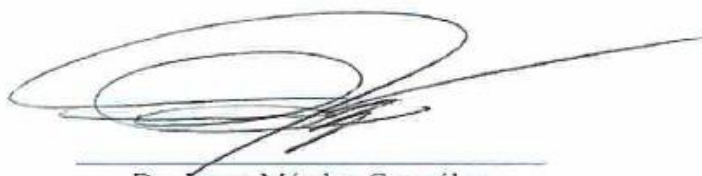
SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2016

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LOS PIÑONEROS (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) EN EL NORESTE DE MÉXICO

Tesis

Elaborada por JOSÉ YUNIOR HERNÁNDEZ ARIZMENDI como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería en Sistemas de Producción con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría




Dr. Jorge Méndez González  
Asesor principal



Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla  
Asesor



Dr. Mario Alberto García Aranda  
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Subdirector de Posgrado

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2016

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios todo poderoso por haberme dado la vida, salud y poder terminar con otro proyecto más en la vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme aceptado y darme la oportunidad de culminar con este proyecto profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante el transcurso de la maestría.

Al comité de asesores por haberme brindado el tiempo y empeño que pusieron para que este trabajo de investigación saliera adelante, por todo el apoyo incondicional brindado muchas gracias a ustedes doctores.

Al Dr. Jorge Méndez González por su apoyo, por sus consejos y por el tiempo que le dedico a este trabajo gracias doctor.

Al Dr. Mario García Aranda por su apoyo incondicional y todo el tiempo que le dedico a este trabajo y por las enseñanzas gracias doctor.

Al Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla por su apoyo con la revisión de la tesis gracias doctor.

## **DEDICATORIAS**

A Dios por haberme guiado por el camino correcto y cuidar de mí hasta el día de hoy.

A mis abuelos y hermanos que ya no están con migo y sé que desde el cielo me cuidan y me guían por la senda correcta a todos ustedes gracias y que en paz descansen (†)

### **A MIS PADRES**

A mis padres por darme la vida, una maravillosa formación, por su ternura y todo su amor y por contagiarme de todas sus fortalezas, ustedes que me enseñaron con todos sus ejemplos el ser un hombre de bien, el ser un luchón en la vida y decidido, el pelear contra toda las adversidades, me enseñan a levantarme después de cada tropiezo, gracias por enseñarme hacer perseverante y paciente aponerme pasos fijos para alcanzar mis metas, a solucionar los problemas con la cabeza fría y verlos como situaciones solucionables y no con dramas. “El hombre debe de aprender de todo en esta vida, menos cosas malas”.

### **A MIS HERMANOS**

Gracias por todos sus consejos, por todo su apoyo incondicional, por ser ejemplos para mí.

Edgar Hernández Arizmendi (†) gracias por tus consejos, gracias por todo tu apoyo, gracias por todo hermano, por ser un ejemplo, por ser mi inspiración, porque cada día que te recuerdo me inspiras a seguir adelante sé que es difícil el no tenerte para poder decirte muchas cosas que no pude decirte, pero sé que desde el cielo me escuchas y me ves y sé también que tengo un ángel que siempre me guiara ese ángel eres tu hermano gracias.

### **A MIS CUÑADOS, CUÑADAS, SOBRINOS Y TÍOS**

Gracias por todo el apoyo incondicional brindado y por los momentos alegres que me han dado a todos ustedes gracias.

### **A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS**

Gracias por todo el apoyo incondicional brindado y por estar juntos en las buenas y en las malas. A ti Nora, Saory y Daylin gracias por todo su apoyo, cariño y amor gracias por enseñarme hacer alguien especial gracias por todo su ternura y de una u otra forma ustedes también fueron parte fundamental en este largo camino que apenas comencé.

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIAS .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCION .....	1
Objetivos .....	3
Hipótesis de trabajo.....	3
REVISION DE LITERATURA.....	4
Modelos de distribución de especies (MDE) .....	4
Aplicación de los modelos de distribución de especie (MDE) .....	4
Descripción y uso de MaxEnt .....	5
Información requerida para operar MaxEnt .....	5
Análisis estadístico MaxEnt .....	6
Prueba de Jackknife.....	6
Descripción general de las especies estudiadas .....	7
Trabajos afines .....	8
MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
Descripción físico climático del área de estudio.....	12
Integración de bases de datos (registros geográficos de las tres especies) .....	12
Obtención y edición de cubiertas SIG de variables ambientales .....	12
Modelación de distribución potencial de las especies con MaxEnt .....	14
Cálculo de superficie del hábitat potencial para las especies <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> en el noreste de México .....	15
Análisis espacial de hábitat potencial de las especies en relación al uso del suelo y vegetación .....	15
RESULTADOS .....	16

Modelación de las especies con MaxEnt .....	16
Contribución de las variables ambientales en la modelación.....	17
Análisis de la superficie de hábitat potencial de las especies estudiadas.....	24
Distribución de superficie potencial en relación a los tipos de vegetación y uso del suelo 2013.....	25
DISCUSIÓN .....	27
CONCLUSIÓN .....	29
REFERENCIAS.....	30

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Listado de variables ambientales climáticas BIOCLIM y topográficas utilizadas para la modelación MaxEnt de la distribución potencial de <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> en el Noreste de México .....	13
<b>Tabla 2.</b> Concentrado de los resultados de la prueba AUC de MaxEnt para <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> en el Noreste de México .....	16
<b>Tabla 3.</b> Porcentajes de contribución de variables ambientales en la modelación MaxEnt de distribución potencial de <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> en el Noreste de México .....	18
<b>Tabla 4.</b> Datos de superficie por decil del modelo de hábitat potencial de <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> los deciles últimos y penúltimos son considerados como la zona de hábitat más probable .....	24
<b>Tabla 5.</b> Valores de superficie de tipos de vegetación y uso del suelo dentro de la zona calculada como hábitat potencial para <i>P. cembroides</i> , <i>P. nelsonii</i> y <i>P. culminicola</i> en el Noreste de México .....	26

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Histogramas de frecuencia de las tres principales variables ambientales del modelo de distribución para <i>P. cembroides</i> .....	19
<b>Figura 2.</b> Histogramas de frecuencia de las principales variables ambientales del modelo de distribución para <i>P. nelsonii</i> .....	19
<b>Figura 3.</b> Histogramas de frecuencia de las principales variables ambientales del modelo de distribución para <i>P. culminicola</i> .....	20
<b>Figura 4.</b> Mapa del modelo de distribución potencial de <i>P. cembroides</i> basado en variables Bioclim y topográficas.....	21
<b>Figura 5.</b> Mapa del modelo de distribución potencial de <i>P. nelsonii</i> basado en variables Bioclim y Topografía, .....	22
<b>Figura 6.</b> Mapa del modelo de distribución potencial de <i>P. culminicola</i> basado en variables Bioclim y Topografía,.....	23



**RESUMEN**

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LOS PIÑONEROS (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) EN EL NORESTE DE MÉXICO

POR

JOSÉ YUNIOR HERNÁNDEZ ARIZMENDI

MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ –ASESOR–

SALTILLO, COAHUILA,

DICIEMBRE 2016

## RESUMEN

Se generan modelos de distribución potencial de los piñoneros del Noreste de México *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola*. Se compararon los modelos generados de dos grupos de variables ambientales, uno basado en 19 variables bioclimáticas Worldclim y otro usando éstas mismas variables y tres variables topográficas (altitud, pendiente y exposición), con el propósito de establecer el más preciso. Se determinó y calculó vía SIG la superficie del hábitat potencial además de un análisis espacial de los tipos de vegetación y uso de suelo presentes en éstas áreas y se presentan los mapas de distribución potencial de los modelos de las tres especies. Las pruebas Jackknife establecen los porcentajes de participación de las variables; en la generación del modelo de *P. cembroides* las principales fueron la temperatura media del cuarto anual más seco con media de 12.4 °C, con 26.9 % y temperatura máxima del mes más cálido media de 28.15 °C y 11.6 %. Para *P. nelsonii* fue la temperatura mínima del cuarto anual más frío, media de 4.6 °C y 23.7 %, la altitud con media de 2,474 m y el 21.2 % y para el modelo de *P. culminicola* fue la altitud con una media de 3,249 m y el 44.4 % seguida por la temperatura media del cuarto anual más frío con un valor medio de 6.17 °C y 24.01 % de aportación al modelo. La superficie de hábitat potencial calculada de las especies fue de 3,880 km<sup>2</sup> para *P. cembroides*, 219.66 km<sup>2</sup> y para *P. culminicola* de 104.3 km<sup>2</sup>. Los principales tipos de vegetación presentes dentro del área de hábitat potencial para *P. cembroides* fueron bosque de pino, matorral desértico rosetófilo y vegetación secundaria de bosque de pino; para *P. nelsonii* matorral desértico rosetófilo, bosque de pino y matorral submontano y en el hábitat de *P. culminicola* fueron la vegetación secundaria de bosque de pino y la vegetación secundaria de bosques de ayarín. El propósito de este estudio fue obtener modelos de distribución potencial para las especies estudiadas más si se encuentran bajo estatus de protección y amenazadas, y así aportar información para planes de conservación y restauración.

Palabras clave: MaxEnt, distribución, piñoneros, noreste México.

**ABSTRACT**

POTENTIAL DISTRIBUTION OF PINYON PINES (*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw and *Pinus culminicola* Andresen & Beaman) IN THE NORTHEAST OF MEXICO

BY

JOSÉ YUNIOR HERNÁNDEZ ARIZMENDI

MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING OF PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ –ADVISOR–

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2016

## ABSTRACT

Potential distribution models are generated from Northeast Mexico pinyon pines *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* and *Pinus culminicola*. In order to establish the most accurate model, two environmental sets of variables were tested, the first using the Worldclim 19 bioclimatic variables, the other dataset was using the same bioclimatic variables and three topographical (elevation, slope and aspect). Surface of the potential habitat of the tree species was calculated using GIS processes, and maps of potential distribution are presented. Jackknife tests establishes the percent of variable contributions in each model, for *P. cembroides* was the mean temperature of driest quarter with average of 12.4°C with 26.9%, the maximal temperature of warmest month with an average of 28.15°C and 11.6%; For *P. nelsonii* was the minimal temperature of coldest month with 4.6°C and 23.7%, the elevation with average of 2,474 m and 21.2%; and for *P. culminicola* the elevation with an average of 3,249 m and 44.4%, the mean temperature of coldest quarter with 6.17°C and 24.01% of variable contributions. The potential habitat surface calculated for the species was of 3,880 km<sup>2</sup> for *P. cembroides*, 219.66 km<sup>2</sup> for *P. nelsonii* and 104.32 km<sup>2</sup> for *P. culminicola*. The main vegetation types present for *P. cembroides* potential habitat were pine forest, rosetophyllus desert shrubland and secondary vegetation of pine forest; for *P. nelsonii* are rosetophyllus desert shrubland, pine forest and submontane scrubland, and for the *P. culminicola* habitat was the secondary vegetation of pine forest and secondary vegetation of spruce-fir forest.

