

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA
DISTRIBUCIÓN DE *Pinus montezumae* Y SU
CONSECUENCIA EN LA CAPTACIÓN DE AGUA Y
CO₂ EN EL ESTADO DE TLAXCALA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO

**MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS
DEL AMBIENTE**

PRESENTA:

Karla Viridiana Díaz Castillo

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

**Dr. José Jiménez López
Dr. José Luis Martínez y Pérez**

TUTORES:

**Dra. Maricela Hernández Vázquez
Dr. Hipólito Muñoz Nava**



IXTACUIXTLA, TLAX., OCTUBRE DE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Código: 505-RGE-04
 Publicación: Febrero 2019
 Revisión: 9001:2015 03

KARLA VIRIDIANA DÍAZ CASTILLO
 CANDIDATA A MCSA

PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de titulación ha revisado el trabajo de investigación titulado: "Efecto del cambio climático sobre la distribución de *Pinus montezumae* y su consecuencia en la captación de agua y CO2 en el estado de Tlaxcala", realizado bajo la dirección del Dr. José Jiménez López. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dra. Maricela Hernández Vázquez

Dr. José Jiménez López

Dr. José Luis Martínez y Pérez

Dr. Hipólito Muñoz Nava

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"

Ixtacuixtla, Tlax., 02 de octubre de 2019.

DRA. EDELMIRA GARCÍA NIETO
 COORDINADORA GENERAL DEL CIGyA Y CENTRO DE INVESTIGACIÓN
 EN GENÉTICA Y AMBIENTE
 MAESTRÍA EN CIENCIAS
 EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

c.c.p. Expediente



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo en mis estudios de Maestría.

Al Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA), por su sostén en mi formación académica, por permitirme concluir una etapa más de mi vida.

Al MAR. Adolfo Cuevas Sánchez, Coordinador del Centro de Investigación en Cambio Climático (CICC) de la UATx por permitirme el uso de las instalaciones y el soporte brindado en el transcurso de este proyecto.

A todos los docentes que con su conocimiento, sapiencia y experiencia me han dado las pautas para mi formación profesional.

Al Dr. José Jiménez López y el Dr. José Luis Martínez y Pérez por guiar esta investigación, por sus enseñanzas, aportaciones y apoyo que he recibido para la realización de este proyecto y que han influido en mi desarrollo profesional y personal.

A la Dra. Maricela Hernández Vázquez, el Dr. Hipólito Muñoz Nava y el Dr. Tomás Morales Acoltzi por su colaboración, asesoría, dedicación y sugerencias que ayudaron a enriquecer y mejorar este trabajo.

A mis amigos y compañeros de generación por todos los momentos compartidos dentro y fuera del aula.

DEDICATORIA

A Dios por estar conmigo en cada paso que doy y bendecirme con un logro más en mi vida.

A mi esposo, compañero y amigo Josafath Rojas Sánchez por su apoyo incondicional, consejos, motivación y perseverancia y que hoy juntos culminamos otro objetivo.

A mi hija Tamara Rojas Díaz que es mi motor de vida y la que me impulsa a ser mejor cada día.

A mis padres Dulce María Castillo Pavía y Juan Carlos Díaz Vivaldo que con su esfuerzo, dedicación, paciencia y confianza he formado la persona que soy hoy en día.

A mis hermanas Adriana Paola Díaz Castillo y Dulce Lizeth Díaz Castillo, mis confidentes, por todos los consejos brindados y momentos vividos.

A mi tía María del Rayo Pavía Valencia por su cariño, enseñanzas, bondad y tiempo compartido con mi hija y conmigo.

A María Esther Mendoza Sánchez que fue mi compañera de escuela y se ha convertido en amiga de vida.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
I. INTRODUCCIÓN.....	5
i. Clima	7
ii. Cambio climático	7
iii. Escenarios de cambio climático	8
iv. Modelos de cambio climático.....	8
v. Modelos Climáticos Globales (GCM).....	9
vi. Modelo Comunitario del Sistema Climático (CCSM4)	10
vii. Proyecciones de cambio climático.....	10
viii. Trayectorias de concentración representativas (RCP)	11
ix. Nicho ecológico	11
x. Diagrama BAM (Biótico, Abiótico y Movilidad).....	12
xi. Modelado de Nicho Ecológico (ENM) y Modelado de la Distribución de Especies (SDM)	13
xii. MaxEnt	14
xiii. Máxima entropía.....	15
xiv. Los bosques y el cambio climático	16
xv. Recursos forestales en el estado de Tlaxcala	17
xvi. <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	18
xvii. Servicios ecosistémicos	21
xviii. Secuestro y almacenamiento de carbono	22
xix. Captación de agua de niebla	23

II. ANTECEDENTES.....	24
i. Cambio climático	24
ii. Captación de agua de niebla.....	26
iii. Captación de dióxido de carbono	28
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
IV. JUSTIFICACIÓN.....	30
V. OBJETIVOS.....	32
VI. HIPÓTESIS.....	32
VII. METODOLOGÍA.....	33
i. Área de estudio	33
ii. Registros de presencia.....	34
iii. Variables ambientales	35
iv. Modelo ENM/SDM utilizando el algoritmo de MaxEnt	37
v. Cálculo de servicios ecosistémicos	45
VIII.RESULTADOS	47
i. Determinación de las variables bioclimáticas	47
ii. Generación de los modelos.....	53
A. Escenario base (1960-1990).....	53
B. Escenario RCP 4.5 (2050)	55
C. Escenario RCP 6.0 (2050)	57
D. Escenario RCP 8.5 (2050)	59
E. Escenario RCP 4.5 (2070)	61
F. Escenario RCP 6.0 (2070)	63
G. Escenario RCP 8.5 (2070)	65
iii. Evaluación y validación de los modelos	68

iv. Cálculo de los servicios ecosistémicos.....	72
IX. DISCUSIÓN.....	73
X. CONCLUSIONES.....	77
XI. LITERATURA CITADA	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Modelos Climáticos Globales utilizados en WorldClim v.1.4.	9
Tabla II. Escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración de GEI	11
Tabla III. Variables bioclimáticas	36
Tabla IV. Umbrales para pruebas binomiales para la modelación de distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i>	40
Tabla V. Interpretación para distintos valores de AUC de la curva ROC	43
Tabla VI. Análisis de contribución de las variables ambientales seleccionadas ..	51
Tabla VII. Condiciones ambientales extremas de las variables seleccionadas	67
Tabla VIII. Áreas potenciales para la distribución actual, 2050 y 2070.	67
Tabla IX. Cálculo de los servicios ecosistémicos de <i>Pinus montezumae</i> para el escenario base, futuro cercano y futuro lejano.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de BAM (CONABIO.2008)	12
Figura 2. Localización del área de estudio.	33
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología.....	33
Figura 4 Mapa de presencia de <i>Pinus montezumae</i>	34
Figura 5. La gráfica de omisión y área pronosticada.....	42
Figura 6. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC).	44
Figura 7. Escenario base con todas las variables bioclimáticas.....	47
Figura 8. Correlación de las 19 variables bioclimáticos para el escenario base....	48
Figura 9. Método Jackknife con las 19 variables bioclimáticas para el escenario base.	49
Figura 10. Análisis multivariado MESS de las 19 variables bioclimáticas.	50
Figura 11. Análisis MoD de las 19 variables bioclimáticas.	50
Figura 12. Método Jackknife con las variables bioclimáticas seleccionadas.....	51
Figura 13. Análisis multivariado MESS de las variables bioclimáticas seleccionadas.....	52
Figura 14. Análisis MoD de las variables bioclimáticas seleccionadas.	52
Figura 15. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 1950-2000.	53
Figura 16. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 1950-2000.	54
Figura 17. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 1950-2000.	54
Figura 18. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	55
Figura 19. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	56
Figura 20. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	56
Figura 21. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	57

Figura 22. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	58
Figura 23. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	58
Figura 24. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	59
Figura 25. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	60
Figura 26. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	60
Figura 27. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	61
Figura 28. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	62
Figura 29. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.....	62
Figura 30. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	63
Figura 31. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	64
Figura 32. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0.....	64
Figura 33. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i> para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	65
Figura 34. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	66
Figura 35 . Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.....	66
Figura 36. Gráfica de omisión y área pronosticada para una de las réplicas.	68
Figura 37. Gráfica de omisión y área pronosticada promedio de 30 réplicas.	69

Figura 38. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) para una de las réplicas.....	70
Figura 39. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) promedio de 30 réplicas.....	71

RESUMEN

Pinus montezumae ocupa el tercer lugar en abundancia de los Pinos en el estado de Tlaxcala y de mayor extensión en el Parque Nacional La Malinche entre los estados de Tlaxcala y Puebla. Esta especie presenta gran importancia económica, geográfica y ecológica; aporta varios servicios ecosistémicos incluyendo la captación de dióxido de carbono y la captación de agua de niebla.

Las especies forestales tienen una gran dependencia con la variabilidad del clima y el cambio climático, lo que ha causado que modifiquen sus patrones de distribución geográfica, por lo que en este estudio se utilizarán modelos de cambio climático para conocer su distribución potencial actual y futura, así como su efecto en los servicios ecosistémicos proporcionados por *Pinus montezumae*.

Para ello se utilizaron 408 registros del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala 2014, que se analizaron con cinco parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura obtenidos de WorldClim v1.4, para la climatología base que abarca un período climático de 1960-1990 generados por varias bases de datos climatológicas; y para los periodos histórico, futuro cercano 2050 y futuro lejano 2070 generados por el modelo climático global Comunitario del Sistema Climático (en inglés *The Community Climate System Model CCSM4*) que fue estructurado para tres forzamientos radiativos RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. La distribución potencial de especies para los distintos periodos se realizó a través del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt v3.3.3k).

La captación de agua de niebla se calculó con la densidad de *Pinus montezumae* dada por el Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala 2014, la capacidad de captación de agua de esta especie determinada por Barradas (1983, 2000) y el área potencial óptima obtenida de MaxEnt. La captación de dióxido de carbono se calculó con el contenido de carbono por hectárea de *Pinus montezumae* en el Parque Nacional la Malinche por Castro y Tucker (2009) y el área potencial óptima obtenida de MaxEnt.

El área óptima de la distribución potencial actual de *Pinus montezumae* es de 133 942 hectáreas. Para los escenarios futuros se presenta una reducción de área potencial de un 59% a un 87% en comparación al escenario base. Siendo el escenario RCP 4.5 para el periodo 2050 el que menor reducción de área presentará con un 59% y el escenario RCP8.5 para el periodo 2070 el que mayor reducción de área presentará con un 87% de reducción de área con respecto al escenario base

En la temperatura anual media de cada modelo hubo un aumento de esta variable en un 35% a un 67% en comparación al escenario base y en la precipitación anual hubo un decremento de esta variable de un 0.2% a un 13%.

La disminución de área potencial afecta los servicios ecosistémicos proporcionados por esta especie, por cada hectárea de *Pinus montezumae* perdida independientemente del escenario utilizado, se reduce la captación de agua de niebla en 422 milímetros por hora mientras que la reducción de la captación de dióxido de carbono por hectárea perdida es de 130 Megagramos de carbono.

Palabras clave: *Pinus montezumae*, cambio climático, MaxEnt, área potencial, captación de CO₂, captación de agua de niebla.

ABSTRACT

Pinus montezumae has the third place in abundance of Pines in the state of Tlaxcala and the greater extension in El Parque Nacional la Malinche in the states of Tlaxcala and Puebla. This species has economical, geographical and ecological importance; It provides several ecosystem services including carbon dioxide capture and fog water collection.

Forest species have a great dependence on climate variability and climate change, which has caused them to modify their geographic distribution patterns, so in this study climate change models will be used to know their current and future potential distribution, as well as its effect on the ecosystem services provided by *Pinus montezumae*.

For this, 408 records of the Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala, 2014 were used, which were analyzed with five bioclimatic parameters of precipitation and temperature obtained from WorldClim v1.4, for the base climatology that has a climatic period of 1960-1990 generated by several climatological databases; and for the historical periods, near future 2050 and far future 2070 generated by The Community Climate System Model (CCSM4) that was structured for three radiative forcings RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP 8.5. The potential distribution of species for these different periods was implemented with the Maximum Entropy model (MaxEnt v3.3.3k).

Fog water collection lost was calculated with the density of *Pinus montezumae* given by the Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala 2014, the amount of water collected from fog by this species was determined by Barradas (1983, 2000) and the optimum potential area was obtained from MaxEnt. Carbon dioxide uptake was calculated with the carbon content per hectare of *Pinus montezumae* in El Parque Nacional la Malinche by Castro and Tucker (2009) and the optimum potential area obtained from MaxEnt.

The optimal area of the current potential distribution of *Pinus montezumae* is 133 942 hectares. For future scenarios, a reduction of the potential area is observed from 59% to 87% compared to the baseline scenario. The RCP 4.5 scenario for the 2050 period will present the smallest area of reduction with 59% and the RCP8.5 scenario for the 2070 period will present the smallest area of reduction with an 87% with respect to the baseline scenario

In the average annual temperature of each model was an increase of this variable from 35% to 67% compared to the baseline scenario and in the annual precipitation was a decrease of this variable from 0.2% to 13%.

The decrease in potential area affects the ecosystem services provided by this species, for each hectare of *Pinus montezumae* lost regardless of the scenario used, the collection of fog water is reduced by 422 millimeters per hour while the reduction of carbon dioxide is 130 Megagrams.

Keywords: *Pinus montezumae*, climate change, MaxEnt, potential área, fog water collection, carbon capture.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático lo define la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como el cambio atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992). Algunas de las consecuencias que ya se observan y se seguirán experimentando es el aumento de la temperatura promedio global de los océanos y la superficie terrestre, modificación de los patrones naturales de precipitación, sequías más prolongadas, pérdida de la biodiversidad, cambio en la composición de los ecosistemas, entre otros (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC, 2018).

A partir de bases de datos climatológicos disponibles es posible construir modelos matemáticos que permiten obtener diversos escenarios de los impactos que se pueden manifestar para el año 2100. Es importante recalcar que estos escenarios no son pronósticos climáticos sino proyecciones climáticas (INECC, 2018). Los pronósticos climáticos son estimaciones de la evolución real del clima a partir del estado actual y anterior del clima y las proyecciones climáticas son una respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero y/o forzamientos radiativos mediante modelos climáticos (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC, 2014). Los modelos de circulación general (MCG) representan procesos físicos en la atmósfera, océano, criósfera y superficies terrestres. Estos modelos son la herramienta disponible más avanzada para simular la respuesta de un sistema global en el incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (IPCC, 2012). Los MCG están estructurados para un forzamiento, dados por las trayectorias de concentración representativas RCP que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014).

El cambio climático y los bosques están íntimamente ligados. El hábitat de cualquier especie vegetal depende en gran medida de la temperatura y la lluvia, de modo que conforme el cambio climático modifica las temperaturas del mundo y las pautas de la lluvia, es probable que se produzca una redistribución de las especies arbóreas. En las próximas décadas se prevé que el clima de la Tierra se modificará con mayor rapidez que la capacidad de muchos ecosistemas forestales de adaptarse o de establecerse en otros climas más propicios, con la amenaza de una mortandad a gran escala de bosques y de especies forestales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, 2006).

México cuenta con aproximadamente 64 millones de hectáreas de bosques de clima templado y selvas que abarcan el 32% del territorio nacional (FAO, 2006). Los bosques en el estado de Tlaxcala ocupan una superficie de 76,513.6 hectáreas que corresponden a un 19.3 % del territorio de la entidad, la cual está representada por tres formaciones: las coníferas, coníferas y latifoliadas y latifoliadas. Dentro de las coníferas el estado se caracteriza por presentar tres tipos de vegetación: bosque de oyamel, bosque de táscate y bosque de pino. Los géneros *Abies* y *Pinus* son los dos principales géneros presentes en la formación. El bosque de pino en el estado de Tlaxcala está representado por *Pinus teocote*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. patula*, *P. cembroides* y *P. montezumae* (Inventario Nacional Foresta y de Suelos Tlaxcala, IEFyS, 2014).

Pinus montezumae es una de las principales especies presentes en la formación de coníferas ocupando el quinto lugar en el estado, además presenta gran importancia económica, social y ecológica. Aporta servicios ecosistémicos como la regulación del clima mediante el almacenamiento de gases de efecto invernadero, la captura y almacenamiento de carbono, la captación de agua de niebla, entre otros y se ha utilizado con éxito en varios programas de reforestación, para la protección de cuencas hidrográficas y restauración de suelos degradados (Comisión Nacional Forestal, CONAFOR, 2015).

Debido a la importancia de esta especie en el estado de Tlaxcala en el presente trabajo se analizó el efecto del cambio climático sobre la distribución potencial y los servicios ecosistémicos proporcionados por *Pinus montezumae* en el estado.

i. Clima

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define el clima como el estado promedio y la variabilidad de elementos como la temperatura, la precipitación, la presión atmosférica, la humedad y el viento, o mediante combinaciones de elementos durante un determinado tiempo, que puede ser de meses a cientos de millones de años. El periodo clásico es de 30 años, en general se puede definir el clima como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios del sistema climático (OMM, 2016).

El sistema climático consiste en cinco componentes principales: la atmósfera, hidrósfera, criósfera, la superficie de la tierra y la biósfera. El sistema climático está cambiando constantemente debido a las interacciones entre los componentes, así como factores externos como las erupciones volcánicas, variaciones solares y los factores humanos como el cambio de uso de suelo (OMM, 2016).

ii. Cambio climático

Los procesos y los agentes determinantes del cambio climático son tanto naturales como antropogénicos. El cambio climático de origen antropogénico se genera como consecuencia de los cambios de uso del suelo y del denominado efecto invernadero, originado por la presencia de determinados gases en la atmósfera, que en concentraciones normales han permitido el desarrollo de la vida en la Tierra, pero que debido a algunas actividades humanas han incrementado su concentración y provocado un aumento de la temperatura media del planeta, alterándose por ello todo el sistema climático global. Los primeros modelos que analizaron la influencia del aumento de ciertos gases en la atmósfera sobre el clima se realizaron en Japón entre los años 1960-1970; fue entonces cuando surgió el concepto de cambio climático (Observatorio de Salud y Cambio Climático, OSCC, 2011).

La mayor parte de la radiación solar (cerca de un 70%) atraviesa la atmósfera y alcanza la superficie terrestre, que se calienta y a su vez emite radiación infrarroja. Ésta atraviesa y supera la atmósfera, pero parte de ella es absorbida y reemitida por las partículas de gases de efecto invernadero (GEI) lo que provoca el aumento de la temperatura (OSCC, 2011).

iii. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro (INECC, 2017).

Estos escenarios no son pronósticos climáticos, son proyecciones climáticas bajo un Modelo Climático Global (MCG) estructurado para un forzamiento, actualmente dado por las Trayectorias de Concentración Representativas (en inglés *Representative Concentration Pathways* RCP's), y un horizonte, que es un período histórico (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015).

iv. Modelos de cambio climático

Es una representación numérica del sistema climático basado en propiedades físicas, químicas y biológicas, sus interacciones, sus procesos y sus leyes ya establecidas como la conservación de masas, conservación de la energía y el momento, así como una base de datos de medidas observadas (IPCC, 2014).

El sistema climático puede ser representado por modelos de distinta complejidad, dependiendo del número de dimensiones espaciales, los procesos físicos, químicos y biológicos que representa, el nivel en el que están involucradas las parametrizaciones empíricas (IPCC, 2014).

v. Modelos Climáticos Globales (GCM)

Los modelos climáticos globales son modelos numéricos que simulan numerosos aspectos climáticos, incluidos la temperatura de la atmósfera y los océanos, la precipitación, los vientos, las nubes, las corrientes oceánicas y la extensión del hielo marino. Los modelos se contrastan de forma amplia con observaciones históricas. Los MGC son la herramienta más avanzada disponible actualmente para simular la respuesta de un sistema climático global ante el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

Tabla I. Modelos Climáticos Globales utilizados en WorldClim v.1.4.

Modelo GCM	Institución	País
ACCESS1-0	Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model	Australia
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
CESM1-CAM5-1-FV2	National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	Francia
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Estados Unidos
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration	Corea del Sur
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	Reino Unido/Brasil
INMCM4	Russian Academy of Sciences, Institute of Numerical Mathematics	Rusia
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NorESM1-M	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega

vi. Modelo Comunitario del Sistema Climático (CCSM4)

El Modelo Comunitario del Sistema Climático (en inglés *The Community Climate System Model CCSM*) es un modelo climático global acoplado para simular el sistema climático de la Tierra. Este modelo está compuesto por cinco módulos geofísicos separados que simulan simultáneamente la atmósfera, el océano, la tierra, el hielo marino, el hielo terrestre que están conectados mediante un acoplador que es un componente central que intercambia estados y flujos de información entre los componentes. CCSM permite realizar relaciones fundamentales sobre estados climáticos pasados, presentes y futuros de la Tierra (Gent *et al.*, 2011).

El proyecto CCSM es un esfuerzo cooperativo entre investigadores del clima en Estados Unidos, principalmente soportado por la Fundación Nacional de Ciencia (en inglés *National Science Foundation NSF*) y con sede en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (en inglés *National Center for Atmospheric Research NCAR*) en Boulder, Colorado. También el proyecto cuenta con una estrecha colaboración con el Departamento de Energía de los Estados Unidos (en inglés *Department of Energy DOE*) y con la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (en inglés *National Aeronautics and Space Administration NASA*) (Vertenstein *et al.*, 2010).

vii. Proyecciones de cambio climático

Una proyección climática es una respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles, basada en simulaciones mediante modelos climáticos. Las proyecciones climáticas se diferencian de las predicciones climáticas por su dependencia del escenario de emisiones, concentraciones y/o forzamiento radiativo utilizado, basado en supuestos relativos (IPCC, 2014).

viii. Trayectorias de concentración representativas (RCP)

En el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (en inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*) se definieron cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Éstas se caracterizan por su forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m² (OSCC, 2014).

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) (Tabla II). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI (OSCC, 2014).

Tabla II. Escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración de GEI

Nombre	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	Creciente en 2100	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	Creciente en 2100	936 ppm

*FR: Forzamiento Radiativo

ix. Nicho ecológico

Hutchinson (1957) definió el nicho de una especie como un espacio con n dimensiones, donde cada una representa la respuesta de una especie a la variación de una variable determinada (condiciones bióticas y abióticas). En el interior de este espacio se distinguen el nicho fundamental (N_F) y el nicho realizado (N_R); el nicho fundamental se refiere a las condiciones abióticas en las cuales una especie puede vivir; mientras que el nicho realizado está constituido por las condiciones ambientales existentes en el área más las interacciones biológicas.

x. Diagrama BAM (Biótico, Abiótico y Movilidad)

El área de distribución de una especie, en un tiempo dado, es el resultado de una combinación de factores, tres de los cuales son de particular importancia y se ilustran en el diagrama ilustrado en la Figura 1, llamado el diagrama BAM (Soberón y Peterson, 2005) que es una representación abstracta del espacio geográfico (G). A continuación, se indican las condiciones señaladas por los autores citados:

- A. La región del mundo donde se encuentran las condiciones ambientales que permiten la sobrevivencia y reproducción de una especie (este conjunto de condiciones se llama nicho fundamental de la especie). Se denota con la letra A en el diagrama, y se mide mediante variables scenopoéticas.
- B. La región del mundo que contiene el ambiente biótico adecuado para la especie. Esto es, los sitios donde no hay competidores capaces de excluir a la especie, ni depredadores o enfermedades capaces de extirpar todas sus poblaciones, y existen los mutualistas (polinizadores, dispersores de semillas, entre otros.) necesarios. Se mediría, si existieran datos, utilizando las densidades de población de las principales especies interactuantes. Se denota con la letra B.
- C. El conjunto de sitios que la especie ha tenido tiempo de visitar, o de "explorar" desde una fecha dada (origen, la última glaciación, su introducción a un nuevo continente, entre otros.) se denota con la letra M.

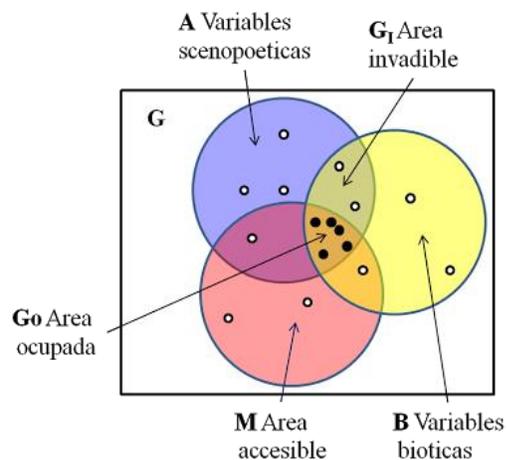


Figura 1 Diagrama de BAM (CONABIO.2008)

Estos conceptos permiten definir dos regiones importantes: el área ocupada, denotada como GO y el área invadible, GI. El área GO es la parte del mundo que cuenta con condiciones ambientales y bióticas favorables, y que ha estado accesible a la especie. El área GI es una zona con condiciones ambientales y bióticas favorables, pero no accesible a la especie debido a la existencia de barreras, a falta de tiempo para que la especie expanda su área de distribución, entre otros (CONABIO, 2008).

xi. Modelado de Nicho Ecológico (ENM) y Modelado de la Distribución de Especies (SDM)

Son herramientas numéricas que utilizan algoritmos computacionales usados para desarrollar relaciones entre los valores ambientales y los datos de presencia, presencia-ausencia y/o abundancia conocidos de las especies (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008). La diferencia principal entre el Modelado de Nicho Ecológico (en inglés *Ecological Niche Modeling* ENM) y Modelado de la Distribución de Especies (en inglés *Species Distribution Modeling* SDM) se encuentra en que las áreas de distribución son subconjuntos del espacio geográfico (G), mientras que los nichos son objetos del espacio ambiental (E) (Soberón *et al.*, 2017).

Los SDM se refieren a modelar objetos en G. Estos pueden ser considerados áreas potenciales (A o G_I), si se ignoran los efectos de B y M, o áreas ocupadas (G_O), si se cuenta con información sobre B y M. Los ENM se refiere a modelar condiciones ambientales, que se aproximan a N_F o a N_R dependiendo del algoritmo (Soberón *et al.*, 2017).

Existen varios algoritmos para la modelación de SDM/ENM y no existe una guía que defina cuál algoritmo seleccionar, esto va a depender del tipo de datos si son de presencia, presencia-ausencia, del tamaño de la muestra, de la naturaleza de tus variables. Entre los métodos de modelado que se pueden encontrar están los Modelos Lineales Generalizados (en inglés *Generalized Linear Model* GLM), los Modelos Aditivos Generalizados (en inglés *General Additive Model* GAM), los Modelos de Bosques Aleatorios (en inglés *Random Forest* RF) y Modelos de Máxima Entropía (MaxEnt).

xii. MaxEnt

MaxEnt está fundamentado en el concepto de máxima entropía, utilizando una aproximación mecanicista para realizar predicciones a partir de información incompleta. MaxEnt estima la distribución más uniforme a lo largo del área de estudio con la restricción de que el valor esperado para cada variable ambiental en una distribución concuerda con su promedio empírico (valores promedio para el conjunto de datos de ocurrencia) (Illoldi y Escalante, 2008).

MaxEnt pesa cada característica (variable ambiental) al multiplicarla por una constante, y la divide posteriormente para asegurar valores de probabilidad entre 0 y 1. El programa inicia con una distribución uniforme de probabilidades e iterativamente altera el peso de una variable a la vez para maximizar la similitud de los datos de ocurrencia. El algoritmo está garantizado para converger en la distribución probabilística óptima, y dado que no aleatoriza, los resultados son determinísticos. Las predicciones de MaxEnt para cada celda analizada hacen referencia a valores acumulativos, representando como porcentaje el valor de probabilidad para la celda en cuestión y todas aquellas con valores iguales o menores de probabilidad. Una celda con valor de 100 es la más adecuada, mientras que celdas con valores cercanos a cero son las menos adecuadas dentro del área de estudio (Illoldi y Escalante, 2008).

xiii. Máxima entropía

Romero (2000) explicó el principio o método de máxima entropía; señaló que es un procedimiento para generar distribuciones de probabilidad de forma sistemática y objetiva. Se puede describir de la siguiente manera: de entre todas aquellas distribuciones de probabilidad compatibles con cierta clase de información, escoger la que conlleve una mayor incertidumbre; se acepta que la incertidumbre de una distribución está representada por la función:

$$H: - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

entonces la máxima entropía (MaxEnt) indica que debemos maximizar H.

La palabra información tiene varios sentidos; se usará en el sentido de la reducción en la incertidumbre del receptor, después de haber conocido el resultado de un evento aleatorio. Si S representa la incertidumbre respecto a alguna situación, e I la información, tenemos la relación:

$$I_{obtenida} = S_{antes} - S_{después}$$

La incertidumbre significa falta de capacidad de predicción del resultado de un experimento aleatorio.

Sea X una variable aleatoria discreta, con valores x_1, \dots, x_n , y con distribución de probabilidad $p_i = P(X=x_i)$. Sea $p = (p_1, \dots, p_n)$. Definimos la entropía de Shannon como:

$$H(p) = \mathbb{E}I(X = x_i) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

Entonces $H(p)$ mide la cantidad de información que se espera obtener al conocer el valor de X. Equivalentemente, también mide el resultado que se espera tener, o la reducción de la incertidumbre a obtener en la siguiente realización de X.

xiv. Los bosques y el cambio climático

El cambio climático y los bosques están íntimamente ligados. Por una parte, los cambios que se producen en el clima mundial están afectando a los bosques debido a que las temperaturas medias anuales son más elevadas, a la modificación de las pautas pluviales y a la presencia cada vez más frecuente de eventos climáticos extremos. Los bosques y la madera que producen atrapan y almacenan bióxido de carbono, con lo cual contribuyen considerablemente a mitigar el cambio climático. En total, los bosques del planeta y sus suelos actualmente almacenan más de un billón de toneladas de carbono (FAO, 2006).

Por el otro lado la destrucción, explotación excesiva o incendio de los bosques puede producir bióxido de carbono, gas responsable del efecto invernadero. La destrucción de los bosques libera en la atmósfera unos seis mil millones de toneladas de bióxido de carbono al año (FAO, 2006).

El hábitat de cualquier especie vegetal depende en gran medida de la temperatura y la lluvia, de modo que conforme el cambio climático modifica las temperaturas del mundo y las pautas de la lluvia, es probable que se produzca una redistribución de las especies arbóreas (FAO, 2006).

Las especies arbóreas tienden a pasar a latitudes y altitudes más elevadas como reacción al calentamiento del planeta. El desplazamiento hacia una mayor altitud incrementa la vulnerabilidad en sus características genéticas y ambientales ya que los hábitats de las montañas suelen tener un espacio limitado, lo que a su vez limita las poblaciones de las especies y, por lo tanto, su diversidad genética. No todas las especies reaccionarán desplazándose. Algunas tienen una mayor capacidad para adaptarse a las nuevas condiciones del clima, pero para otras especies el cambio climático podría superar su capacidad de adaptación y conducir las a la extinción (FAO, 2006).

Se espera que con el cambio climático las especies forestales sufran estrés hídrico, además puede presentarse mayor incidencia de plagas, enfermedades y disminución en la polinización (CONAFOR, 2013).

xv. Recursos forestales en el estado de Tlaxcala

Los bosques son uno de los ecosistemas forestales más importantes a nivel global y del país, por la superficie que ocupan, la diversidad biológica que contienen y la amplia gama de bienes y servicios que proporcionan a la sociedad. Las especies arbóreas, arbustivas y herbáceas que se encuentran en este ecosistema desempeñan un papel importante en la economía de las comunidades rurales en las zonas forestales del país, como fuente de productos maderables y no maderables. Además, desde el punto de vista ecológico, los bosques constituyen una de las principales reservas de biodiversidad y carbono, regulan el ciclo hidrológico y contribuyen a la conservación del suelo, entre otros múltiples servicios y valores que ofrecen (IEFyS, 2014).