Key words: MaxEnt, distribution, pinyon pines, northeast Mexico.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de distribución de especies han ido evolucionando, el primero que se creó se basó en un programa sencillo como el BIOCLIM (Nix y Busby, 1986), éste modelo utiliza solamente variables climáticas y puede detectar condiciones ambientales adecuadas para las especies; estos programas continúan desarrollándose y surgen los modelos de regresión logística y lineal tales como (GLM) (Austin y Smith, 1990). Debido a las problemáticas de cambio climático, deforestación y la pérdida de biodiversidad que se presentan a ritmo acelerado, surge la necesidad de implementar nuevas herramientas para la modelación de hábitat de especies aun sin evaluar o de aquellas que sufren por los efectos de ésta dinámica de cambio que ayuden a evaluar y contrarrestar estos cambios, de esta forma BIOCLIM, GLM y otros modelos como GARP (Genetic Algorithm for rule-set Prediction) y GAP (Groups Algorithms Programming) fueron llevados a la inteligencia artificial (Stockwell y Noble, 1992; Scott, 1993; Stockwell, 1999). Con la combinación en el uso de estos modelos y el desarrollo de los sistemas de información geográfica surgen nuevos métodos para la modelación tales como MaxEnt, un procedimiento de modelación de nicho ecológico usado para producir modelos de distribución potencial de especies, los cuales requieren de insumos como variables ambientales en formato geográfico y bases de datos de registro (coordenadas) de presencia la especie, en un algoritmo que estima el nicho climático (Guisan y Zimmermann, 2000; Graham *et al.*, 2004).

En la actualidad existen aproximadamente 15 métodos y estos son de acceso libre (Martínez, 2010). Podrán existir diversos métodos pero el más conocido y utilizado para la modelación de la distribución potencial de las especies es MaxEnt (Peterson *et al.*, 2006) el cual es un programa computacional que se basa en la máxima entropía (lo más uniforme posible) y sistemas de información geográfica para predecir la distribución geográfica de las especies (Phillips *et al.*, 2006). MaxEnt se ha aplicado en diversos campos tales como: en la ecología (Guisan *et al.*, 2006; Rosas, 2009; Valdés *et al.*, 2012), conservación de la biodiversidad (Contreras *et al.*, 2010; García *et al.*, 2012; Ávila *et al.*, 2014), así como para estudios en algunas especies en categoría de riesgo de extinción, amenazadas o restringidas (Kumar y Stohlgren, 2009; Aguirre y

Duivenvoorden, 2010), también ha sido utilizado en estudios para la evaluación del impacto del cambio global sobre la distribución de los organismos (Lawler *et al.*, 2009), así como también en estudios de fauna silvestre y en diversas especies de mamíferos (Ortíz *et al.*, 2012; De la torre y Torres-Knoop, 2014).

*Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman, son especies de pino piñonero muy adaptadas al clima y topografía presentes en la Sierra Madre Oriental, de éstas *P. cembroides* es una especie de amplia distribución en México y representa una fuente de generación de recursos económicos para los pobladores locales. *P. nelsonii* y *P. culminicola* son de distribución restringida (Perry, 1991; Martínez, 1992; Farjon, 1997; Estrada *et al.*, 2014) y están bajo estatus de protección y amenazadas según la Norma Ecológica Mexicana 059. El propósito de ésta investigación fue obtener modelos de distribución potencial de éstas especies de piñonero (*P. cembroides*, *P. nelsonii*, y *P. culminicola*) para evaluar las regiones modeladas y el uso de suelo que tienen, detectar y evaluar también la influencia de las variables ambientales (climáticas y topográficas) en la generación de los modelos haciendo una comparación de dos juegos de variables, uno con las 19 bioclimáticas propuestas en el Panel de Cambio Climático (WorldClim.org), y el segundo usando estas mismas variables y tres de tipo topográfico (elevación, pendiente y exposición), con énfasis en la porción Noreste de Sierra Madre Oriental de México (Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas), utilizando el modelo de máxima entropía o MaxEnt , con el propósito de aportar información biogeográfica que sea de utilidad en planes de conservación y restauración.

## OBJETIVOS

### General

El objetivo general es conocer la distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc, *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman del noreste de México utilizando el modelo de máxima entropía o MaxEnt.

### Específicos

- Elaboración de mapas de hábitat potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola*.
- Encontrar superficies potenciales para la distribución de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola*.
- Encontrar las variables climáticas y topográficas más influyentes en la modelación con MaxEnt.
- Hacer un cálculo de superficie potencial para las tres especies de pinos estudiadas.
- Conocer los tipos de vegetación predominantes en el modelo de cada especie y su superficie.

## HIPÓTESIS

Es posible predecir el área de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc, *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus culminicola* Andresen & Beaman del noreste de México modelados en MaxEnt considerando variables climáticas, topográficas y registros de presencia de las especies estudiadas.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Modelos de distribución de especies (MDE)**

Son modelos predictivos aplicados a la descripción y explicación de la distribución geográfica de las especies, llamados expresamente modelos de distribución de especies (MDE) con propiedades métricas y topológicas, así como no espaciales (atributivas) donde la propiedad representada es la idoneidad de cada lugar para que una especie pueda estar presente (Mateo *et al.*, 2012).

Un modelo de distribución de especies es básicamente una caracterización de las condiciones ambientales adecuadas para estas especies, que ayuda identificar donde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requisitos adecuados para las especies en estudio (Pearson *et al.*, 2007).

### **Aplicación de los modelos de distribución de especie (MDE)**

La aplicación de los modelos de distribución de especies, surge como una iniciativa de conservación de sitios degradados y de aquellos compuestos por especies raras o de poco estudio, la falta de información es un factor limitante para generar programas a gran escala, y como consecuencia las iniciativas propuestas en muchos casos tienen un éxito limitado, son una herramienta empírica, robusta, repetible y fácil de utilizar, que pueden ayudar a identificar zonas potenciales a conservar y/o restaurar (Phillips *et al.*, 2006; Phillips y Dudik, 2008).

Los modelos de distribución de especies y su valor en materia de conservación está basado en que 1) indica sitios potenciales donde se necesitan hacer exploraciones directas, 2) marcan lineamientos para determinar el comportamiento de las especies frente a alteraciones exógenas, principalmente antrópicas y 3) entrega información sobre sitios a conservar (Hernández *et al.*, 2008).

Existen aproximadamente entre 15 y 16 modelos de este tipo que utilizan distintos métodos y datos para desarrollar las predicciones y son de acceso libre (Martínez, 2010). Dentro de estos modelos se encuentra el programa (software) MaxEnt (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>), un programa multiuso basado en una



aproximación estadística llamada máxima entropía que permite hacer predicciones (Phillips *et al.*, 2006).

### **Descripción y uso de MaxEnt**

Es un programa que modela la distribución geográfica de las especies, utiliza datos de presencia y variables bioclimáticas asociadas a cada uno de los puntos de presencia. Para modelar las distribuciones se basa en el principio de Máxima entropía, es decir, que es la más extendida, o más cercana a ser uniforme, es un algoritmo cuya teoría esta sumamente bien entendida (Phillips y Dudik, 2008; Elith *et al.*, 2011).

MaxEnt se ha utilizado en diversos campos tales como en la conservación y restauración de la ecología (Guisan *et al.*, 2006; Rosas, 2009; Valdés *et al.*, 2012) la utilización de MaxEnt y con el apoyo de las herramientas de sistemas de información geográficas dan como resultados mapas de distribución potencial de las especies, lo que resulta esencial para encontrar sitios potenciales y evaluar el estado de conservación de las especies (Contreras *et al.*, 2010; García *et al.*, 2012; Ávila *et al.*, 2014; Meza *et al.*, 2014), así como para estudios en algunas especies en categoría de riesgo de extinción, amenazadas o restringidas (Kumar y Stohlgren, 2009; Aguirre y Duivenvoorden, 2010), también ha sido utilizado en estudios para la evaluación del impacto del cambio global sobre la distribución de los organismos (Lawler *et al.*, 2009), así como también en estudios de fauna silvestre y en diversas especies de mamíferos (Ortíz *et al.*, 2012; De la torre y Torres-Knoop, 2014).

### **Información requerida para operar MaxEnt**

Primero hay que saber dónde está la especie y donde prefiere vivir, que requisitos son para la supervivencia es decir su nicho ecológico (Hutchinson, 1957).

Para que el modelo opere se requiere de información ambiental (cubiertas ambientales), datos de registro de presencia de la especie (coordenadas) e información topográficas (elevación, pendiente etc.) y un algoritmo para estimar el nicho ecológico. Para el modelado distribución de las especies, las localidades de ocurrencia de las especies sirven como los puntos de muestra, la región geográfica de interés es el espacio en el que

se define esta distribución, y las características son las variables ambientales (o funciones del mismo) (Phillips *et al.*, 2006).

### **Análisis estadístico MaxEnt**

En las modelaciones del presente estudio, en relación a las pruebas de estadísticas y de validación, se le indicó al programa seleccionar de manera aleatoria y separar un porcentaje de los registros de la muestra para poder usarlos en pruebas de análisis estadísticos simples, esto hace que el programa utilice un umbral donde realice una predicción binaria, mostrando como resultados las condiciones adecuadas por arriba del umbral y las condiciones inadecuadas por debajo del mismo.

El resultado del análisis es una cubierta geográfica con valores probabilísticos de 0 a 1 de nicho o hábitat potencial donde la tendencia al valor de 0 implica pixeles que no representan hábitat y los valores más cercanos al valor de 1 se consideran como la mayor probabilidad de presencia o potencialidad de presencia de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

En el gráfico de la curva operadora por el receptor y área bajo la curva la línea de entrenamiento y la de prueba serán idénticas si se usa el mismo porcentaje para las pruebas. La línea (entrenamiento) muestra el “ajuste” del modelo a los datos de entrenamiento y es la auténtica prueba de la capacidad que tienen los modelos de predecir (Phillips *et al.*, 2006). Si la línea (prueba) se ubica por debajo de la línea de los predichos, entonces esto indicaría que el modelo se desempeña peor de lo que lo haría un modelo aleatorio. Mientras más cerca se encuentre la línea de prueba al tope superior izquierdo del umbral, mejor será el modelo para predecir las presencias contenidas en la muestra de prueba de los datos. Para obtener información más detallada sobre las estadísticas relacionadas con las AUC, se puede consultar a Fielding & Bell (2007).

### **Prueba de Jackknife**

Esta prueba esta implementada internamente en MaxEnt de forma opcional y es utilizada para determinar las variables ambientales que contribuyen en mayor medida al modelo, el programa asigna el incremento en la ganancia a las variables ambientales de las cuales depende dicha característica, haciendo una conversión a porcentajes al final del proceso

de entrenamiento. Para realizar este procedimiento se selecciona en la casilla Do Jackknife to measure variable important” (“Hacer un jackknife para medir la importancia de la variable”) en la casilla de verificación de MaxEnt.

### **Descripción general de las especies estudiadas**

*P. cembroides*. Árbol de 5 a 15 m de alto, tiene una amplia distribución que abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México (Perry, 1991). En México se localiza en el centro y norte del territorio, donde la precipitación media anual oscila de 350 a 750 mm, en laderas de cerros y lomeríos, pendientes secas y rocosas, al pie de las montañas en climas templado seco hasta templado subhúmedo pueden soportar hasta siete y ocho meses de sequía entre 7 °C hasta 40 °C. Es una especie típica de suelos pobres, secos, pedregosos o calizos (Rzedowski & Huerta, 1978; Rzedowski, 2006).

*P. nelsonii*. Árbol pequeño de tronco recto de 5 a 10 m de alto, algunas veces con ramas desde abajo, ramas casi erectas o extendidas, se distribuye principalmente hacia el noreste de México en estribaciones y mesas semiáridas de la Sierra Madre Oriental, por encima de la vegetación desértica y por debajo o apenas dentro del "cinturón de pinos piñoneros", con *P. cembroides*, principalmente en afloramientos de piedra caliza con suelos poco profundos, en altitudes de 1600-2300 hasta 2450 m (Farjon *et al.*, 1997).

*P. culminicola*. Árbol que presenta una altura que oscila entre 1 a 5 metros, ramas numerosas frecuente mente extendidas conformando copas bajas y densa, las hojas se agrupan en fascículos de cinco, sus conos son pequeños de tres a cinco cm de longitud, a diferencia de los otros piñoneros este especie se le reconoce por soporte bajo y es conocido como pino enano, su distribución es restringida, por lo que se encuentra solamente en el Cerro del Potosí cerca de los 3500 msnm perteneciente a la Sierra Madre Oriental, los suelos donde se desarrolla son rocosos de grava y caliza (Perry, 1991).

### Trabajos afines

Pearson *et al.* (2007) elaboraron predicciones basadas en 20 capas de datos del medio ambiente y se generaron utilizando dos enfoques de modelado. Un método basado en el principio de máxima entropía (Maxent) y un algoritmo genético (GARP) con especies de geckos (*Uroplatus* spp.), se encontraron altas tasas de éxito y significación estadística en las pruebas jackknife con tamaños de muestra de tan solo cinco años cuando se aplicó el modelo de Maxent, resultados para GARP en tamaños de muestra muy bajas (menos del c. 10) fueron menos buenos.

Kumar y Stohlgren (2009) realizaron una modelación con MaxEnt para predecir el hábitat adecuado de la planta *Canacomyrica monticola*, especie amenazada y en peligro de extinción en Nueva Caledonia, usando un pequeño número de datos de ocurrencias (11). El modelo de MaxEnt tuvo 91% de éxito (es decir, una tasa de omisión baja) y fue estadísticamente significativa, encontraron que parece ser muy prometedor en la predicción de un hábitat adecuado para las especies amenazadas y en peligro de extinción con pequeños registros de ejemplo y puede ser una herramienta eficaz para la planificación de la conservación de la biodiversidad, la supervisión y la gestión.

Rosas (2009) utilizó el programa Bioclim para generar modelos de distribución eco geográfica de las especies de *Pinus*, a partir de registros de colectas (latitud y longitud) en función de valores mínimos y máximos de 19 variables climáticas. Los modelos que se generaron indicaron una amplia afinidad climática a las condiciones existentes del área de estudio, en donde *Pinus hartwegii* registró mayores altitudes y temperaturas más bajas, *Pinus cembroides* presento los registros más bajos de precipitación, mientras que *Pinus maximinoi* y *Pinus oocarpa* se asocian con temperaturas y precipitaciones más altas.

Torres *et al.* (2010) utilizaron modelos predictivos de distribución mediante técnicas de modelado de la distribución potencial y utilizando el software MaxEnt, en este trabajo se estudió el conjunto de variables climático-ambientales más importantes en la predicción de la distribución actual de especies animales como *Catagonus wagneri*, *Pediolagus salinicola*, *Priodontes maximus* y *Tolyteutes matacus*. Entre los distintos modelos desarrollados para el estudio de la geonomía de las especies, Maxent ha demostrado ser

una herramienta robusta para modelar sólo con datos de presencia, mejorando el desempeño de numerosas técnicas tradicionales.

Aguirre y Duivenvoorden (2010) utilizaron MaxEnt para modelar la distribución de 56 especies de *Pinus* en México, con el objetivo de investigar si las especies de *Pinus* clasificados por IUCN como amenazadas tienen una representación adecuada en las áreas protegidas de México, encontraron que casi el 70 % tiene menos del 10 % de su distribución modelada protegida. Las especies de *Pinus* clasificadas como amenazadas tienen una distribución más estrecha ocurren a menores elevaciones y están menos representadas en las áreas protegidas en comparación con las otras especies. Los autores concluyen que la red actual de áreas protegidas no protege adecuadamente el género *Pinus* y que los esfuerzos de conservación deben estar dirigidos a especies con distribución reducida y de desarrollo a bajas altitudes.

García *et al.* (2012) utilizaron MaxEnt para predecir la distribución potencial de *Taxus globosa* en México, mediante la comparación de dos modelos las 19 capas Bioclim por un lado y las mismas cubiertas más información de topografía. El primer modelo resultó tener el mejor porcentaje de precisión global en el percentil de probabilidad (0.8–0.9) y el segundo en el percentil (0.9–1.0) de presencia de hábitat potencial para *Taxus globosa* en México. El segundo modelo resultó ser más preciso con el 55 % en la prueba de validación la variable de pendiente es de mayor influencia en el modelado de hábitat potencial, seguida por Bio14 (precipitación del mes más seco).

Zutta *et al.* (2012) desarrollaron y analizaron modelos de distribución de dos especies *Polylepis sericea* y *P. besseri*, que forman bosques extensos a lo largo de los Andes. Este estudio utilizó el programa MaxEnt, el clima y capas ambientales de una resolución de 1 Km., para ambas especies, los metros de elevación y la temperatura son los factores más importantes para la distribución prevista. El perfeccionamiento del modelo de *Polylepis* y otras especies andinas utilizando datos de satélites cada vez más disponibles al público demuestran el potencial para ayudar a definir las áreas de diversidad y mejorar las estrategias de conservación.

Leal *et al.* (2012) elaboraron un modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii* en la cuenca de Cuitzeo, utilizando información ambiental y datos de presencia de la especie, lo que requirió identificar los factores ambientales que determinan el nicho

fundamental de *P. martinezii* y elaborar un perfil bioclimático de la especie. Los resultados de este estudio proporcionan información valiosa para la ejecución de posteriores estrategias de restauración que incluyan actividades de conservación y reforestación; tomando en cuenta diversos factores ambientales que determinan la aptitud del territorio para la especie.

Valdés *et al.* (2012) utilizaron el programa Bioclim para el modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal en un estudio de cuatro especies de *Pinus*, y generar patrones de distribución potencial con el uso de las 19 variables climáticas y a partir de éstas destacar las de mayor influencia para la distribución de las especies. En *Pinus devoniana* los valores mínimos y máximos de temperatura y precipitación fueron respectivamente de 9.7-23.8 °C y de 400 a 2071 mm. Para *Pinus durangensis* de 8.8-22.8 °C y de 412 a 1270 mm, para *Pinus pseudostrobus* fueron de 6-23.3 °C y de 400 a 2279 mm y para *Pinus arizonica* de 8.7-18.8 °C y de 280 a 1236 mm.

Bonaccorso & Guerrero (2012) generaron mapas de distribución potencial para especies de ave el Corcovado Frenticolorado *Odontophorus erythrops* a través de un modelo de nicho ecológico, para el análisis de pérdida de hábitat, interceptaron el mapa de distribución potencial con un mapa de cobertura y uso de suelo que resumía los tipos de hábitat en el rango de distribución de la especie. Para el análisis del efecto del cambio climático proyectaron el modelo de nicho ecológico a un escenario de cambio climático para el año 2050 los análisis revelaron que las amenazas potenciales para la conservación de la especie no tienen las mismas magnitudes a lo largo de su rango de distribución.

Palmas *et al.* (2013) modelaron y analizaron la distribución actual de especies de la familia Marcgraviaceae en México. Realizaron una revisión de 221 colecciones en 15 herbarios nacionales y 9 extranjeros, el modelado de la distribución se realizó mediante Maxent, utilizando 19 variables ambientales y las coordenadas geográficas de los ejemplares revisados. Las especies encontradas fueron: *Marcgravia brownei*, *M. mexicana*, *M. nepenthoides*, *M. stonei*, *Ruyschia enervia*, *Souroubea exauriculata* y *S. loczyi* subsp. *loczyi*, además del primer registro de *M. pittieri* para México.