Los bosques en el estado de Tlaxcala ocupan una superficie de 76 513.6 hectáreas (19.3% del territorio de la entidad), distribuidas en 53 municipios del estado, aunque Tlaxco, Calpulalpan, Huamantla, Españita y Nanacamilpa de Mariano Arista son los cinco municipios con mayor superficie. Al acumular 37 614.6 hectáreas de bosque, que representan 49.1% de la superficie que cubre, equivalente a 71,3 % del total (IEFyS, 2014).

En el estado de Tlaxcala la formación de coníferas es la más importante de este ecosistema por la superficie que cubre, equivalente a 71.2% del total y el bosque de pino es la comunidad con mayor extensión, con 16 219.7 ha de vegetación primaria y 14 595.1 ha de vegetación secundaria, encontrándose presente en 31 municipios. El bosque de pino en el estado de Tlaxcala está representado por *Pinus teocote*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. patula*, *P. cembroides* y *P. montezumae*. (IEFyS, 2014).

xvi. *Pinus montezumae* Lamb.

La información que se presenta a continuación corresponde a un extracto de las fichas técnicas de reforestación de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2015).

A. Clasificación

- a. Nombre científico: *Pinus montezumae* Lamb.
- b. Reino: Plantae
- c. División: Pinophyta
- d. Clase: Pinopsida
- e. Orden: Pinales
- f. Familia: Pinaceae
- g. Género: *Pinus*
- h. Subgénero: *Pinus*

B. Nombre(s) común(es):

Pino, ocote, pino Montezuma, pino blanco, ocote macho, en el estado de Veracruz se conoce como chalmaite blanco y en el estado de Oaxaca como pino real y yutnu-santu.

C. Origen:

Nativo de México.

D. Descripción de la especie:

Árbol de 25 a 30 m y diámetro normal (DN) de 50 a 90 cm; fuste recto, cilíndrico, libre de ramas hasta un 65% de su altura; copa densa, irregularmente redondeada a piramidal, con las ramas horizontalmente extendidas. La corteza es de color moreno rojiza, gruesa, áspera y agrietada.

Las hojas son acículas verdes oscuro en fascículos de cinco o raramente seis o siete, de 14 a 21 cm de largo, extendidas, triangulares, flexibles, con los bordes aserrados y estomas en las tres caras; los canales resiníferos son dos a seis, medios, ocasionalmente con uno o dos internos.

Las vainas son de color castaño oscuro, persistentes, anilladas, de 0 a 20 mm de largo.

Yemas largamente ovoides, morenas y vellosas. Los conillos femeninos inmaduros son oblongos, de color purpúreo o moreno azulado, con escamas anchas y punta extendida.

Los conos femeninos maduros son largamente ovoides y ovoide cónicos recurvados; de 8.5 a 15 cm de largo y de 7 a 10 cm de ancho, color moreno, opacos o levemente lustrosos, colocados en pares o en grupos de tres; extendidos o ligeramente colgantes, casi sésiles o sobre pedúnculos de 10 a 15 mm. Las escamas son duras, fuertes, de 25 a 35 mm de largo y de 13 a 17 mm de ancho, ápice anguloso y apófisis levantada.

La madera es dura, pesada y resinosa. La albura es blanco amarillento y el duramen de color café claro. Tiene textura fina, grano recto, alta durabilidad natural.

E. Distribución en México

Se encuentra desde los 16° 50' a 25° 20' de latitud norte y los 92° 15' a 105° 10' de longitud oeste. En México presenta una amplia distribución, extendiéndose sobre la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas. Se ha reportado en Chiapas, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas.

F. Requerimientos ambientales

a. Altitud (msnm)

La altitud mínima requerida es de 1 150 msnm, una altitud máxima de 3 200 msnm y una altitud media de 2 500 msnm.

b. Suelo

Los suelos donde se desarrolla esta especie son de origen volcánico, ubicados en las mesetas altas y pendientes bajas de las montañas, sitios donde se encuentran los mejores ejemplares. Esta especie también se puede desarrollar en sitios secos o áridos, aunque bajo estas condiciones el crecimiento es lento y los árboles son de baja estatura y muy ramificados.

c. Temperatura (°C)

La temperatura requerida va desde los 8°C a 24°C.

d. Precipitación (mm)

El intervalo de precipitación va desde los 800 hasta los 1,000 mm anuales o más; varía de 500 a 1,500 mm, prospera mejor a los 800 mm anuales.

G. Usos

a. Económico

Su madera se utiliza para la fabricación de muebles, estructuras, celulosa, cajas de empaque, puntales para minas, duelas, cercas, construcciones pesadas y livianas; chapa, triplay y extracción de resina.

b. Ecológico

Se ha utilizado con éxito en varios programas de reforestación, para la protección de cuencas hidrográficas y para la restauración de suelos degradados.

xvii. Servicios ecosistémicos

Los ecosistemas proporcionan cuatro tipos de servicios al mundo:

A. Servicios de abastecimiento

Agua, alimentos, madera y otros bienes son algunos de los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas y que se conocen como “servicios de abastecimiento”. Muchos de los servicios de abastecimiento se comercializan en los mercados; sin embargo, en muchas regiones, los hogares rurales también dependen directamente de los servicios de abastecimiento para su subsistencia. En este caso, el valor de los servicios puede ser mucho más importante del que reflejan los precios que alcanzan en los mercados locales (FAO, 2015).

B. Servicios de regulación

El mantenimiento de la calidad del aire y del suelo, el control de las inundaciones y las enfermedades o la polinización de los cultivos son algunos de los “servicios de regulación” proporcionados por los ecosistemas. A menudo son invisibles y, por consiguiente, en la mayoría de los casos se dan por sentados. Cuando se ven dañados, las pérdidas resultantes pueden ser importantes y difíciles de recuperar. Dentro de los servicios de regulación se encuentran: el clima local y la calidad del aire, el secuestro y almacenamiento de carbono, la moderación de eventos extremos, el tratamiento de aguas residuales, la prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo, la polinización, el control biológico de plagas y la regulación de los flujos de agua (FAO, 2015).

C. Servicios de apoyo

Proporcionar espacios vitales para las plantas o animales y conservar su diversidad son lo que se denomina “servicios de apoyo”, que constituyen la base de todos los ecosistemas y sus servicios. Dentro de los servicios de apoyo se encuentran el hábitat para especies y la conservación de la diversidad genética (FAO, 2015).

D. Servicios culturales

Los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas se denominan “servicios culturales”. Éstos comprenden la inspiración estética, la identidad cultural, el sentimiento de apego al terruño y la experiencia espiritual relacionada con el entorno natural. Normalmente, en este grupo se incluyen también las oportunidades para el turismo y las actividades recreativas. Los servicios culturales están estrechamente interconectados y a menudo están relacionados con los servicios de abastecimiento y de regulación: la pesca en pequeña escala no sólo tiene que ver con los alimentos y los ingresos, sino también con el modo de vida de los pescadores. En muchos casos, los servicios culturales figuran entre los valores más importantes que las personas asocian con la naturaleza; es por ello fundamental comprenderlos (FAO, 2015).

xviii. Secuestro y almacenamiento de carbono

Los ecosistemas regulan el clima mundial mediante el almacenamiento de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, cuando los árboles y plantas crecen, eliminan dióxido de carbono de la atmósfera y lo retienen eficazmente en sus tejidos.

La captura y almacenamiento de carbono es una propiedad que se presenta naturalmente en los bosques; se refiere a la capacidad de estos para asimilar el carbono que se encuentra en la atmósfera, dirigida a la formación de las estructuras leñosas en los árboles o de cualquier otro tipo en vegetales, por medio de la fotosíntesis. El secuestro de carbono en un sistema forestal genera un bien público que se produce de manera privada, es decir, a través de los propietarios de los bosques (Heal, 2000). Esta situación implica la necesaria consideración de dos factores: el potencial del bosque para capturar carbono por un cierto tiempo, por unidad de área (lo cual determinará la cantidad de tierra destinada a capturar una cierta cantidad de carbono) y del valor que se obtenga por dedicar la tierra a otros usos alternativos (por ejemplo, la agricultura, agroforestería, actividades pecuarias) (Castro y Tucker, 2009).

xix. Captación de agua de niebla

De todas las situaciones forestales, los bosques higrofiticos nubosos o brumosos, son los que mantienen una relación más cercana con el agua dulce. Estos bosques están en zonas montañosas o en tierras altas envueltas por una bruma frecuente y persistente, en particular en la intersección directa de las nubes impulsadas por el viento con la superficie. Presentes sobre todo en las zonas tropicales, los bosques higrofiticos son comunes en las altas montañas del interior, a altitudes de 2 000 a 3 000 m. En las sierras costeras pueden estar a 1 200 m y en las islas pequeñas aun a 500 m (Hamilton, 2009).

Además de la precipitación vertical normal, estos bosques tienen otra fuente de agua: la intercepción y caída de agua de la niebla que se desplaza horizontalmente, la cual puede añadir cientos de milímetros de agua al año al ecosistema y a su cuenca (Bruijnzeel y Hamilton, 2000).

Todas las superficies epífitas y el follaje de los árboles, las ramas, los tallos y los arbustos, forman una “red” que captura la precipitación horizontal de la niebla o las nubes, y se suma al caudal de la cuenca como goteo de la bruma o escurrimiento en los troncos. En los bosques envueltos de bruma la transpiración es relativamente poca, por las hojas pequeñas y los suelos muchas veces húmedos y encharcados, lo que hace mínima esta pérdida (Hamilton, 2009).

La cantidad de agua “adicional” que obtienen los bosques brumosos varía mucho de acuerdo con las pautas pluviales, la posición topográfica, la frecuencia o persistencia de la niebla y la medida en que el viento impulsa las nubes. El aumento puede ser del 15 al 20% en el caso de las lluvias de 2 000 a 3 000 mm al año, y hasta del 50 al 60% en las cumbres de las cordilleras con menos lluvia (Bruijnzeel y Hamilton, 2000).

II. ANTECEDENTES

i. Cambio climático

- A. Pérez *et al.* (2014) presentan las posibles modificaciones en el paisaje como efecto del cambio climático, determinaron los niveles de aptitud del terreno para las especies forestales *Abies religiosa* (oyamel) y *Pinus montezumae* (ocote blanco) en el Estado de México, mediante dos modelos de variación: GFDL 2.0 y HADGEM, con escenarios: A2 y B2, para los años 2030 y 2050. En el caso del oyamel se obtuvo mayor superficie apta con GFDL 2.0 para 2030 en A2, con aptitud alta y media de 1 220 y 1 687 ha; mientras que con HADGEM en B2, (789 y 1 395 ha). Para el ocote blanco la mayor aptitud se generó con GFDL 2.0 para 2030, con A2, (superior que HADGEM con 740 y 9 689 ha; situación parecida a B2, (alta y media superiores que en HADGEM, con 454 y 8 242 ha, respectivamente). La aptitud alta para *A. religiosa* y *P. montezumae* se reducirá a pequeñas áreas, localizadas en el norte de la entidad, y escasamente en la Sierra Nevada, como consecuencia de la disminución; en contraste, habrá amplias zonas con potencial medio, limitadas por la precipitación, la temperatura y la profundidad del suelo.
- B. Cruz *et al.* (2016) evaluaron la distribución potencial de doce especies de Pinaceae, incluyendo a *P. montezumae*, en condiciones actuales y en escenarios futuros de cambio climático mediante modelos de nicho ecológico. Se utilizaron datos del clima actual, de escenarios futuros, de propiedades de suelos y el modelo digital de elevación como predictores ambientales. El modelado se realizó con el software MaxEnt, 75% de los datos de presencia de las especies se utilizó para probar los modelos y el 25% restante para su validación. Los grids de salida se clasificaron en tres categorías de áreas para la distribución de las especies: no idónea, marginal e idónea. Los modelos muestran que habrá una disminución de 16 y 40% de áreas idóneas en los horizontes de los periodos 2015-2039

y 2075-2099, respectivamente; las especies más afectadas en la reducción de su distribución serán *Abies religiosa*, *P. leiophylla* y *P. teocote*.

- C. Gutiérrez y Dulvenvoorden (2010) analizaron la distribución de 56 especies de *Pinus* en México modelada por medio de MaxEnt. El objetivo principal fue investigar si las especies de pino clasificadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (por sus siglas en inglés *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* IUCN) como amenazadas tienen una representación adecuada en las áreas protegidas de México. Se encontró que casi el 70% de las especies tienen menos del 10% de su distribución modelada protegida. Ninguna de las especies alcanzó el nivel de representación propuesto como adecuado. Se observó que las especies de pino clasificadas como amenazadas tienen un área de distribución más estrecha, que ocurren a menores elevaciones máximas y se encuentran menos representadas en las áreas protegidas en comparación con las otras especies de pino. Los resultados sugieren que la red actual de áreas protegidas en México no protege adecuadamente al género *Pinus*. Los autores propusieron que los esfuerzos de conservación deben estar dirigidos principalmente a especies con distribución reducida y distribuidas a bajas altitudes, como por ejemplo *P. attenuata*, *P. cembroides* subsp. *cembroides* var. *lagunae*, *P. radiata* var. *binata*, *P. rzedowskii* y *P. muricata*.
- D. Arriaga y Gómez, (2007) realizaron distribución potencial de dos especies de aves, 17 especies de pinos incluyendo *Pinus montezumae* y 17 especies de encinos. Para evaluar la distribución de especies en un escenario de cambio climático, se utilizó el modelo general de circulación HadCM2, que incluye dos escenarios: HHGGAX50 (el menos conservador) y HHGSDX50 (el conservador). Los resultados obtenidos para las dos especies de aves fue que *Ortalis wagleri* se verá ampliada

su distribución, mientras que *Oreophasis derbianus* la cuál sufrirá una reducción importante de área potencial. De acuerdo con los escenarios actuales y de cambio climático analizados para las 17 especies de pinos y las 17 de encinos, se observa que las especies de pinos y encinos que actualmente se localizan en climas fríos o semifríos y húmedos o subhúmedos, disminuyen su área de distribución. Por ejemplo, *Pinus montezumae* disminuye su distribución en un 10.5%.

- E. Aceves (2017) presenta la distribución potencial actual de 20 especies de pinos en México incluyendo *Pinus montezumae*, utilizando el Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014, 19 variables bioclimáticas y tres topográficas se categorizó probabilísticamente su distribución potencial utilizando el algoritmo de MaxEnt. Se observó que las especies de pino con mayor superficie potencial en un rango de probabilidad de 0.70 a 0.99 corresponden a *P. montezumae*, *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* con 14,744.8, 14,436.1 y 11,594.8 km²

ii. Captación de agua de niebla

- A. Barradas (1983) planteó cómo se calcula la captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* con la siguiente relación matemática:

$$C=Pi+Ev+Es+A$$

Donde Pi es la precipitación indirecta depositada en el suelo, Ev la evaporación producida a partir del follaje y del suelo, Es el escurrimiento de agua por el tronco del árbol y A el almacenaje producido por el follaje. Como resultado encontró que un individuo de *P. montezumae* es capaz de precipitar 57.9 L/h con una desviación estándar de 8.3 L/h a partir de la niebla.

- B. Barradas *et al.* (2015) determinaron si el agua recolectada de manera artificial de la niebla en la microcuenca del río Pixquiac en la zona central montañosa del estado de Veracruz es apta para el consumo humano. Los resultados mostraron una cantidad máxima recolectada de 3.19 mm por día, con un

promedio de 1.16 mm por día expresado en equivalente de precipitación pluvial. Como conclusión se determinó que el agua de niebla que se captó puede ser utilizada como agua de riego sin necesidad de recibir algún tratamiento, pero para que pueda utilizarse en el consumo humano debe someterse a tratamientos de purificación con un costo mayor al que utiliza el municipio para suministrar agua a la población.