Meza *et al.* (2014) estimaron la distribución potencial (*Ferocactus histrix*, *Mammillaria bombycina* y *M. perezdelarosae*), mediante la técnica de modelado de nicho ecológico

MaxEnt. El estudio aporta una actualización al conocimiento de la distribución y proporciona nuevos elementos para conocer la condición de conservación de estas especies en Aguascalientes y para buscar estrategias de reintroducción y conservación a partir de los mapas de distribución potencial de *F. histrix*, *M. bombycina* y *M. perezdelarosae* para el estado obtenidos mediante el modelado de nicho ecológico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Descripción físico climática del área de estudio**

El presente estudio se desarrolló en el noreste de México, con una extensión de 296,000 km<sup>2</sup> pertenecientes a los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas, gran parte de estas zonas presentan climas secos, semisecos, cálido subhúmedo y climas templados subhúmedos en las partes altas pertenecientes a la sierra, la precipitación media anual es de 400 a 780 mm, se presentan lluvias en verano en los meses de junio – septiembre (INEGI, 2009).

### **Integración de bases de datos (registros geográficos de las tres especies)**

La principal fuente de registros de presencia de las especies fue obtenida de la Red Mundial de Información sobre la Biodiversidad REMIB, CONABIO, ([http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib\\_esp.html](http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html)); en ésta plataforma se descargaron los registros de presencia de las especies seleccionadas (coordinadas geográficas) de las cuales se encontraron 208 registros para *P. cembroides*, 67 registros de *P. nelsonii* y 89 para *P. culminicola*.

### **Obtención y edición de cubiertas SIG de variables ambientales**

En el sitio web de WorldClim (<http://www.worldclim.org/bioclim>) se consultaron y se obtuvieron cubiertas geográficas de 19 variables ambientales denominadas Bioclim (Cuadro 1). Éstas representan las tendencias anuales de temperatura y precipitación producidas de un conjunto mundial de datos de estaciones de clima entre los años de 1950 y 2000 (Hijmans *et al.*, 2005) son cubiertas SIG de tipo raster en formato grid genérico compuestas por píxeles con resolución de 30 segundos de arco (~1 km) de cobertura mundial, por lo que primeramente se les hizo un recorte que cubre la región noreste de México, transformándolas a un formato grid ASCII. También desde la página web WorldClim se consultó y extrajo la cubierta SIG global de Altitud, la cual fue recortada bajo los mismos límites que las variables anteriores, se usó directamente para derivar por modelación SIG 3D una cubierta de pendiente (grados) y una de exposición



(grados), teniendo así un juego de tres variables adicionales de carácter topográfico también en formato grid ASCII.

Tabla 1. Listado de variables ambientales climáticas BIOCLIM y topográficas utilizadas para la modelación MaxEnt de la distribución potencial de *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el Noreste de México.

Variables	Descripción y unidades
Bio01	Temperatura media anual (°C)
Bio02	Intervalo medio diurno (temp.max-temp.min)
Bio03	Isotermalidad (Bio02/Bio07) (*100)
Bio04	Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)
Bio05	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio07	Intervalo de temperatura anual (Bio05-Bio06)
Bio08	Temperatura media del ¼ anual más húmedo (°C)
Bio09	Temperatura media del ¼ anual más seco (°C)
Bio10	Temperatura media del ¼ más cálido (°C)
Bio11	Temperatura media del ¼ más frío (°C)
Bio12	Precipitación anual (mm)
Bio13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio15	Temporalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio16	Precipitación del ¼ anual más húmedo (mm)
Bio17	Precipitación del ¼ anual más seco (mm)
Bio18	Precipitación del ¼ anual más cálido (mm)
Bio19	Precipitación del ¼ anual más frío (mm)
Altitud	Elevación sobre el nivel medio del mar (msnm)
Exposición	Dirección de facetas de pendiente (0-360 grados)
Pendiente	Grados de inclinación del terreno (%)

Modificado de: Worldclim (Hijmans *et al.*, 2005)

### **Modelación de distribución potencial de las especies con MaxEnt**

Para conocer cuál sería el mejor procedimiento de modelación, las tres especies fueron modeladas bajo dos escenarios distintos, el primero utilizando un juego de 19 variables bioclimáticas y el segundo escenario se modeló considerando las 19 variables bioclimáticas más tres variables topográficas. En el proceso de modelación, y bajo indicaciones directas al software MaxEnt, éste programa establece una serie de pruebas de cálculo de precisión a través de un análisis de omisión y comisión, una prueba de sensibilidad gráfica de Área Bajo la Curva (ROC) y pruebas de Jackknife que analizan el comportamiento de cada variable de manera independiente para determinar su peso y grado de participación en la creación del modelo. El resultado de la modelación es una cubierta geográfica con valores probabilísticos de 0 a 1 de nicho o hábitat potencial donde la tendencia al valor de 0 implica pixeles que no representan hábitat y los valores más cercanos al valor de 1 se consideran como la mayor probabilidad de presencia o potencialidad de presencia de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

*Pinus cembroides* se modeló usando 208 registros, de los cuales el programa usó el 50% pruebas de entrenamiento y el otro 50% en pruebas directas de modelación. *Pinus nelsonii* se modeló con 67 registros de los cuales el programa usó el 50% pruebas de entrenamiento y el otro 50% en pruebas directas de modelación y *Pinus culminicola* se corrió con 89 registros de presencia de la especie.

Los valores generados de AUC (Área Bajo la Curva) de ambos escenarios fueron comparados entre sí para determinar los mejores modelos por especie, considerando los valores más altos como los de un mejor modelo.

Los resultados de las pruebas de Jackknife sirvieron para establecer el porcentaje de participación de cada variable en los modelos, para las variables que aportaron el mayor porcentaje de participación se hizo posteriormente un análisis de distribución de los valores directos de éstas variables en los registros de las bases de datos para establecer límites de tolerancia por especie.

### **Cálculo de superficie del hábitat potencial para las especies *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el noreste de México**

Para los mejores modelos de cada especie, se establecieron intervalos en deciles de los valores de probabilidad (0.0 - 1.0) de presencia de la especie, para determinar la superficie aproximada de hábitat potencial considerando los últimos intervalos generados, para *P. cembroides* (0.7 – 0.8 y 0.8 -0.85), *P. nelsonii* (0.7 – 0.75) y *P. culminicola* (0.6 – 0.7) como los que definen el área de hábitat potencial. Una vez determinadas estas áreas fueron transformadas del formato raster a formato vectorial (polígonos) para hacer un cálculo de superficie.

### **Análisis espacial de hábitat potencial de las especies en relación al uso del suelo y vegetación**

Las cubiertas SIG del modelo de cada especie fueron intersectadas usando SIG (Intersect ArcGis) con la cubierta Uso del Suelo y Vegetación de la Serie V (INEGI, 2012) para establecer los principales tipos de vegetación y uso del suelo que se presentan en las zonas de hábitat potencial, reportando los valores de cada tipo de cobertura en kilómetros cuadrados.

## RESULTADOS

### Modelación de las especies con MaxEnt

La Tabla 2 muestra la comparación de valores resultantes de AUC (Área Bajo la Curva) entre los dos escenarios planteados con juegos de variables utilizadas en la modelación de MaxEnt para las especies *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el noreste de México, donde se establece que para *P. cembroides* el escenario Bioclim incluyendo variables topográficas presenta valores AUC mayores en el set de datos de entrenamiento y de prueba con 0.991 y 0.998; asimismo en el caso de *P. nelsonii* el escenario donde solo se utilizaron las 19 variables Bioclim y las topográficas fue el mejor con valores AUC de 0.999 y 0.999 para puntos de entrenamiento y de prueba respectivamente, presentándose el mismo resultado para *P. culminicola* con valores AUC de 0.999 y 0.999.

Tabla 2. Concentrado de los resultados de la prueba AUC de MaxEnt para *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el Noreste de México.

	<i>P. cembroides</i>		<i>P. nelsonii</i>		<i>P. culminicola</i>	
	Bioclim	Bioclim + topografía	Bioclim	Bioclim + topografía	Bioclim	Bioclim + topografía
AUC entrena miento	0.975	0.991	0.999	0.999	0.999	0.999
AUC Prueba	0.971	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999

Estimaciones de software generadas con base a la ecuación dos (DeLong & Clarke-Pearson, 1988).

### **Contribución de las variables ambientales en la modelación**

En el modelo desarrollado para *P. cembroides*, las variables de mayor aportación fueron: la temperatura media del cuarto anual más seco (*mín.* = 8.2, *máx.* = 18.7, *media* = 12.41) con 26.9 % seguido por la temperatura máxima del mes más cálido (*mín.* = 21.1, *máx.* = 36.7, *media* = 28.15) con 11.6 %, variables que indican una adaptación de la especie a ambientes de temperaturas templadas con veranos cálidos, una característica en bosques de piñonero de las zonas de altiplano, la pendiente (*mín.* = 0.3, *máx.* = 22.3, *media* = 7.4) tuvo un 10.1% de participación y es indicadora de preferencias por terrenos con pendiente, seguida por la precipitación del cuarto anual más húmedo (*mín.* = 111, *máx.* = 671, *media* = 232.1) con 8.8 %, variable indicadora de preferencia por lugares con lluvias de mediana intensidad en alguna temporada del año, el resto de otras 18 variables no pasan de un siete por ciento de aportación o menor (Tabla 3 y Figura 1).

Tabla 3. Porcentajes de contribución de variables ambientales en la modelación MaxEnt de distribución potencial de *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el Noreste de México.

Variables	Descripción	<i>P. cembroides</i> <i>P. nelsonii</i> <i>P. culminicola</i>		
		Contribución (%)		
Bio01	Temperatura media anual	0.7		
Bio02	Intervalo medio diurno	0.9		
Bio03	Isotermalidad	0.1	0.6	
Bio04	Temporalidad de la temperatura	3.5	9.1	4.1
Bio05	Temperatura máxima del mes más cálido	11.6		
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío	2.1	23.7	
Bio07	Intervalo de temperatura anual	4.5		
Bio08	Temperatura media del ¼ anual más húmedo			
Bio09	Temperatura media del ¼ anual más seco	26.9	0.2	0.1
Bio10	Temperatura media del ¼ anual más cálido			0.1
Bio11	Temperatura media del ¼ anual más frío		12.9	24.4
Bio12	Precipitación anual	5.5	0.2	0.4
Bio13	Precipitación del mes más húmedo			0.5
Bio14	Precipitación del mes más seco	4.1	9.7	7.8
Bio15	Temporalidad de la precipitación	7		
Bio16	Precipitación del ¼ anual más húmedo	8.8	3.9	0.2
Bio17	Precipitación del ¼ anual más seco	6	2.3	
Bio18	Precipitación del ¼ anual más cálido	0.2	0.8	
Bio19	Precipitación del ¼ anual más frío	2	0.2	
Alt	Altitud	5.9	21.2	44.4
Exp	Exposición	0.2	0.1	
Pnd	Pendiente	10.1	15	18.3

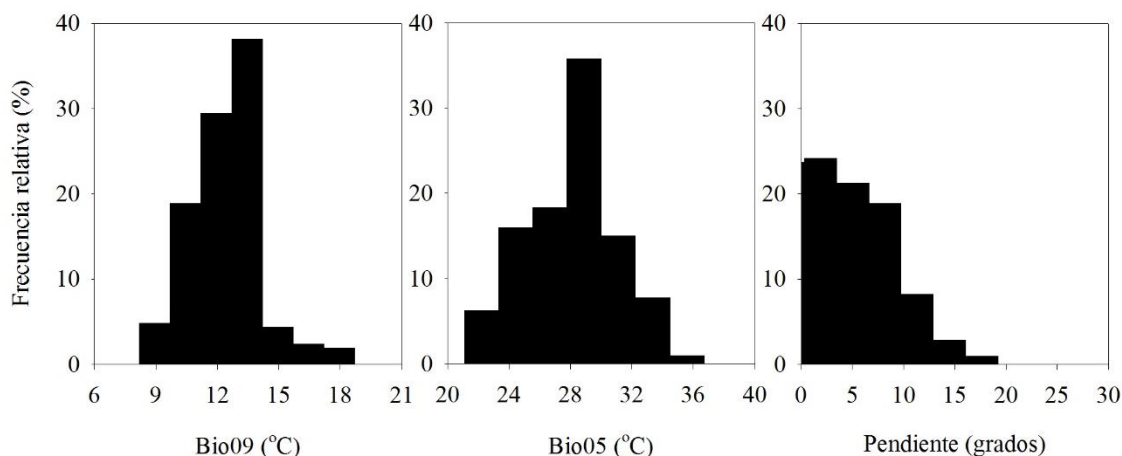


Figura 1. Histogramas de frecuencia de las tres principales variables ambientales del modelo de distribución para *P. cembroides*.

En la modelación de *P. nelsonii* la variable temperatura mínima del cuarto anual más frío (*mín.* = 2.8, *máx.* = 7.2, *media* = 4.6, *desv. est.* = 0.74) tuvo una participación del 23.7% seguida por la altitud (*mín.* = 1,070 m, *máx.* = 2,474 m, *media* = 1,888.8 m, *desv. est.* = 249.67) con un 21.2 % y la pendiente (*mín.* = 2.2, *máx.* = 15.9, *media* = 7.5, *desv. Est.* = 0.004) con el 15.0 % y la temperatura media del cuarto anual más frío (*mín.* = 10.8, *máx.* = 15.3, *media* = 13.4, *desv. est.* = 0.1) con el 12.9 %, grupo de variables que podrían indicar una preferencia a clima más templado que *P. cembroides*, y con determinadas características topográficas, las diez variables restantes no sobrepasan el 10 % de participación en la modelación o menor, (cuadro 3 y figura 2).

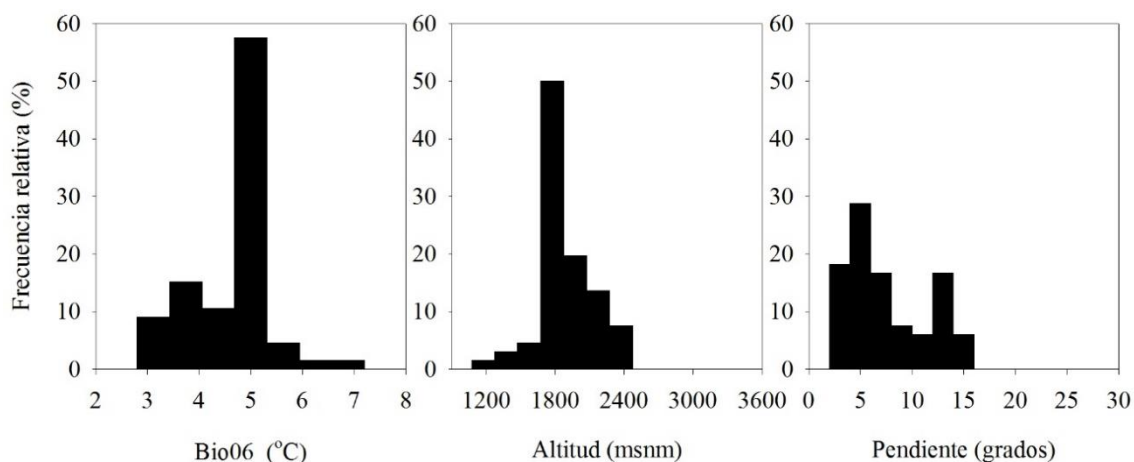


Figura 2. Histogramas de frecuencia de las principales variables ambientales del modelo de distribución para *P. nelsonii*.

En relación con el modelo generado para *P. culminicola*, la variable de altitud (*mín.*= 2,232 m, *máx.*= 3,575 m, *media*= 3,249 m, *desv. est.*= 294.96) tiene una participación de 44.4 %, un resultado esperado dada la ubicación muy definida de sus individuos, por arriba de los 3,000 msnm, se observó en el modelo que la temperatura media del cuarto anual más frío (*mín.*= 4.7, *máx.*= 10.5, *media*= 6.17, *desv. est.*= 1.23) tuvo un 24.1 % de participación, seguido por la pendiente (*mín.*= 2.7, *máx.*= 26.1, *media*= 15.0) con el 18.3 %, siete variables más presentan una contribución menor al 8 %, (tabla 3 y figura 3).

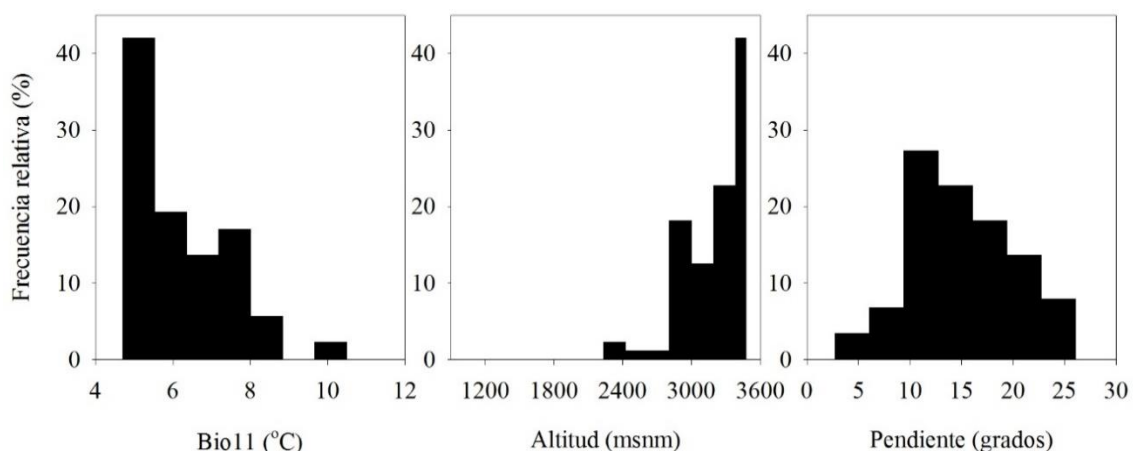


Figura 3. Histogramas de frecuencia de las principales variables ambientales del modelo de distribución para *P. culminicola*.

En la figura 4 se muestra el resultado de la modelación MaxEnt para *P. cembroides*, mostrando una distribución amplia principalmente concentrada en las porciones de la Sierra Madre Oriental al sur de Nuevo León, Sureste de Coahuila con posible presencia en las sierras aisladas al centro del estado, en Tamaulipas principalmente en la colindancia con Nuevo León en la porción del altiplano suroeste del estado, en Tamaulipas principalmente en la colindancia con Nuevo León en la porción del altiplano suroeste del estado. El modelo corrobora la amplia distribución conocida y reportada por diversos autores (Perry, 1991; Martínez, 1992; Farjon, 1997; Estrada *et al.*, 2014).