- C. Parsons (1960) calcula el agua captada en *Pinus radiata* conocido como Pino de Monterrey en la cresta de la colina de Berkely, California que tiene una elevación de 304 metros sobre el nivel del mar. Se colocó un pluviómetro de 20 cm debajo de un *Pinus radiata* de diez metros de altura, un árbol densamente foliado, de forma cónica del que se habían podado las ramas más bajas. El estudio se realizó durante los meses de verano seco. Su captura estimada de agua de niebla en el suelo es de 1.016 mm por hora, para el verano completo se registró un total de 254 mm de goteo de niebla.
- D. Parada-Molina y Cervantes (2017) evalúan la cantidad de agua de lluvia y niebla capturada en la ciudad de Xalapa, Veracruz durante el periodo que va de noviembre de 2012 a febrero de 2013. Los resultados muestran una captación de agua promedio de 51.34 mm por mes y el agua de niebla colectada fue de 3.275 mm por mes.
- E. Uehara y Atsushi (2011) miden la intercepción del agua de lluvia y de agua de niebla por *Pinus pumila* en Mt. Tateyama el norte de Japón. Los resultados obtenidos fue una captación de agua de lluvia de 0.45 mm por hora y una captación de agua de niebla de 0.14 mm por hora.

iii. Captación de dióxido de carbono

- A. Castro y Tucker (2009) mencionaron la evolución de las políticas de uso de los recursos naturales en La Malinche e indicaron que la captura de carbono en sus bosques presenta el contenido de carbono en las comunidades vegetales del Parque Nacional la Malinche.

La cantidad de biomasa y su correspondiente contenido de carbono por comunidad vegetal y uso del suelo en el Parque Nacional la Malinche. Para el *Pinus montezumae* la superficie es de 11,872 ha, la biomasa es de 268 mg/ha, el contenido de carbono es de 129.7 mg/ha, la biomasa total es de 3 181 946 Mg y el contenido de carbono total es de 1 590 973 MgC.

- B. Carillo *et al.* (2014) propusieron dos ecuaciones para determinar la biomasa y el contenido de carbono en *Pinus montezumae* y en *Alnus jorullensis* H. B. K. ssp. *jorullensis*; para *P. montezumae* el mayor porcentaje de biomasa (77.07%) se estimó en el fuste incluido el tocón, mientras que en las ramas y el follaje presentó 8.45% y 9.01%, respectivamente. Para el modelo se utilizaron 15 árboles de *P. montezumae*, el cual fue: $B=0.013DN^{3.0462}$ con una $R^2=0.9909$ para determinar la biomasa y de $C=0.0065DN^{3.0484}$ para determinar el contenido de carbono con una $R^2=0.9313$.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es uno de los problemas ambientales globales más importantes que tenemos hoy en día y sus consecuencias pueden ser devastadoras, algunos ya son perceptibles como el aumento de la temperatura global que en el 2016 fue de 1.1 °C, el mayor de la historia de la humanidad, la subida del nivel del mar y el progresivo deshielo de las masas glaciares (Greenpeace, 2017).

En el Quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático afirman que la evidencia más sólida y completa de los impactos observados del cambio climático corresponde a los sistemas naturales. Muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso (IPCC, 2014).

Durante la segunda mitad del pasado siglo, el cambio climático ya afectó a los ecosistemas forestales y tendrá un efecto cada vez mayor sobre ellos en el futuro. Entre las afectaciones hacia los ecosistemas forestales se encuentran el bajo crecimiento de los árboles y la muerte forestal periférica, la distribución de las especies nativas, la proliferación de especies invasivas, las pautas estacionales en los procesos de los ecosistemas, y la dinámica de población de las especies forestales; en algunos casos ha sido el causante de la extinción de especies. Los servicios de regulación del dióxido de carbono en los bosques están en riesgo de perderse totalmente, a menos que se reduzcan sustancialmente las actuales emisiones (Katila, 2009)

En México se han realizado varios estudios sobre la distribución de especies forestales en los bosques bajo escenarios de cambio climático, sin embargo, pocos sobre *Pinus montezumae*, por lo que se desea conocer el efecto del cambio climático en su distribución potencial y los servicios ecosistémicos que proporciona. Los trabajos realizados sobre los servicios ecosistémicos que esta especie proporciona en cuestión de captación de dióxido de carbono son escasas y de captación de agua de niebla son casi nulas.

IV. JUSTIFICACIÓN

Pinus montezumae es una especie nativa de México, tiene gran importancia económica, geográfica y ecológica y de reforestación. En la parte económica es de las principales especies que se explotan maderablemente y de las que frecuentemente se utiliza su resina con el fin de la producción de aguarrás y colofonia. La resina se produce fundamentalmente en la región centro del país (Arias y Chávez, 2006) y la demanda de este producto ha incrementado por lo que rebasa el abasto que brindan los principales estados productores como son Michoacán, Jalisco, México y Oaxaca. En el año 2017 la producción anual de resina en el país fue de 29 160 toneladas, y en el estado de Tlaxcala se produjo 983 toneladas de producción forestal no maderable la cual incluye resina (Leyva *et al.*, 2013). También es utilizada para la fabricación de muebles, estructuras, cajas de empaque, durmientes, postes, duelas, cercas, construcciones pesadas y livianas, chapa, triplay y celulosa. Está clasificada como excelente para la fabricación de papel con un grado de calidad III (CONAFOR, 2015). La producción forestal maderable en el estado de Tlaxcala en el año 2017 fue de 44 612 hectáreas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos SEMARNAT-DGGFS, 2017). Altitudinalmente *Pinus montezumae* es un principal componente de los pinares entre los 1 500 y 2 800 m de altitud siendo la especie más abundante en el Eje Neovolcanico Transversal (Rzedowski, 2006). Latitudinalmente presenta una distribución muy amplia de los 16° 50' a los 25° 20' (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014). En México presenta una amplia distribución geográfica, extendiéndose sobre la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas, en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Estado de México, Ciudad de México, Michoacán, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima y Morelos (CONAFOR, 2015). Ecológicamente *Pinus montezumae* fue la conífera que mayor Área Natural Protegida (ANP) registró de acuerdo a la CONABIO (FAO-CONAFOR, 2011) ya que ofrece varios servicios ecosistémicos como es la retención de agua de lluvia, captura de agua de niebla, disminuyen la erosión, captura de dióxido de

carbono, producción de oxígeno, son hábitat de seres vivos, entre otros (Galicia y Zarco-Arista, 2014). En la situación de reforestación se encuentra comprendida en los programas de conservación *ex situ* a cargo del Departamento de Bosques de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, del Colegio de Postgraduados y por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se encuentra dentro de las especies utilizadas en el programa ProÁrbol y de las especies seleccionadas dentro de la sub-categoría de apoyo para el establecimiento de áreas para la producción de semillas forestales. Esta especie se encuentra dentro de la lista de especies prioritarias para la reforestación en México definida por la CONABIO y la CONAFOR (FAO-CONAFOR, 2011).

Por todas estas características conocidas de *Pinus montezumae* es significativo conocer su distribución potencial en años venideros para poder anticipar y mitigar la preservación de esta especie y los servicios ecosistémicos que representa su permanencia.

V. OBJETIVOS

Objetivo general

- i. Analizar el efecto del cambio climático sobre la distribución potencial y los servicios ecosistémicos proporcionados por *Pinus montezumae* en el estado de Tlaxcala.

Objetivos específicos

- i. Aplicar escenarios de cambio climático para conocer la distribución potencial de *Pinus montezumae* para los años 2050 y 2070.
- ii. Estimar los cambios en la cantidad potencial de captura de dióxido de carbono proporcionado por *Pinus montezumae*.
- iii. Estimar la variación en la cantidad potencial de captura de agua de niebla proporcionado por *Pinus montezumae*.

VI. HIPÓTESIS

La distribución potencial de *Pinus montezumae* tiene una relación directa con el efecto del cambio climático y con los diferentes escenarios de emisión RCP's y por ende con los servicios ecosistémicos.

VII. METODOLOGÍA

i. Área de estudio

El presente estudio se realizó en el estado de Tlaxcala, localizado en la meseta central de país, ubicada en las coordenadas 19° 44' 00" N, 19° 06' 00" S de latitud norte; 97° 38' 00" E y 98° 43' 00" O de longitud oeste. Colinda al norte, este y sur con el estado de Puebla, al noroeste con el estado de Hidalgo y al oeste con el Estado de México. Cuenta con una extensión territorial de 397 397 ha que representan el 0.2% de la superficie total nacional. Tlaxcala se ubica en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, con un rango altitudinal de 2 200 a 4420 m, siendo el volcán Malinche o Matlalcuéyetl con 4 420 m el correspondiente al punto mayor de altitud (IEFyS, 2014).



Figura 2. Localización del área de estudio.

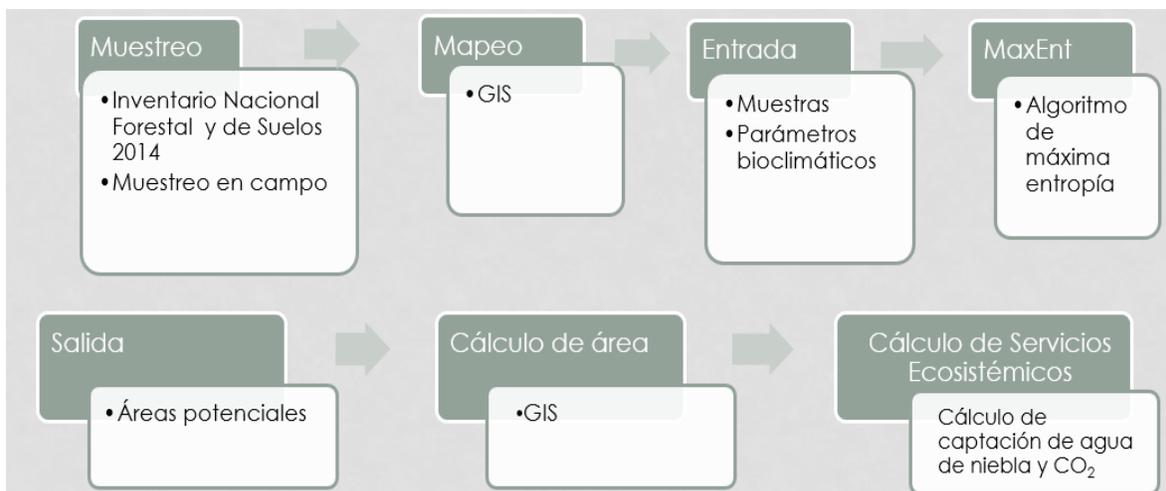


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología.

ii. Registros de presencia

La obtención de coordenadas geográficas de la distribución de *Pinus montezumae* se efectuó a través de los registros del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala en el 2014.

Con el propósito de identificar a la especie, de conocer los métodos para calcular el diámetro, el largo y la obtención del volumen de ésta, así como de localizar más puntos de muestreo, se realizaron cinco visitas a campo. Las localidades corresponden a: El Rosario, El Pardo y Al final de la Senda en el municipio de Tlaxco; Villareal en el municipio de Terrenate y en el municipio de Emiliano Zapata.

En la Figura 4 se pueden observar los registros de presencia tomados del Inventario Forestal, así como los de las visitas a campo.

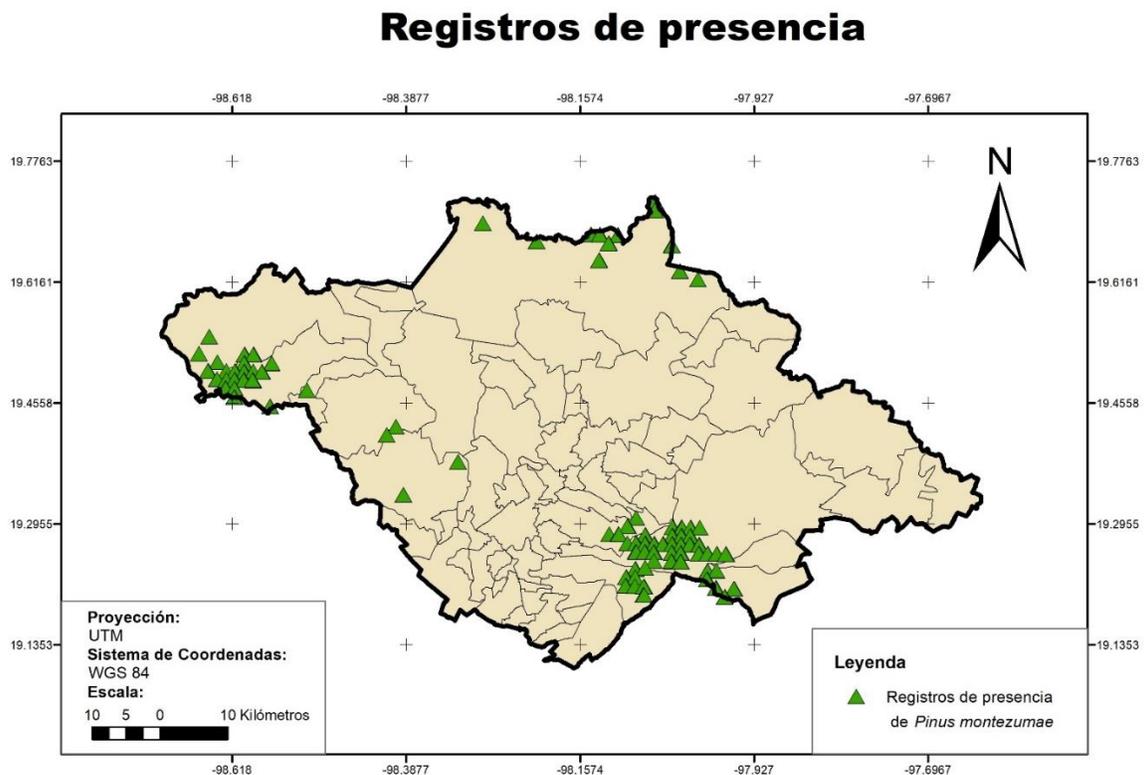


Figura 4 Mapa de presencia de *Pinus montezumae*.

iii. Variables ambientales

Las variables ambientales son capas predictoras de datos topográficos, climáticos y/o satelitales. Dichos datos son de utilidad para estudiar la relación entre el clima y la distribución de los seres vivos. Entre las fuentes de datos ambientales encontramos el portal de geoinformación de la CONABIO, WorldClim, Unidad de Investigación Climática (en inglés *Climate Research Unit CRU*), Observación y Ciencia de los Recursos de la Tierra (en inglés *Earth Resources Observation Science EROS*), entre otros (CONABIO, 2008).

En este trabajo se utiliza WorldClim para el escenario base y los escenarios futuros. WorldClim es un conjunto de capas climáticas globales con una resolución de 30 arc s (representa 0.86 km²). Para el escenario base este conjunto de capas climáticas utiliza un datum WGS84 y está realizado para el periodo de 1960-1990. Estas capas son generadas mediante interpolación de datos mensuales de temperatura mínima, máxima y promedio y de precipitación compilados por la Red de Climatología Histórica Global (en inglés *Global Historical Climatology Network GHCN*), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (en inglés *Food and Agriculture Organization of the United States FAO*), la Organización Meteorológica Mundial (en inglés *World Meteorological Organization WMO*), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), R-HYdronet y un número adicional de base de datos menores de Australia, Nueva Zelanda, países nórdicos de Europa, Ecuador, Perú, Bolivia, entre otros.

Un conjunto de variables bioclimáticas se deriva de los datos mensuales de precipitación y temperatura para generar variables con mayor significado biológico, éstas representan tendencias anuales como la temperatura o la precipitación; estacionales como el rango anual de temperatura o precipitación y factores anuales extremos o limitados como la temperatura del mes más frío o la temperatura promedio del trimestre más cálido. La temperatura está dada en °C*10 y la precipitación en mm (WorldClim, 2016).

Para el escenario futuro, las variables ambientales son las proyecciones climáticas utilizadas en el Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC₅) mediante Modelos Climáticos Globales (GCMs) para las diferentes Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs). En este trabajo el GCM utilizado fue el Modelo Comunitario del Sistema Climático (CCSM4), para los RCPs 4.5, 6.0 y 8.5, para los periodos de tiempo del 2050 (promedio de 2041-2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) y utilizando las variables bioclimáticas (Tabla III).

Tabla III. Variables bioclimáticas

Variable	Descripción
Bio1	Temperatura media anual (°C)
Bio2	Rango de temperatura media diurna (°C)
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100)
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C)
Bio8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
Bio9	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
Bio10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
Bio11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
Bio12	Precipitación anual (mm)
Bio13	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)

Las 19 variables bioclimáticas para el escenario base, el escenario RCP 4.5, 6.0 y 8.5 para los años 2050 y 2070 se encuentran a una escala a nivel mundial, por lo que es necesario reducirla a una escala local en este caso al estado de Tlaxcala. Para ello se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), (CEA, 2010). El recorte se realizó en el programa R para cada parámetro bioclimático del escenario base y las diferentes trayectorias de concentración.