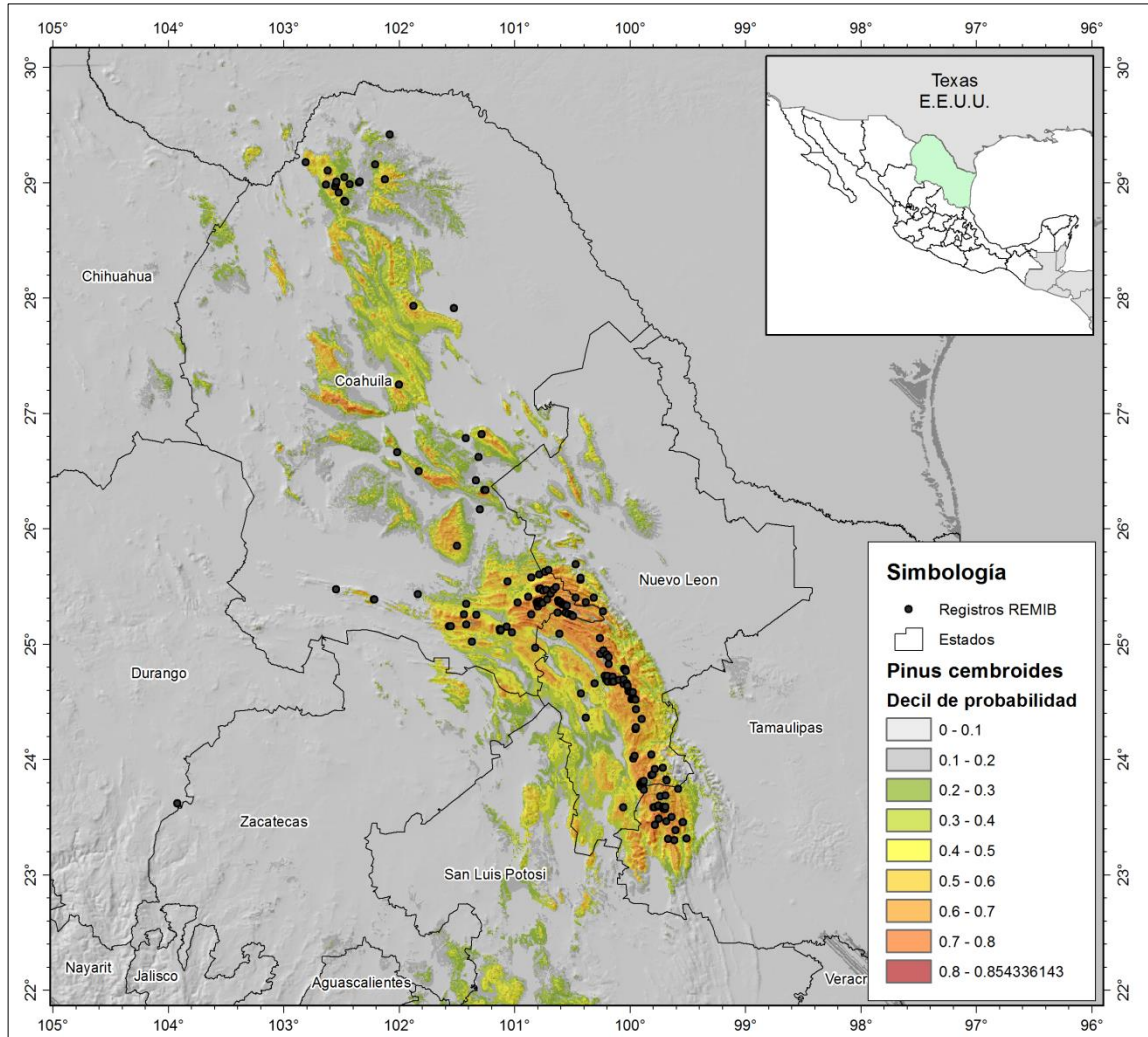


Figura 4. Mapa del modelo de distribución potencial de *P. cembroides* basado en variables Bioclim y topográficas, los últimos dos intervalos son considerados como la zona con mejor probabilidad de presencia de la especie (0.7 - 0.8 y 0.8 a 0.85).

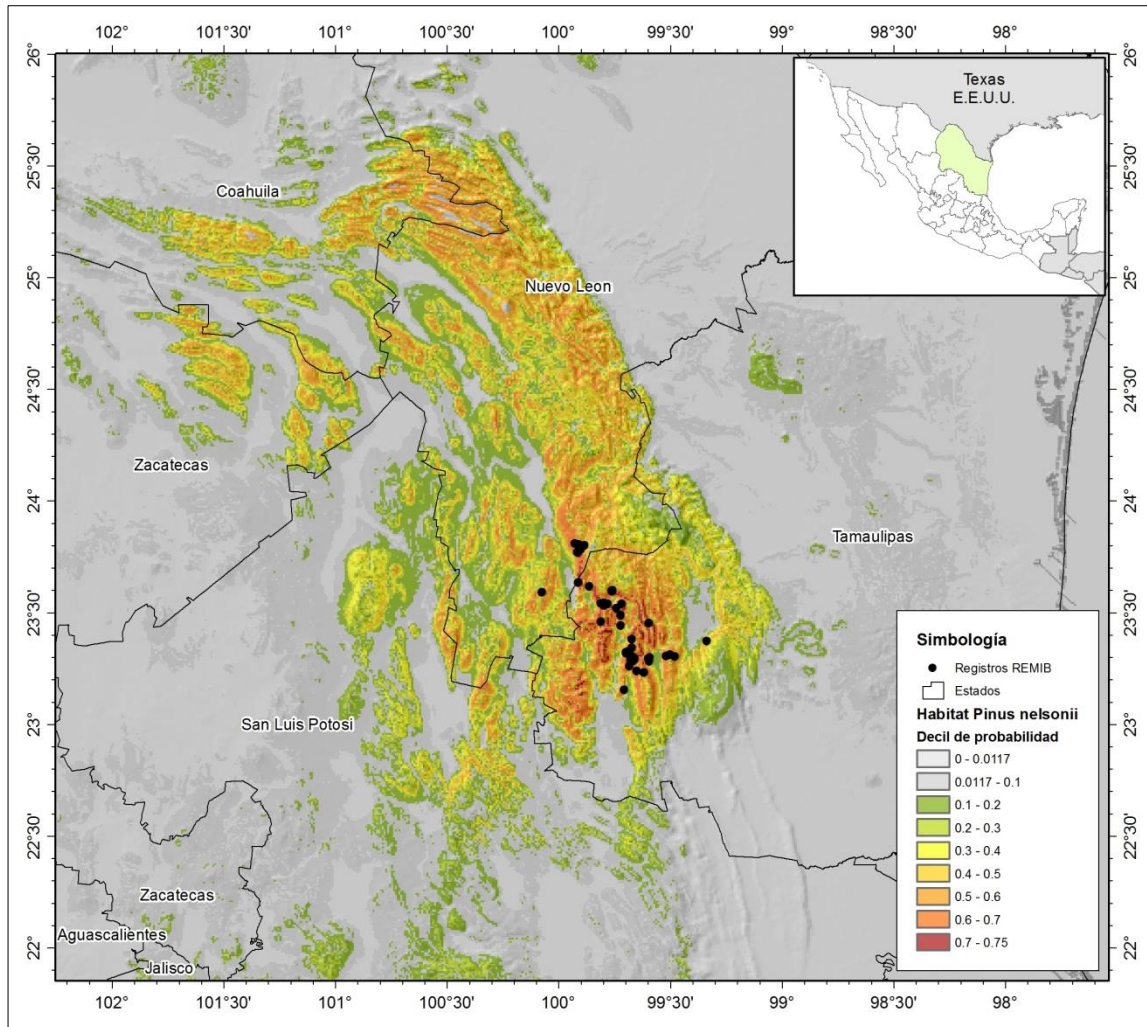


Figura 5. Mapa del modelo de distribución potencial de *P. nelsonii* basado en 19 variables Bioclim y Topografía, el último intervalo es considerado como la zona con mayor probabilidad de presencia de la especie (0.7 a 0.75).

La Figura cinco muestra la modelación de *P. nelsonii*, los valores de mayor probabilidad (0.7 - 0.75) se concentran en la zona suroeste de Tamaulipas entre los municipios de Miquihuana, Bustamante y Jaumave Palmillas, Tula además de Dr. Arroyo y Zaragoza en Nuevo León, se distribuye en las partes bajas de la sierra de San Antonio Peña Nevada en zonas de ecotono entre los bosques templados altos y los matorrales áridos colindantes con el altiplano desértico (Perry, 1991; Styles, 1997; Estrada *et al.*, 2014).

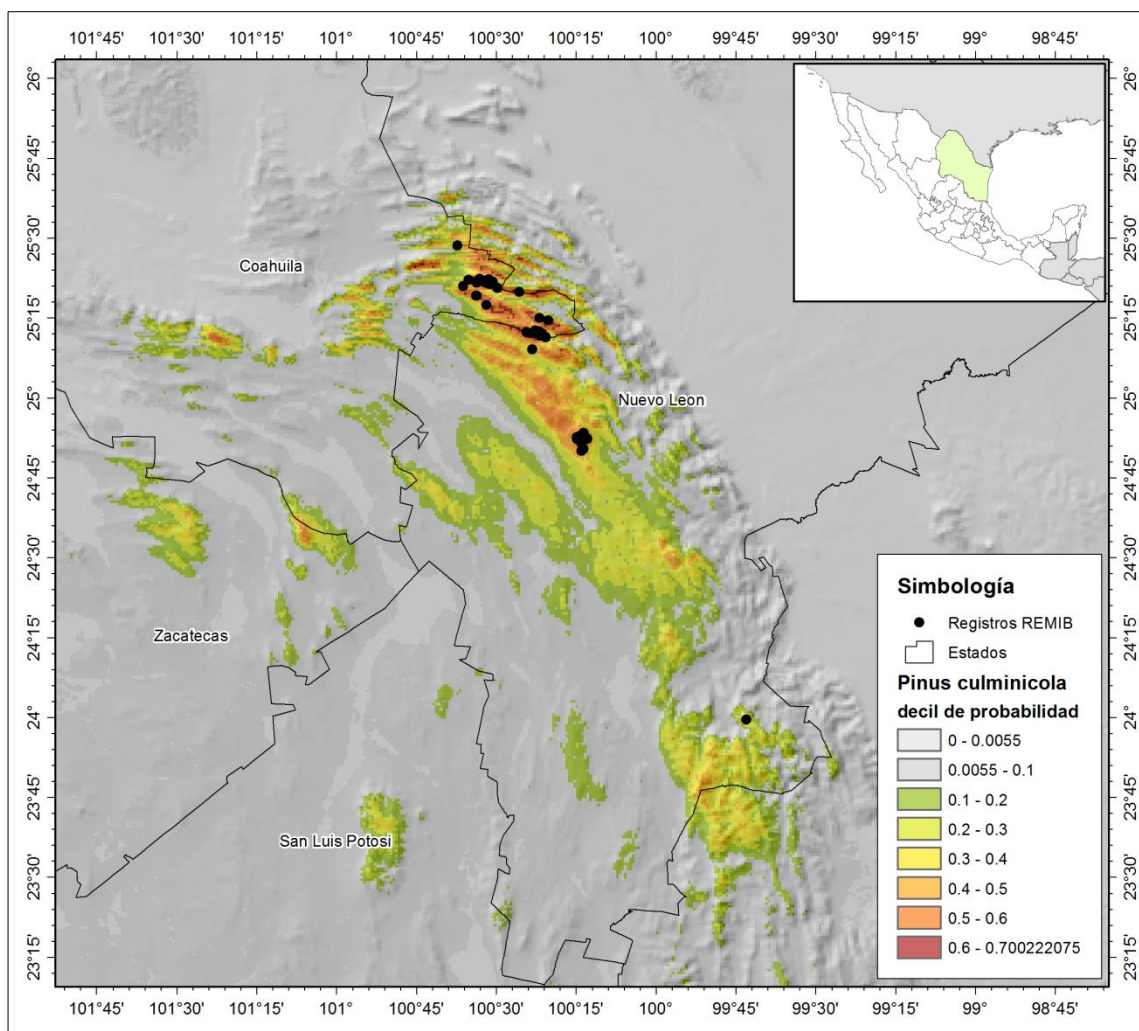


Figura 6. Mapa del modelo de distribución potencial de *P. culminicola* basado en 19 variables Bioclim y Topografía, el último intervalo es considerado como la zona con mayor probabilidad de presencia de la especie (0.6 a 0.7).

El resultado de la modelación para *P. culminicola* se muestra en la Figura 6, donde el decil de 0.7 - 0.75 de probabilidad nos indica la mejor condición potencial para la especie, estas zonas están establecidas, principalmente en Galeana Nuevo León, en el Cerro el Potosí, también se indica como hábitat potencial la cima de un grupo de cordilleras la sierra entre los límites de Coahuila y Nuevo León, como La Viga, La Martha, Potrero Abrego, El Coahuilón y San Antonio, sitios con una elevación dentro de la distribución conocida de la especie (Perry, 1991; Styles, 1997; Estrada *et al.*, 2014).

### Análisis de la superficie de hábitat potencial de las especies estudiadas

De acuerdo con el modelo generado para *P. cembroides*, la superficie óptima del Noreste de México se establece entre las 5,168 y 388,066 ha según la superficie que cubren los últimos dos deciles de probabilidad del modelo (tabla 4), esta superficie representa entre el 0.01 y el 1.31 % de la superficie de los tres estados del Noreste de México. El modelo para *P. nelsonii* marca como superficie en el Noreste 21,965 ha de hábitat potencial para la especie, en el decil 0.8 - 0.85, que representa el 0.07 % de la superficie total analizada en los tres estados (tabla 4). De las tres especies modeladas, *P. culminicola* es el que menos superficie potencial tiene con 10,431 ha (tabla 4), el 0.04% de la superficie de los tres estados del Noreste, aun así consideramos es una sobreestimación debido a que en el pasado, los incendios forestales históricos de la región mermaron de manera significativa la superficie original, de manera que se desconoce una cifra precisa, en 1998 la superficie de *P. culminicola* en el Cerro El Potosí se redujo un 40% reportándose únicamente 30 ha, (Estrada *et al.*, 2014), del tal forma que las 10 mil hectáreas calculadas en la modelación deben interpretarse como zonas con el bioclima y la topografía óptimas para su posible distribución o futuros estudios de repoblación.

Tabla 4. Datos de superficie por decil del modelo de hábitat potencial de *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* los deciles últimos y penúltimos son considerados como la zona de hábitat más probable.

<i>P. cembroides</i>		<i>P. nelsonii</i>		<i>P. culminicola</i>	
Decil	km2	Decil	km2	Decil	km2
0.0 - 0.01	214,744.12	0.0 - 0.0117	205,006.29	0.0 - 0.0055	244,311.95
0.1 - 0.2	23,375.13	0.0117 - 0.1	55,838.84	0.0055 - 0.1	41,540.18
0.2 - 0.3	13,402.00	0.1 - 0.2	11,031.23	0.1 - 0.2	4,691.57
0.3 - 0.4	12,881.44	0.2 - 0.3	5,533.94	0.2 - 0.3	2,753.31
0.4 - 0.5	10,325.95	0.3 - 0.4	5,018.98	0.3 - 0.4	1,289.22
0.5 - 0.6	8,946.70	0.4 - 0.5	5,886.53	0.4 - 0.5	797.59
0.6 - 0.7	8,418.35	0.5 - 0.6	5,546.82	0.5 - 0.6	485.8
0.7 - 0.8	3,828.99	0.6 - 0.7	1,891.69	0.6 - 0.7002	104.32
0.8 - 0.85433	51.69	0.7 - 0.75	219.66		
Sup. Noreste	295,974.37		295,973.99		295,973.93

### **Distribución de superficie potencial en relación a los tipos de vegetación y uso del suelo 2013**

Sumarizando los últimos dos deciles de probabilidad de cada especie, el principal tipo de vegetación presente dentro de la superficie modelada de hábitat potencial de *P. cembroides* es el bosque de pino natural 2,070 km<sup>2</sup> (30.16 %) seguido por el matorral desértico rosetófilo 1,568.98 km<sup>2</sup> (22.86 %), le sigue una condición secundaria del mismo Bosque de Pino 1,533 km<sup>2</sup> (22.34 %), zonas de agricultura de temporal anual 303 km<sup>2</sup> (4.42 %) el resto de los tipos de vegetación y usos de suelo no son mayores a 250 km<sup>2</sup> siendo en conjunto el 20 % de la superficie total del hábitat potencial de *P. cembroides*, (tabla 5), forma masas puras que corresponden la comunidad de bosque, también se asocia a matorrales xerófilos, rosetófilo, pastizales, isotales y otras especies de coníferas y encinos.

El modelo de hábitat potencial para *P. nelsonii* marca como potencial el decil con valores 0.7 - 0.75, dentro de la cual la comunidad de Matorral desértico rosetófilo tiene una mayor superficie de 88 km<sup>2</sup> (40 %), seguida por el bosque de pino 26.3 km<sup>2</sup> (11.97 %), el matorral submontano 25.82 km<sup>2</sup> (11.76 %), y la vegetación secundaria de bosque de pino 20.6 km<sup>2</sup> (9.38 %); el resto de las comunidades y usos de suelo no sobrepasan los 15 km<sup>2</sup> y conforman el restante 26.8 % de la superficie del hábitat de *P. nelsonii* en el Noreste de México, ver Tabla 5.

El modelo generado para *P. culminicola* se establece en el decil de probabilidad de 0.6 - 0.7, dentro de esta superficie se distribuye en primer lugar las comunidades secundarias de bosque de pino 53.59 km<sup>2</sup> (51.37 %), y de bosques de ayarín 17.78 km<sup>2</sup> (17.05 %), un área con pastizal inducido 8.7 km<sup>2</sup> (8.34 %), bosque de ayarín 6.99 km<sup>2</sup> (6.7 %), bosque de pino 5.72 km<sup>2</sup> (5.49 %) y oyamel 5.39 km<sup>2</sup> (5.17 %) entre otras, ver Tabla 5.

Tabla 5. Valores de superficie de tipos de vegetación y uso del suelo dentro de la zona calculada como hábitat potencial para *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* en el Noreste de México.

Clase de vegetación o uso de suelo	<i>P. cembroides</i>	<i>P. nelsonii</i>	<i>P. culminicola</i>
	Decil 0.5 - 0.6 y 0.6 - 0.7 (km <sup>2</sup> )	Decil 0.7 - 0.75 (km <sup>2</sup> )	Decil 0.6 - 0.7 (km <sup>2</sup> )
Bosque de pino	2,070.21	26.3	5.72
Matorral desértico rosetófilo	1,568.98	88.04	0.35
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	1,533.16	20.6	53.59
Agricultura de temporal anual	303.56	5.66	
Bosque de pino-encino	243.18	9.31	0.79
Matorral submontano	172.17	25.82	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	152.63	14.18	
Bosque de encino-pino	138.56	13.42	
Bosque de encino	131.93	0.01	
Chaparral	79.45		
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de ayarín	78.89		17.78
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	68.63	0.18	1.92
Pastizal inducido	51.76	1.1	8.7
Bosque de ayarín	45.72		6.99
Matorral desértico micrófilo	39.59	0.87	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	28.6		
Bosque de táscate	27.27	9.74	
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo	19.26		0.03
Agricultura de temporal anual y permanente	18.72		
Pastizal gipsófilo	17.2		
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano	16.25	3.79	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel	15.45		2.39
Agricultura de temporal permanente	11.23		
Agricultura de riego anual	7.51		
Agricultura de riego permanente	6.8		
Bosque de oyamel	5.82		5.39
Pastizal natural	5.3		
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	2.99		
Zona urbana	1.17	0.52	
Asentamientos humanos	0.66		
Mezquital xerófilo	0.62	0.11	
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	0.33		
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	0.28		
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de mezquite	0.07		
Sin vegetación aparente	0.04		
Pastizal cultivado	0.02		
Agricultura de riego anual y semipermanente	0		
Superficie total del modelo	6,864.03	219.65	104.32

## DISCUSIÓN

Aguirre y Duivenvoorden (2010) estudiando estas mismas especies pero con otro fin, obtuvieron valores AUC de 0.895, 0.933 y 0.990 para *P. cembroides* var. *Cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola* respectivamente, valores altos también variando a los de éste estudio por el uso de diferentes cubiertas ambientales, de menor resolución y del uso de una fuente de registros diferente (BRAHMS). Las principales variables predictoras (Bio09 y Bio05) en *P. cembroides* indican una adaptación de la especie a ambientes de temperaturas templadas con veranos cálidos, característica de bosques de piñonero de las zonas de altiplano (Perry, 1991; Farjon & Styles, 1992). En otros estudios de modelación (Rosas, 2008) se ha observado que *P. cembroides* se distribuye en regiones con baja precipitación y altas temperaturas, indicando preferencia extrema (temperatura media entre 15 y 24 °C y precipitación de hasta 40 mm). Passini (1982) reporta que la distribución de *P. cembroides* en la SMO se ubica entre 250 y 400 mm de precipitación anual y de 17 a 20 °C de temperatura anual. El modelo generado en este estudio al igual que el de Aguirre y Duivenvoorden (2010) corrobora la amplia distribución de *P. cembroides* conocida y reportada por diversos autores (Martínez, 1992; Perry, 1991; Farjon, 1997; Estrada *et al.*, 2014).