Una vez obtenido el recorte de cada una de las variables bioclimáticas, se procedió a utilizarlas en el modelado de nicho ecológico (ENM) y de la distribución de especies (SDM) utilizando el algoritmo de MaxEnt.

iv. Modelo ENM/SDM utilizando el algoritmo de MaxEnt

A. Preparación de los registros de presencia y variables ambientales.

MaxEnt emplea un archivo de entrada de coordenadas de registro de presencia junto con un grupo de variables ambientales.

Las coordenadas de registro de presencia se capturan en formato csv (comma-separated value), conteniendo la información de la siguiente forma: especie, longitud y latitud (Scheldeman y Maarten, 2010).

Las variables ambientales que se utilizaron para este trabajo fueron variables bioclimáticas, en formato ASCII. En MaxEnt todas las variables ambientales deben tener la misma extensión y resolución por lo que es necesario procesarlas utilizando un SIG en este caso, se utilizó el programa R para realizar este procedimiento. La resolución para las variables fue de 30 arc s (representa 0.86 km²) y la extensión son los límites del estado de Tlaxcala.

Se determinaron las variables bioclimáticas a utilizar de acuerdo con un análisis de correlación de las variables predictivas, de la importancia de las variables obtenido mediante el método de Jackknife y mediante un análisis multivariado MESS (en inglés *Multivariate Environmental Similarity Surface*).

La correlación de las variables ayuda a conocer si dos variables están relacionadas y que tan fuerte es esta relación. Es significativo conocer esto debido a que, si

existen dos variables altamente correlacionadas y tienen curvas de respuesta opuestas, el efecto de ambas variables en el modelo será bajo (Correia, 2018) En este trabajo. la correlación se representó mediante un dendrograma y las variables a elegir fueron aquellas que tuvieran una correlación mayor de 0.5.

El método de Jackknife permite un análisis de la contribución de cada variable a las características finales del modelo. El Jackknife muestra la ganancia de entrenamiento de cada variable como si el modelo hubiera sido corrido de forma aislada sólo con esa variable y lo compara con la ganancia de entrenamiento con todas las variables, esto permite identificar cuáles variables contribuyen más individualmente (Young *et al.*, 2011).

El análisis de MESS mide la similitud de cualquier punto dado con respecto a las variables predictivas. Informa la cercanía del punto a la distribución de puntos de referencia, proporciona valores negativos para puntos distintos. Indica el índice de similitud entre el espacio ecológico que ocupan las presencias y el espacio ecológico que hay en las variables de proyección (Elith *et al.*, 2011).

Una vez definido las variables ambientales a utilizar se procede a ejecutar el algoritmo del modelo.

B. Ejecución del modelo

La finalidad de MaxEnt es estimar la distribución de probabilidad del objetivo a través de la distribución de probabilidad de máxima entropía (cercana a la uniforme), delimitado por un conjunto de reglas para representar la información incompleta acerca de la distribución de destino. La información disponible acerca de la distribución de destino por sí misma se presenta como un conjunto de covariables conocidas como características y se esperan restricciones de cada característica que debe corresponder a sus valores medios de la muestra (la media muestral para un conjunto de puntos de muestreo se ha extraído de la distribución destino). Ya que MaxEnt se utiliza para modelar la distribución de especies con sólo registros de presencia, los píxeles del área de estudio se han convertido en el espacio en el que se delimita la distribución de probabilidad, los píxeles para registrar las ocurrencias de especies conocidas son los puntos de muestreo, las características son las variables bioclimáticas (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2014).

MaxEnt se configuró con los registros de presencia de *Pinus montezumae* obtenidos del Inventario Forestal y de Suelos de Tlaxcala, 2014; los puntos totales de ocurrencia de cada especie se dividieron en: registros de entrenamiento (60%) y validación (25%). Este procedimiento se realizó 30 veces mediante la técnica de muestreo de Bootstrap. Esta metodología consiste en generar muestras de tamaño n , en este caso 30 para obtener la función de distribución de las medias de todas las muestras generadas (Hernández-Abreu y Martínez-Pérez, 2012). Se seleccionó la configuración predeterminada de los tipos de niveles de regularización, para los ajustes que son transformaciones matemáticas de los predictores y se optó por el lineal, el producto y el cuadrático con el formato de salida acumulativo. Los modelos acumulativos finales se clasificaron en tres clases de aptitud: alta, media y no apta, utilizando el umbral de percentil diez de los registros de presencia de entrenamiento (en inglés *10 percentile training presence*): que es el valor de probabilidad en el que 90% de los puntos de presencia estarán dentro del área potencial y el umbral mínimo de los registros de presencia de entrenamiento (en inglés *minimum training presence*): que es el área mínima predicha posible

manteniendo un error de omisión en cero en los datos de entrenamiento (Escalante *et al.*, 2013).

En la Tabla IV se aprecian los umbrales generados por MaxEnt para el escenario base para realizar pruebas binomiales.

Tabla IV. Umbrales para pruebas binomiales para la modelación de distribución potencial de *Pinus montezumae*

Umbral acumulativo	Umbral logístico	Descripción
1	0.019	Valor acumulativo fijo 1
5	0.059	Valor acumulativo fijo 5
10	0.093	Valor acumulativo fijo 10
0.477	0.013	Presencia mínima
21.044	0.209	10 percentil de presencia en el entrenamiento
22.703	0.229	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales
20.755	0.205	Sensibilidad máxima de entrenamiento más especificidad
26.778	0.292	Sensibilidad y especificidad de prueba iguales
21.044	0.209	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad
10.046	0.093	Equilibrar la omisión del entrenamiento, el área prevista y el valor umbral
14.094	0.128	Igualar la entropía del umbral y la distribución original

C. Evaluación y validación del modelo

Los modelos fueron evaluados acorde con pruebas de curva de respuesta: análisis de omisión/comisión, Curva Operada por el Receptor (ROC) y Área Bajo la Curva (AUC).

Con la tasa de omisión se mide el rendimiento del modelo. La gráfica de omisión y área pronosticada (en inglés *Omission and Predicted Area*) en la Figura 5 muestra la tasa de omisión y el área predicha a diferentes umbrales acumulativos. Indica cómo varían las omisiones de predicción calculadas en el modelo respecto de una omisión predicha. Es una representación que muestra la manera en la que se sobreestima, o no, la distribución en nuestro modelo en función de un valor umbral o tolerancia (Matellanes *et al.*, 2014) Se observa cómo el área predicha varía con la elección de un umbral acumulativo y se busca que la omisión de prueba se ajuste a la omisión de entrenamiento.

Esta gráfica se describe de la siguiente manera:

Omisión en datos de entrenamiento o evaluación (en inglés *omission on training samples*, línea azul y *omission on test samples*, línea verde) muestra las fracciones de los puntos de presencia ubicados por fuera del área potencial con base en el modelo de MaxEnt (*Fraction value*) por los valores del umbral de probabilidad (de bajo a alto) que limita el área predicha en el umbral acumulativo (*Cumulative threshold*). Las muestras de entrenamiento y evaluación se utilizan como sinónimo de puntos de presencia (Scheldeman y Maarten, 2010).

La fracción de los puntos de fondo predicha (en inglés *fraction of background predicted*, línea roja) muestra las fracciones de los puntos de fondo aleatorios del área de estudio incluidos en el área predicha, empleando diferentes umbrales acumulativos (*Cumulative thresholds*) (Scheldeman y Maarten, 2010).

La omisión predicha (en inglés *predicted omission*, línea negra). La tasa de omisión predicha es una línea recta, definida por el formato de salida. Es la fracción de las

localidades de prueba que caen en los pixeles que no se pronostican como adecuados para la especie (Fymat y Kapalanga, 2018).

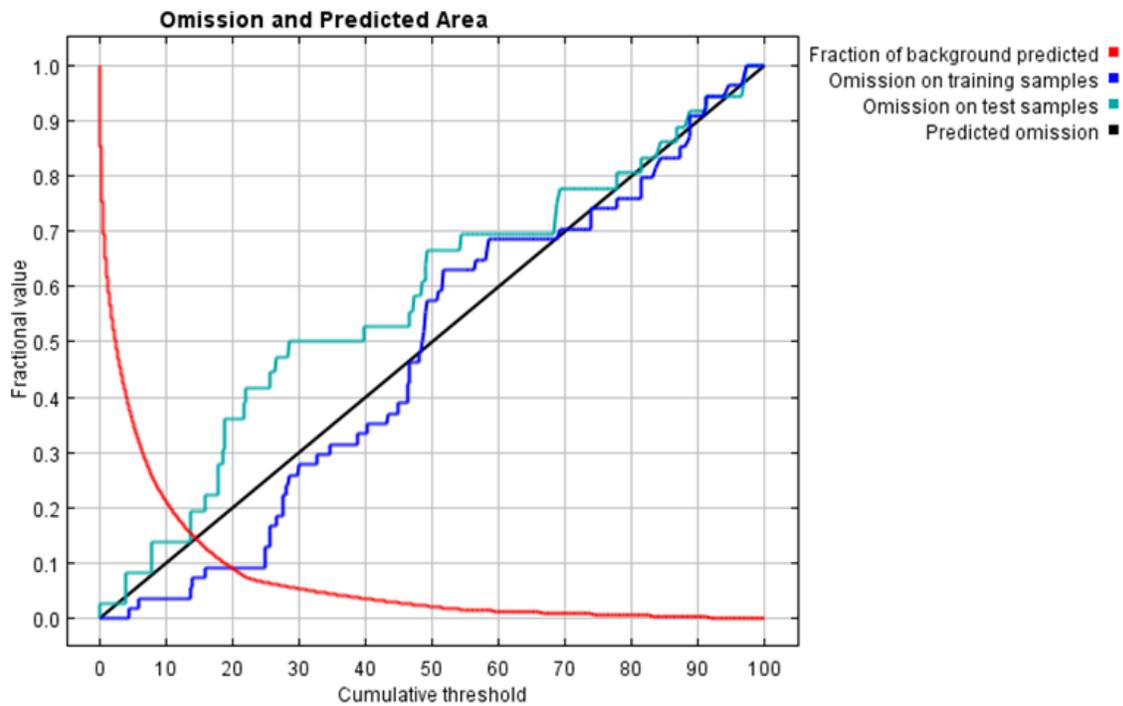


Figura 5. La gráfica de omisión y área pronosticada.

Para evaluar la capacidad de predecir de los modelos generados por MaxEnt se utiliza el Área por debajo de la curva (en inglés *Area Under the Curve*, AUC) de la curva de Característica Operativa Relativa (en inglés *Receiver Operating Characteristic*, ROC) (Mejía *et al.*, 2018). Esta gráfica se describe de la siguiente manera:

Curva de Característica Operativa Relativa (ROC): es una curva que describe la tasa de identificación correcta de presencias (sensibilidad = fracción de verdaderos positivos, en las y) contra la tasa de falsas alarmas (especificidad = fracción de verdaderos negativos, en las x) para los mismos datos. Teniendo en cuenta que la especificidad se define utilizando el área prevista, en lugar de la verdadera comisión. Cuando se obtienen estos números para un intervalo de valores de umbral (para decidir si un punto se debe calificar como ausencia o presencia), se traza la ROC, que es la línea roja en la Figura 6. La línea negra es la que se obtendría si para

diferentes valores del umbral se utilizara un clasificador enteramente aleatorio (Correia, 2018).

La idea de la ROC a su vez da origen al estadístico AUC, que es el área total bajo la curva roja (Correia, 2018). El AUC es equivalente a la probabilidad de que un punto de presencia seleccionado al azar esté ubicado en una celda del raster con un valor de probabilidad mayor para la ocurrencia de la especie que un punto de ausencia seleccionado al azar. La modelación de la distribución de especies en MaxEnt incluye solamente puntos de presencia, por lo tanto, para poder calcular el AUC, MaxEnt reemplaza los puntos de ausencia con puntos del área de estudio generados aleatoriamente. El AUC se puede entonces interpretar como la mayor probabilidad de que un punto de presencia seleccionado aleatoriamente esté ubicado en una celda del raster con un alto valor de probabilidad para la presencia de la especie que un punto generado aleatoriamente (Scheldeman y Maarten, 2010).

Un clasificador aleatorio tiene una AUC de 0.5 y un buen clasificador tiene un área muy cercana a 1. MaxEnt evalúa los aciertos y fracasos que ha conseguido en el modelo aportando un valor de AUC que indicará cuan preciso es nuestro modelo (mostrará valores entre cero y uno). Esto implica que el AUC alcanzable máximo es menor que uno (Correia, 2018).

Araújo *et al.* (2005) recomiendan la siguiente interpretación (Tabla V) del AUC para los modelos generados:

Tabla V. Interpretación para distintos valores de AUC de la curva ROC

Interpretación	AUC
Excelente	$AUC > 0.90$
Buena	$0.80 > AUC > 0.90$
Aceptable	$0.70 > AUC > 0.80$
Mala	$0.60 > AUC > 0.70$
No válida	$0.50 > AUC > 0.60$

*AUC: Área Bajo la Curva

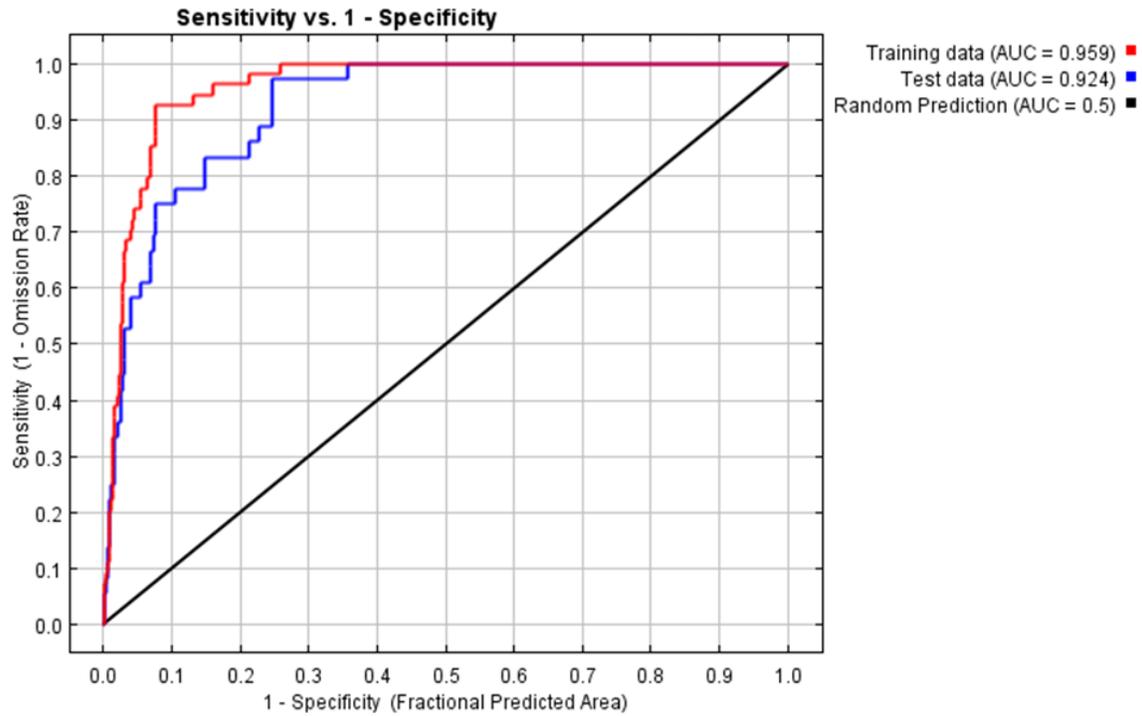


Figura 6. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC).

Los modelos obtenidos en MaxEnt se reclasificaron en ArcMap v10.5, para obtener el cálculo de las áreas potenciales y los servicios ecosistémicos de *Pinus montezumae*.

v. Cálculo de servicios ecosistémicos

A. Captación de agua de niebla:

Para obtener el volumen de número de litros de agua captados por el bosque de *Pinus montezumae* a partir de la niebla se necesita:

La densidad de *Pinus montezumae* que de acuerdo al Inventario Forestal y de Suelos de Tlaxcala, 2014 es de 480 árboles por hectárea en el estado de Tlaxcala.

La capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* que es de 0.88 mm por hora por individuo.

$$\frac{480 \text{ Individuos}}{\text{hectárea}} * \frac{0.88 \frac{\text{mm}}{\text{h}}}{\text{Individuos}} * \text{Área} = X \frac{\text{mm}}{\text{h}}$$

B. Captación de dióxido de carbono:

Se realizó con datos del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala 2014, el procedimiento será el siguiente:

Por individuo:

- a. El volumen se obtuvo con la siguiente ecuación: $V=0.3135^{DN}1.85H^{0.99}$ (Guerra de la Cruz y Mallén, 2008), a partir de los datos de diámetro normal y de altura de cada árbol, registrados en el Inventario Estatal Forestal.
- b. Para obtener la biomasa se utilizó la siguiente ecuación: $B=0.013*D^{3.048}$ (Carillo *et al.*, 2014).
- c. Para calcular la captura de carbono se utilizó la siguiente ecuación:
 $C=\text{Biomasa}/2$

Para determinar el volumen total se emplearon los criterios utilizados en el Inventario Estatal Forestal y de Suelos ((IEFyS, 2014)).

- d. Para determinar el volumen total de cada unidad de muestreo se sumó el volumen total de cada uno de los árboles medidos en ellas.
- e. Cada sitio muestreado en campo contribuye al área total muestreada del conglomerado con 400 m², de manera que un conglomerado con cuatro sitios muestreados tiene un área total de 1,600 m². Esta área se dividió entre 10,000 m² para expresar los resultados en hectáreas.
- f. Para extrapolar al volumen total por hectárea se calcularon factores de expansión:
 - a. $10,000/400 = 25.00$ (CGL con un sitio)
 - b. $10,000/800 = 12.50$ (CGL con dos sitios)
 - c. $10,000/1,200 = 8.33$ (CGL con tres sitios)
 - d. $10,000/1,600 = 6.25$ (CGL con cuatro sitios)
- g. Finalmente se utilizó la siguiente ecuación para determinar el volumen total:

$$\text{Atributo}^{\text{Ha}} = \text{Atributo}^{\text{CGL}} * \text{FE}$$

dónde el Atributo^{Ha} es el atributo por hectárea (Volumen total por hectárea); Atributo^{CGL} es el atributo por conglomerado (Volumen total por CGL) y FE es el Factor de expansión

Para determinar la biomasa total y la captura de carbono total, se realizó el mismo procedimiento de extrapolación.

VIII. RESULTADOS

i. Determinación de las variables bioclimáticas

Utilizando las 19 variables bioclimáticas de precipitación y temperatura se obtuvo el siguiente resultado:

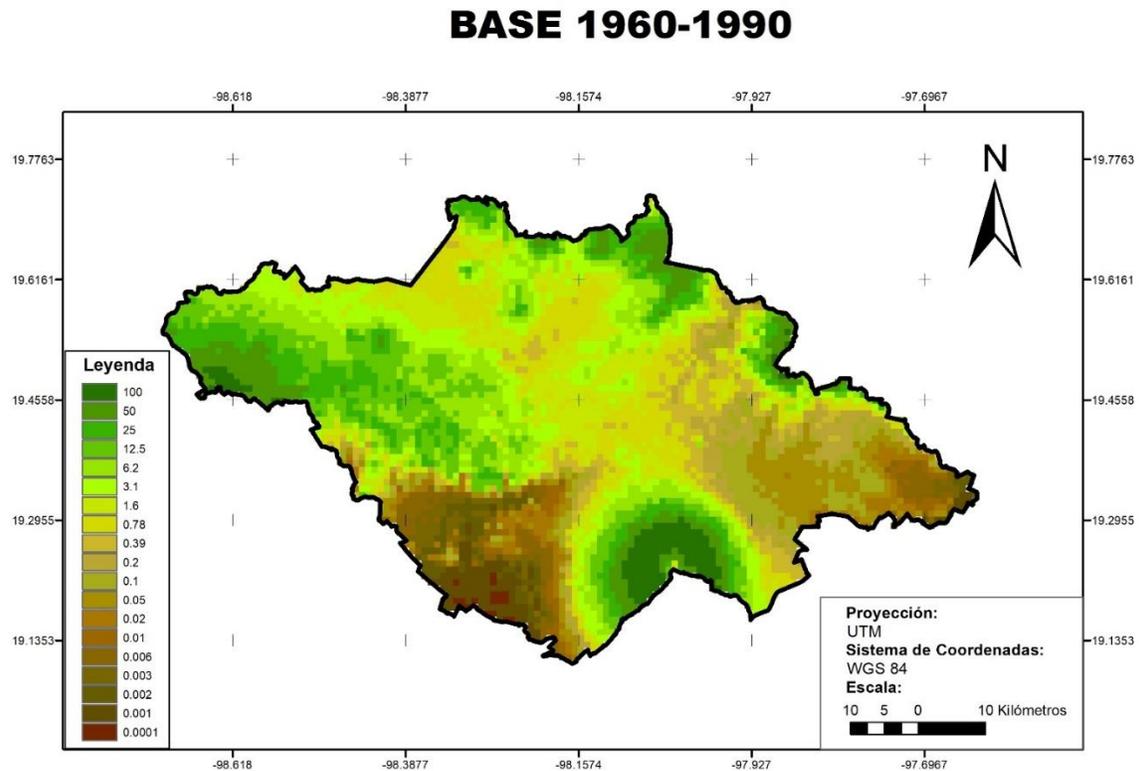


Figura 7. Escenario base con todas las variables bioclimáticas.

Se realizó una correlación de las variables para detectar aquellas que fueran altamente relacionadas con otras y evitar repetir la información. En la Figura 8 se puede observar la correlación de las variables ilustrado mediante un dendrograma. El cuál muestra cómo se forman los conglomerados y los niveles de similitud de estos. Se utilizó el valor de similitud de 0.5, por lo que se traza una línea a lo largo del dendrograma en ese valor y las variables que se encuentren por arriba de ese valor son variables que no están fuertemente correlacionadas con otras como es el caso de Bio15, y las variables que se encuentren por debajo del valor de 0.5 por cada rama que corta la línea se encuentran correlacionadas y se selecciona una de ellas por rama. Las variables seleccionadas por rama fueron Bio1, Bio2, Bio3, Bio14

y Bio18. La variable Bio15 a pesar de no tener una correlación alta con otra variable, en el análisis de Jackknife mostró no tener ninguna importancia para el modelo por lo cual fue descartada; de la primera rama del dendrograma Bio 2 y Bio7 no fueron seleccionadas porque en el análisis MESS se observa que estas variables muestran mayor disimilitud en los municipios de Calpulalpan y Nanacamilpa y en esas áreas se encuentra presente la especie; la segunda rama del dendrograma se seleccionó Bio14 porque es la que mayor importancia presenta en el Jackknife y no muestra disimilitud en el análisis MESS; de la cuarta rama se encuentra solo Bio3 por lo cual se selecciona, de la cuarta rama a pesar de que Bio 6 muestra mayor importancia en el análisis del Jackknife que Bio1, se seleccionó Bio1 porque esta es la temperatura media anual y de la quinta rama Bio 18 es la que muestra mayor importancia en el análisis de Jackknife. Se agregó Bio 12 a las variables finales ya que esta presenta la precipitación anual.

En la sección "Análisis de las contribuciones de las variables" es posible determinar la medida en la que unas variables ofrecen mayor peso de importancia al crear el modelo mediante el método de Jackknife (Figura 9).

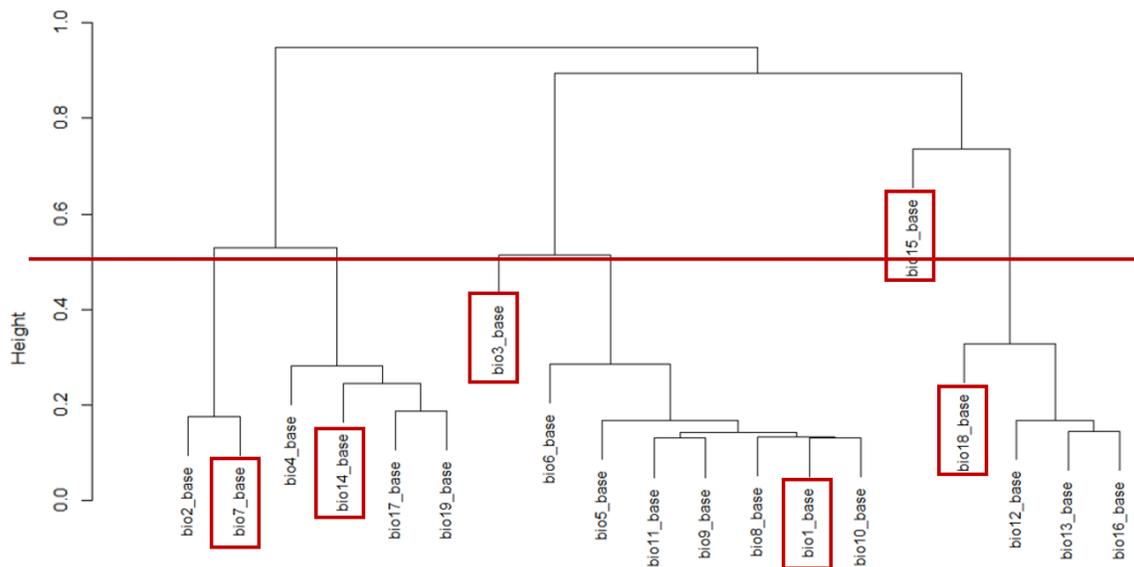


Figura 8. Correlación de las 19 variables bioclimáticas para el escenario base.

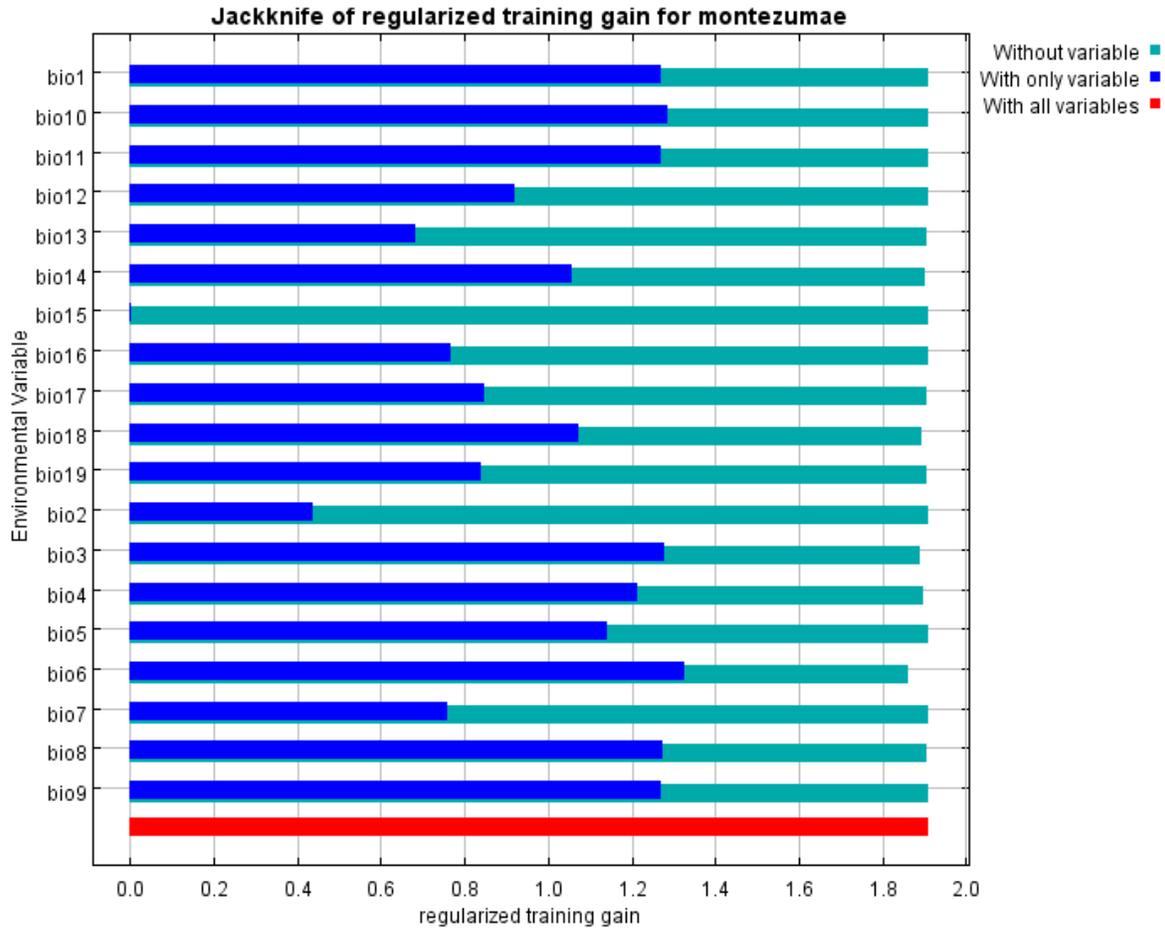


Figura 9. Método Jackknife con las 19 variables bioclimáticas para el escenario base.

Finalmente, el análisis multivariado MESS indica la similaridad entre las variables bioclimáticas futuras con las actuales. En la Figura 10 se observa en rojo las áreas que tienen una o más variables bioclimáticas futuras fuera del rango presente con las variables bioclimáticas actuales. En la Figura 11 se muestra el análisis MoD (en inglés *Most Dissimilar Variable*) que indica cuál es la variable que más disimilitud tiene entre el modelo actual y el futuro en un área específica.

MESS

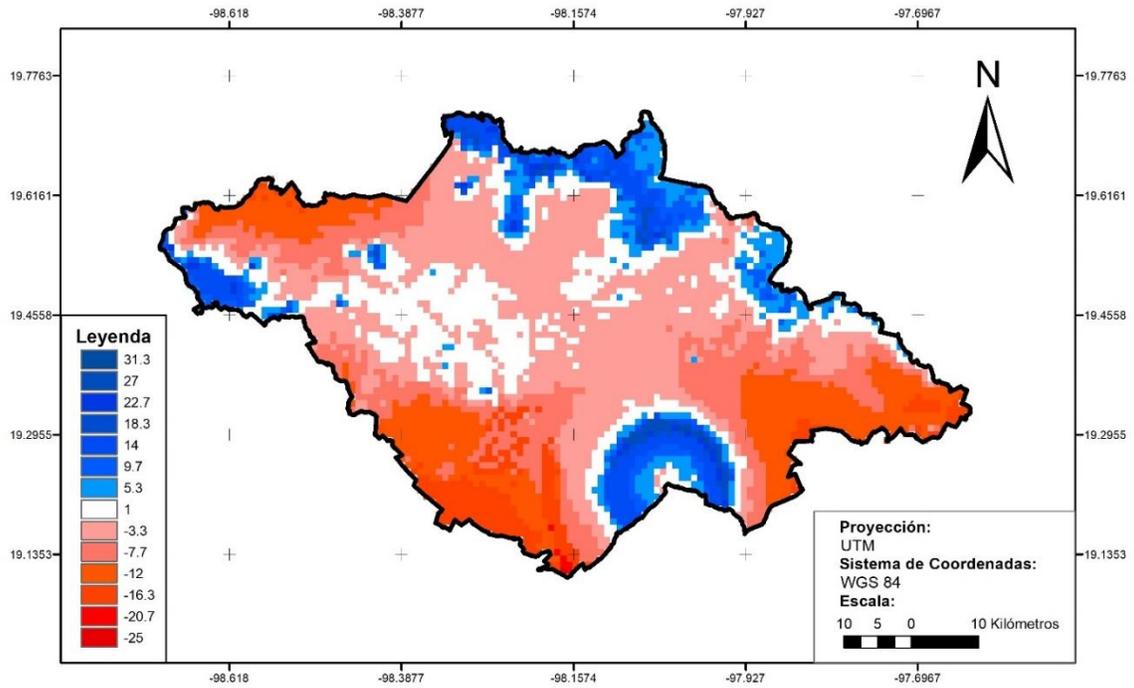


Figura 10. Análisis multivariado MESS de las 19 variables bioclimáticas.