En descripciones de la especie se reporta que *P. nelsonii* se distribuye entre 1,600 y 2,300 msnm, en zonas con precipitación anual entre 300 y 600 mm, y se le ubica en pies de montaña de ambientes áridos a semiáridos (Styles, 1991; Farjon, 1992); descripción de *P. culminicola* indica se distribuye de los 3,000 a los 3,700 m, bajo condiciones de vientos fuertes y una exposición a bajas temperaturas que reduce su temporada de crecimiento anual (Styles, 1991; Farjon, 1992). Lo encontrado aquí y lo reportado por Aguirre y Duivenvoorden (2010), demuestra que *P. nelsonii*, pero sobre todo *P. culminicola* siguen siendo de distribución restringida no obstante existen regiones donde no se registran, pero existe hábitat potencial que debería ser considerado para promover su conservación ya que se encuentran en estatus de protección y amenazadas según la NOM 059.

De la misma forma Estrada et al. (2014) corroboraron que *P. cembroides* se distribuye en zonas asociadas al altiplano del país, documentando que es una especie asociada con ocho comunidades vegetales y otros usos de suelo. La vegetación asociada a *P. nelsonii* es característica de zonas con tendencias desérticas por la cercanía con la meseta del altiplano, Estrada et al. (2014), lo ubican distribuido en ecotonos entre matorrales, chaparrales de encino y bosques de *P. cembroides* var. *cembroides*. Las comunidades asociadas a *P. culminicola* son propias de terrenos elevados de montaña y se observa que hay una representación importante de condiciones secundarias, muy posiblemente por los incendios recurrentes en la parte alta de las montañas desde Galeana Nuevo León hasta el sureste de Coahuila.

En este al igual que en otros estudios se observa que la variables que mejor predicen la distribución potencial del genero *Pinus* sobre todo de especies de distribución amplia se relacionan con temperaturas altas (Cruz et al., 2002), sin embargo para especies que poseen distribución restringida, la altitud predomina sobre temperatura, no obstante esto parece ser específico ya que en especies de *Abies* la altitud y exposición predominan sobre las temperaturas (Martínez et al., 2016). De la misma forma, las variaciones en el ajuste del modelo, así como de la distribución potencial de la especie es dependiente del tipo de variables bioclimáticas, escala, número de registros de especies (Aguirre y Duivenvoorden, 2010; Martínez et al., 2016).



## CONCLUSIONES

Con las variables bioclimáticas, topográficas y datos de registro de presencia de las especies estudiadas, MaxEnt puede predecir con un análisis aceptable superficies potenciales de los piñoneros (*P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. culminicola*), en este sentido, bioclim mas topografía modela más adecuadamente la distribución potencial. Se confirma la amplia distribución de *P. cembroides* en trece tipos de comunidades vegetales. Por el contrario, la distribución potencial de *P. nelsonii* se enmarca en la región suroeste de Tamaulipas y sur de Nuevo León *P. culminicola* se limita a zonas de elevación por arriba de los 3,000 msnm, en picos aislados de la SMO. Este estudio aporta información suficiente de las áreas importantes para planificar acciones para promover la recuperación de sus poblaciones.

## REFERENCIAS

- Ávila Coria, R., Villavicencio García, R. & Ruiz Corral, J. A. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 92-109.
- Austin, M. P. & Smith, T. M. (1990). A new model for the continuum concept. In *Progress in theoretical vegetation science* (pp. 35-47). Springer Netherlands.
- Aguirre Gutiérrez, J. & Duivenvoorden, J. F. (2010). ¿Podemos proteger especies en riesgo en áreas protegidas? un estudio de caso del genero *Pinus* en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 875-882.
- Bonaccorso, E. & Guerrero, P. A. (2012). Efecto del cambio climático y el deterioro del hábitat en la distribución del corvocado frenticolorado: implicaciones para su conservación. Efecto del cambio climático y el deterioro del hábitat en la distribución del corvocado frenticolorado: implicaciones para su conservación. *Ciencia America*, 1(1), 19-28.
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I. & Ríos-Muñoz, C. A. (2010). Distribución de *taxus globosa* (*Taxaceae*) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83 (3), 421-433.
- Cuenca, A., Escalante, A. E. & Piñero, D. (2003). Long-distance colonization, isolation by distance, and historical demography in a relictual Mexican pinyon pine (*Pinus nelsonii* Shaw) as revealed by paternally inherited genetic markers (cpSSRs). *Molecular Ecology*, 12(8), 2087-2097.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) *Pinus cembroides* Zucc. (1832). — PINACEAE —Flora (Jena) 15(2) Beibl.: 93. 1832. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/54-pinac11m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/54-pinac11m.pdf).
- DeLong, E. R., DeLong, D. M. & Clarke-Pearson, D. L. (1988). Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves: a nonparametric approach. *Biometrics*, 44(3), 837-845.
- De la torre, J. A. & Torres-Knoop, I. (2014). Distribución potencial del puma (puma concolor) en el estado de aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Mastozoología (nueva época)*, 4(2), 45-56.
- Estrada, E., Villarreal, J., 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. México. 144 p.

- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Fielding, A. H. & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental conservation*, 24(01), 38-49.
- Farjon, A. & Styles B. (1997). *Pinus* (Pinaceae). Flora Neotropica, Monograph 75. The New York Botanical Garden. 291 p.
- Farjon, A., de la Rosa, J. A. P. & Styles, B. T. (1997). A field guide to the pines of Mexico and Central America. Royal Botanic Gardens. 147 p.
- Farjon, A. (1996). Biodiversity of *Pinus* (Pinaceae) in Mexico: speciation and palaeoendemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 121(4), 365-384.
- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2), 147-186.
- Graham, C. H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C. & Peterson, A. T. (2004). New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(9), 497-503.
- Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N. G., Lehmann, A. & Zimmermann, N. E. (2006). Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20(2), 501-511.
- García-Aranda, M. A., Cantú-Ayala, C., Estrada-Castillón, E., Pando-Moreno, M. & Moreno-Talamantes, A. (2012). Distribución actual y potencial de *taxus globosa* (*taxaceae*) en México. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 6(2), 587-598.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hernández, P. A., Franke, I., Herzog, S. K., Pacheco, V., Paniagua, L., Quintana, H. L., Soto, A., Swenson, J. J., Tovar, C., Valqui, T. H., Vargas, J., Young, B. E. (2008). Predicting species distributions in poorly-studied Landscapes. *Biodivers Conserv.*, 17(6), 1353-1366.
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22(1), 415-427.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2012. Mapa de uso del suelo y vegetación, México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2009. Aspectos generales del Noreste de México.
- Kumar, S. & Stohlgren, T. J. (2009). MaxEnt modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1(4), 094-098.
- Lawler, J. J., Shafer, S. L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E. P., Blaustein, A. R. & Bartlein, P. J. (2009). Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 90(3), 588-597.
- Liras, E. (2008). Funcionamiento, interfaz y formato de los datos en Maxent: réplica del IV taller de modelización de nichos ecológicos (en línea). Almería, ES. Consultado 05 ene. 2013.
- Leal, N O; Mendoza M E; Pérez S D; Geneletti D; López E; Carranza E (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(4), 1152-1170.
- Martínez, M. (1992). Los Pinos Mexicanos. Ediciones Botas. 3a. Ed. México D.F. 361 p.
- Martínez, N. (2010). Apuntes sobre modelación de nichos ecológicos. Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental, del Instituto de Ecología de la UNAM. Russini, G. (s.f.). Dr. Giuseppe MAZZA. Recuperado el 03 de Junio de 2013, de <http://www.photomazza.com>.
- Mateo, G. R., M Felicísimo, Á. & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *REDUCA (Biología)*, 5(1), 137-153.
- Meza, R E; Tafoya F; Cisneros L R; Rodríguez S J J; Pérez M B E (2014). Distribución actual y potencial de las cactáceas *ferocactus histrix*, *mammillaria bombycina* y *m. perez dela rosa* en el estado de Aguascalientes, México. *Acta Botánica Mexicana*, 108(1), 67-80.
- Nix, H. A. & Busby, J. (1986). BIOCLIM, a bioclimatic analysis and prediction system. *Annual report CSIRO. CSIRO Division of Water and Land Resources. Canberra*, 4-10.
- Ortíz-García, A. I., Ramos-Robles, M. I., Pérez-Solano, L. A. & Mandujano, S. (2012). Distribución potencial de los ungulados silvestres en la Reserva de Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Therya*, 3(3), 334-348.
- Passini, MF (1983). Un ejemplo de un bosque tropical seco de México: el bosque de *Pinus cembroides* Zucc. *Boletín de la Sociedad Botánica de Francia. Cartas Botánicas*, 130 (1), 69-80.

- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. & Townsend Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117.
- Peterson, A. R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F. & A Loiselle, B. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231-259.
- Phillips, S. J. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Palmas, P. S., Krome, T., Dressler, S., Arévalo, J. A. (2013). Diversidad y distribución de marcgraviaceae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 170-183.
- Perry, J.P. (1991). The pines of Mexico and Central America. *Oxford Journals Science & Mathematics Forestry*, 65(2), 224-225.
- Rosas Avila, J. C. (2009). *Ecogeografía del genero pinus (linnaeus, 1753) en la subcuena Tecuantepec-Apulco, Mexico* (Doctoral dissertation).
- Rzedowski, J. & Huerta, L. (1978). *Vegetación de México* (Vol. 432). México: Limusa.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México*, 504.
- Stockwell, D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2), 143-158.
- Stockwell, D. R. & Noble, I. R. (1992). Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of data analysis. *Mathematics and Computers in Simulation*, 33(5), 385-390.
- Scott, D. S. (1993). A type-theoretical alternative to Iswim, Cuch, Owhy. *Theoretical Computer Science*, 121(1), 411-440.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 que determina las 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, 2ª sección, 30 de Diciembre de 2010.

- Torres, R. & Jayat, J. P. (2010). Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología neotropical*, 17(2), 335-352.
- Valdés, O. T., Huerta, Y. M. C., Chávez, A. G. T. & Garduño, M. V. G. (2012). Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: Estudio de cuatro especies de Pinus. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 29(95), 1-22.
- Zutta, R B; Phillip W R; Sassan S; Casana D J; Gauthier G P; Soto A; Velazco Y; Buermann W (2012). Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Rev. Peru. Biol*, 19(2): 205-212.