MoD

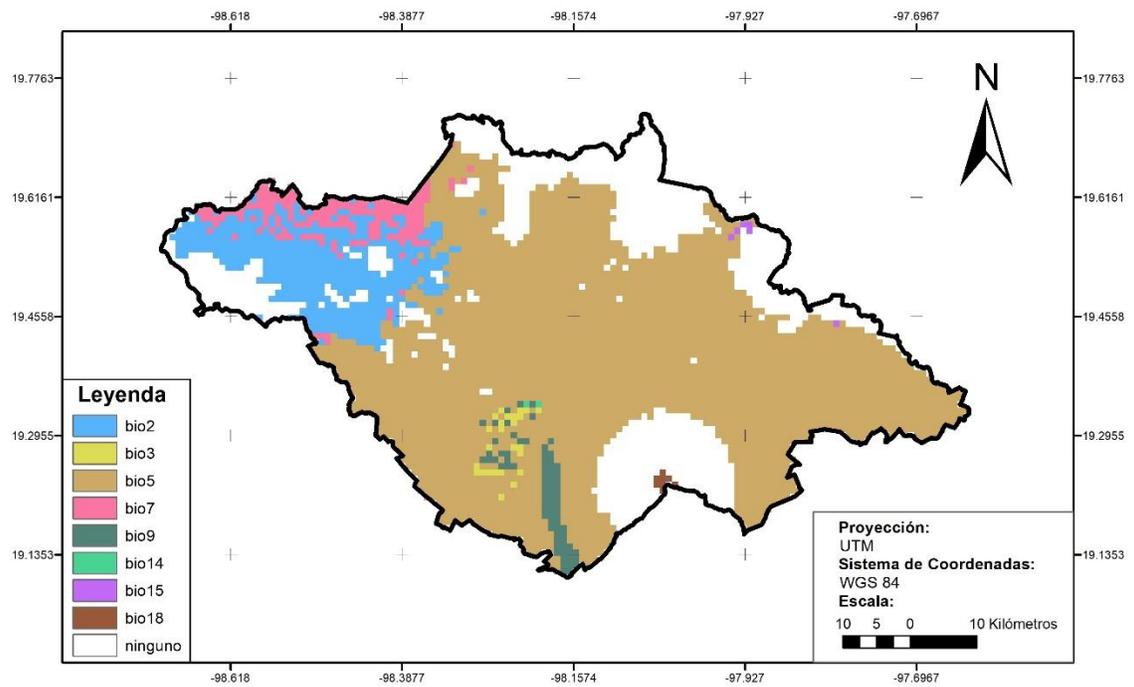


Figura 11. Análisis MoD de las 19 variables bioclimáticas.

Utilizando el análisis Jackknife, la correlación y el análisis MESS se determinaron las variables que se usarían en los modelos. Las variables bioclimáticas por utilizar son: Bio 1, Bio 3, Bio 12, Bio 14 y Bio 18. En la Tabla VI se puede observar el porcentaje de contribución de cada variable al modelo y en la Figura 12 los valores de Jackknife para las variables a utilizar en todos los modelos. Finalmente, en las Figuras 13 y 14 se aprecia el análisis MESS y el MoD donde se puede observar que ninguna variable presenta disimilitud en donde se ha presentado la especie.

Tabla VI. Análisis de contribución de las variables ambientales seleccionadas

Variable	Descripción	% Contribución
Bio1	Temperatura media anual (°C)	30.8
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100)	31.0
Bio12	Precipitación anual (mm)	3.0
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)	20.5
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)	14.6

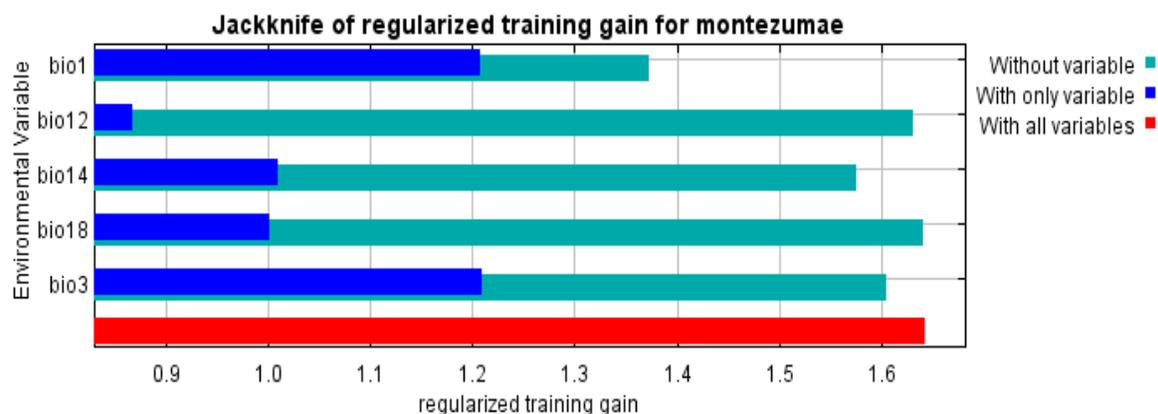


Figura 12. Método Jackknife con las variables bioclimáticas seleccionadas.

MESS

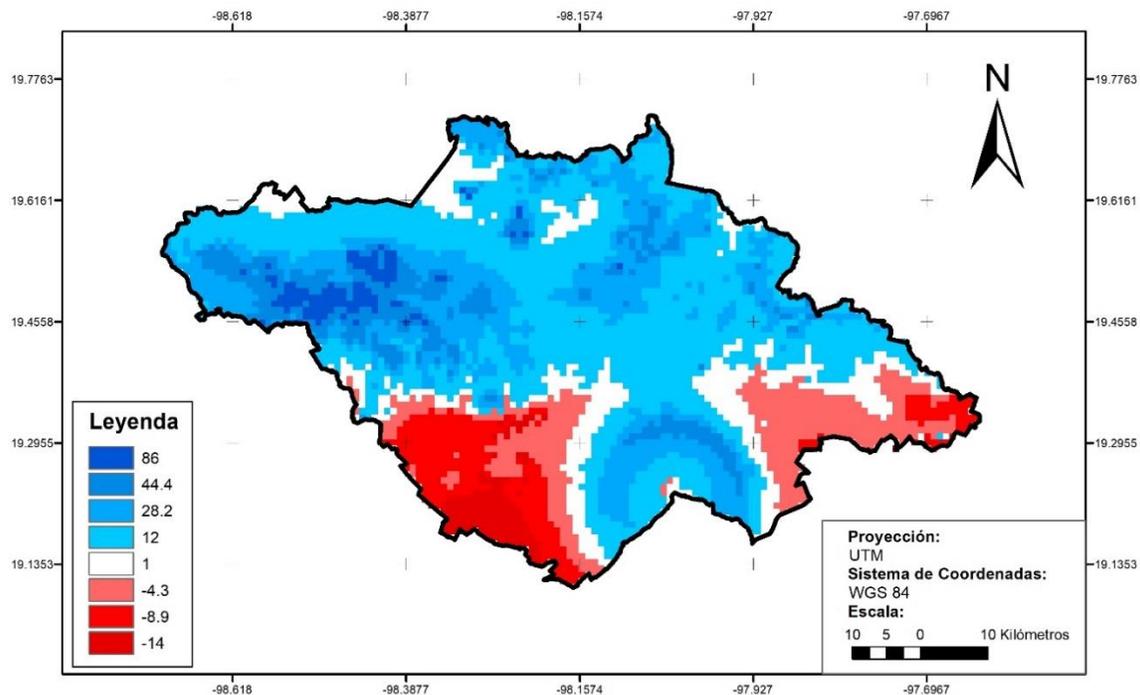


Figura 13. Análisis multivariado MESS de las variables bioclimáticas seleccionadas.

MoD

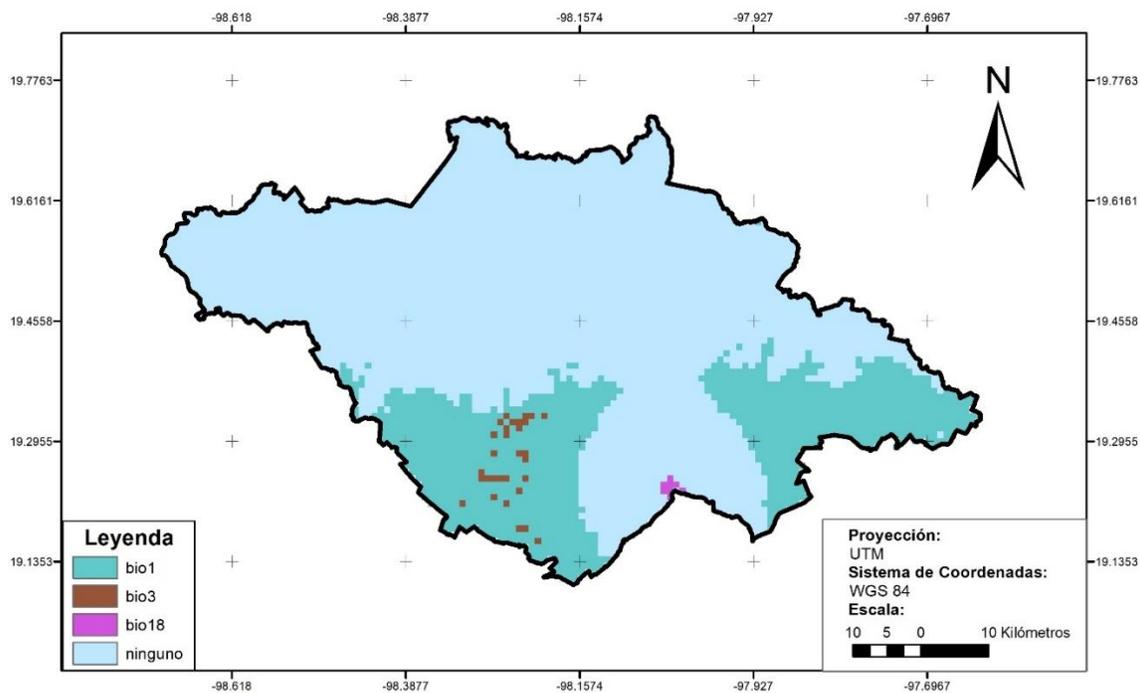


Figura 14. Análisis MoD de las variables bioclimáticas seleccionadas.

ii. Generación de los modelos

A. Escenario base (1960-1990)

Para la distribución potencial actual de *Pinus montezumae* se utilizó el escenario base con un período climático de 1960-1990 con los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura de WorldClim: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.941 lo cual representa que la validación del modelo es excelente. El área óptima alta es de 55 224 ha, la media es de 78 717 ha, y la no óptima es de 270 086 ha.

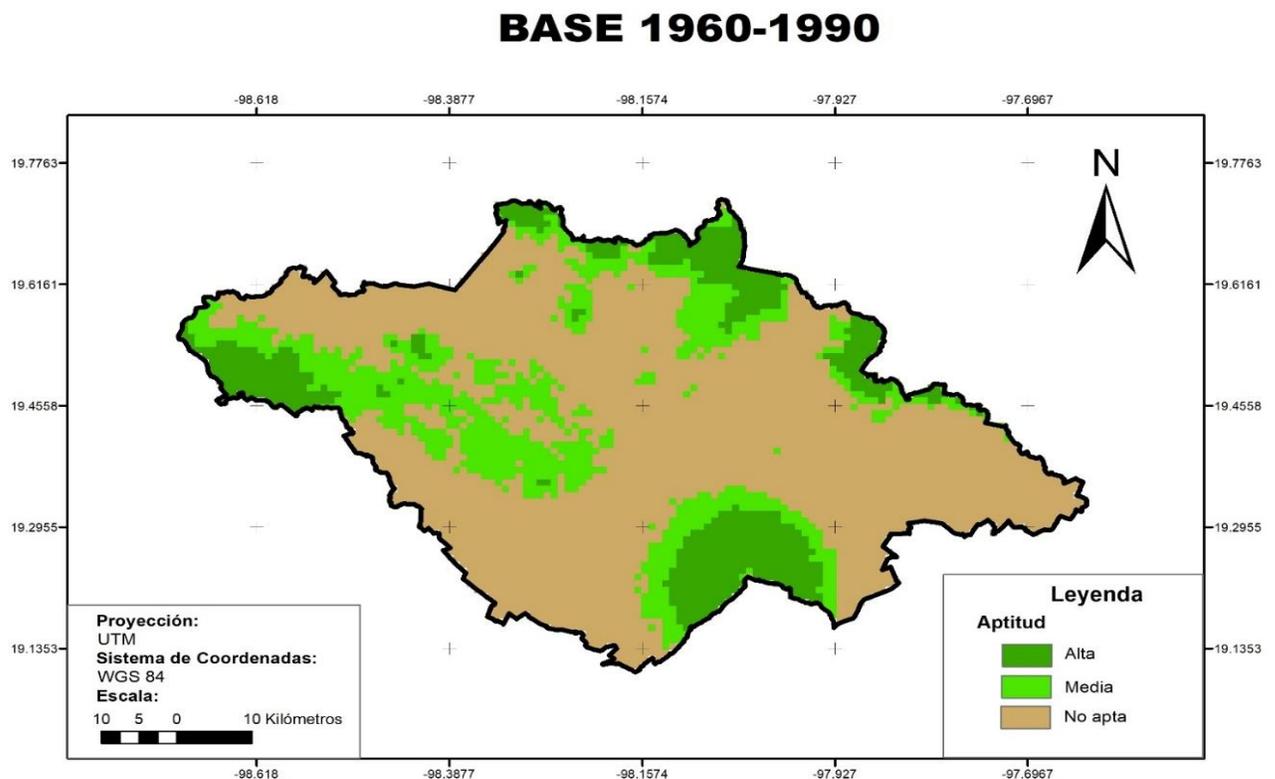


Figura 15. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 1950-2000.

Para el período climático 1950-2000 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 5.1 °C a 16.3 °C y una precipitación anual en un intervalo de 483 mm a 1 344 mm como se puede observar en las Figuras 16 y 17.

Temperatura media anual (°C)

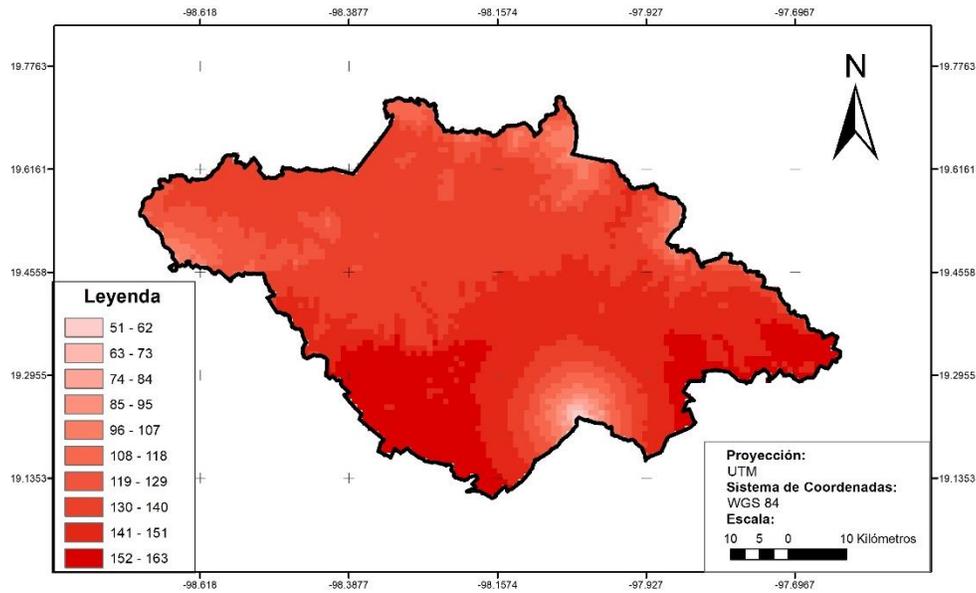


Figura 16. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 1950-2000.

Precipitación anual (mm)

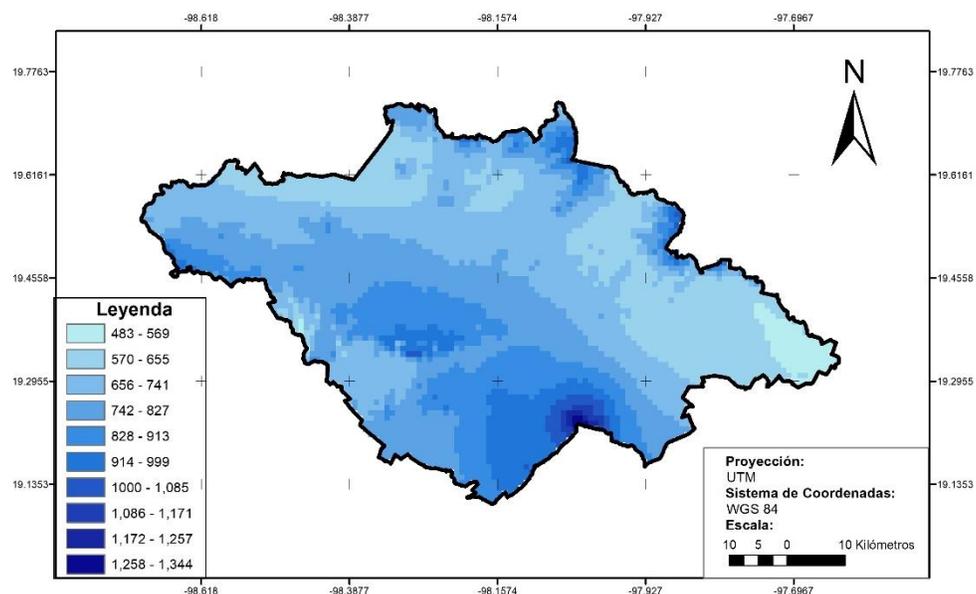


Figura 17. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 1950-2000.

B. Escenario RCP 4.5 (2050)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro cercano con un periodo climático de 2041-2060 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 4.5 (escenario estable). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.94 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 12 807 ha, la media fue de 42 499 ha y la no óptima fue de 348 722 ha, lo cual representa una reducción de área potencial de 59% con respecto al área del escenario base.

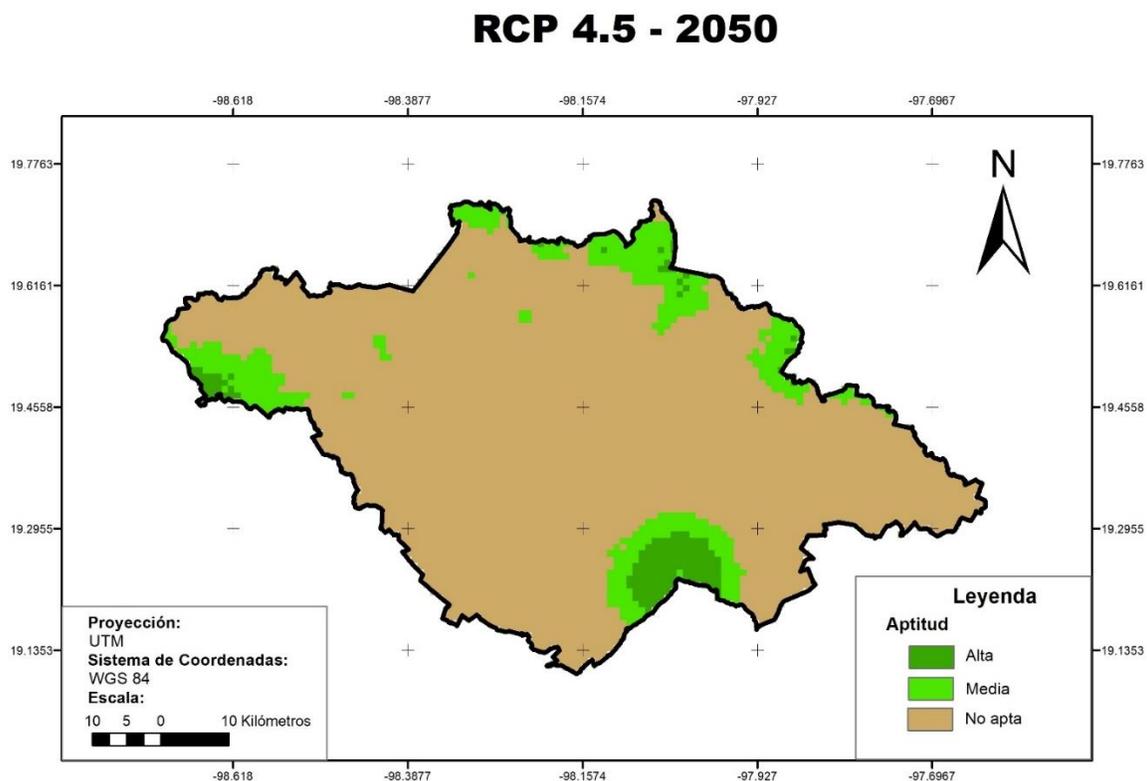


Figura 18. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

Para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 6.9 °C a 18.2 °C y una precipitación anual en un intervalo de 452 mm a 1 245 mm como se puede observar en las Figuras 19 y 20.

Temperatura media anual (°C)

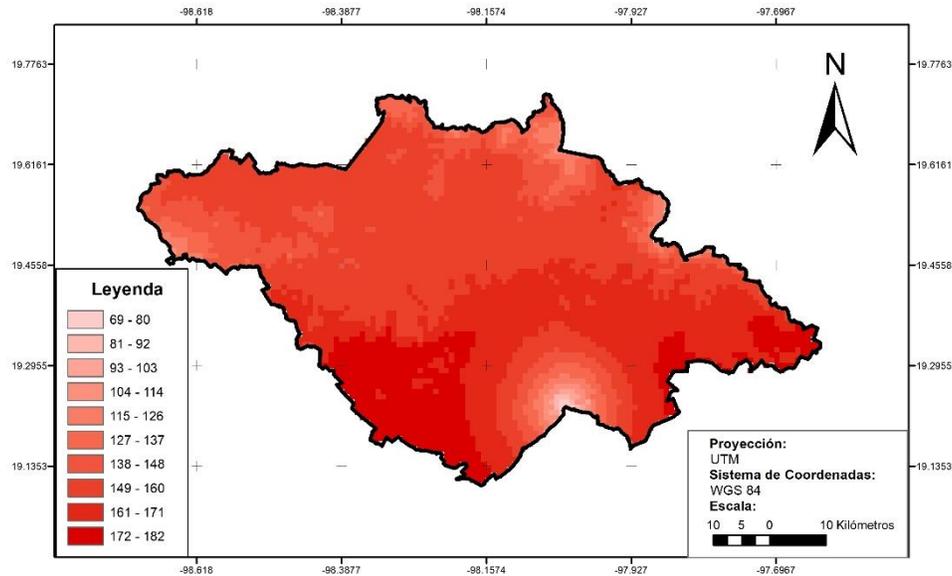


Figura 19. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

Precipitación anual (mm)

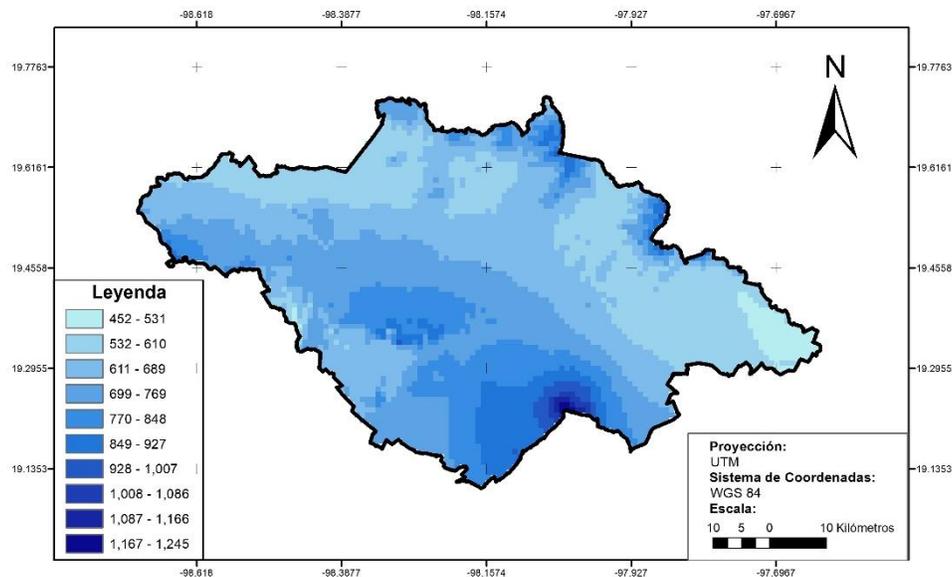


Figura 20. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

C. Escenario RCP 6.0 (2050)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro cercano con un periodo climático de 2041-2060 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 6.0 (escenario creciente). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.943 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 12 073 ha, la media fue de 41 765 ha y la no óptima fue de 350 190 ha. Lo cual representa una reducción de área potencial de 60% con respecto al área del escenario base.

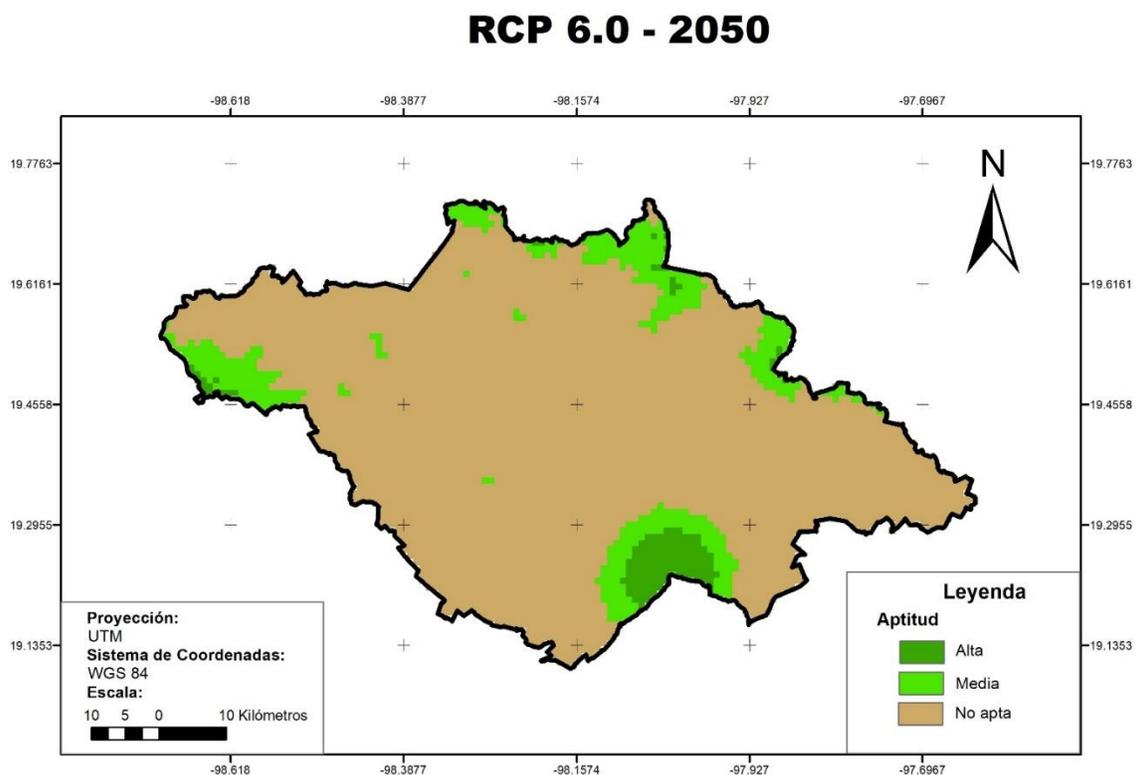


Figura 21. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el periodo climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.

Para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 6.9 °C a 18.1 °C y una precipitación anual en un intervalo de 484 mm a 1 328 mm como se puede observar en las Figuras 22 y 23.

Temperatura media anual (°C)

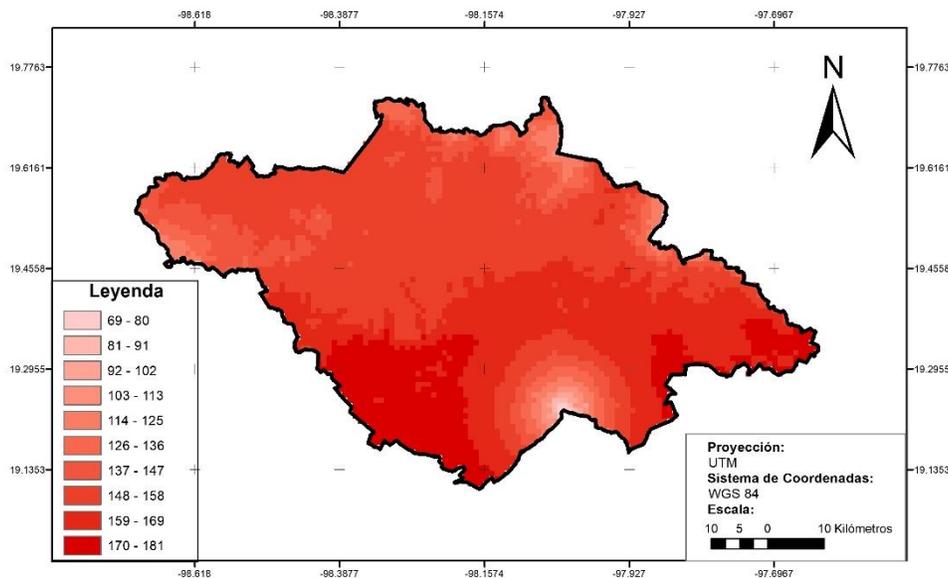


Figura 22. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.

Precipitación anual (mm)

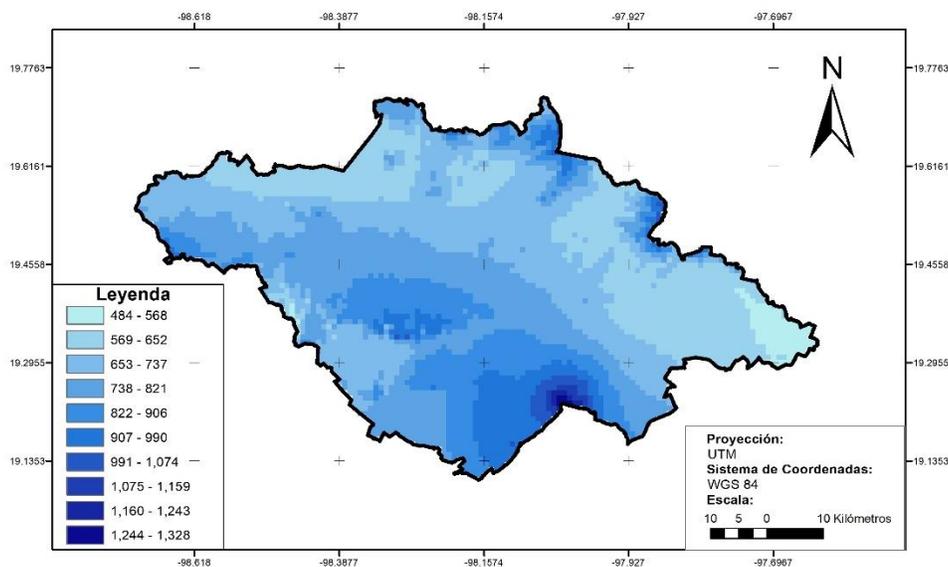


Figura 23. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 6.0.

D. Escenario RCP 8.5 (2050)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro cercano con un periodo climático de 2041-2060 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 8.5 (escenario creciente). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.939 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 10 604 ha, la media fue de 31 405 ha y la no óptima fue de 362 018 ha, lo cual representa una reducción de área potencial de 69% con respecto al área del escenario base.

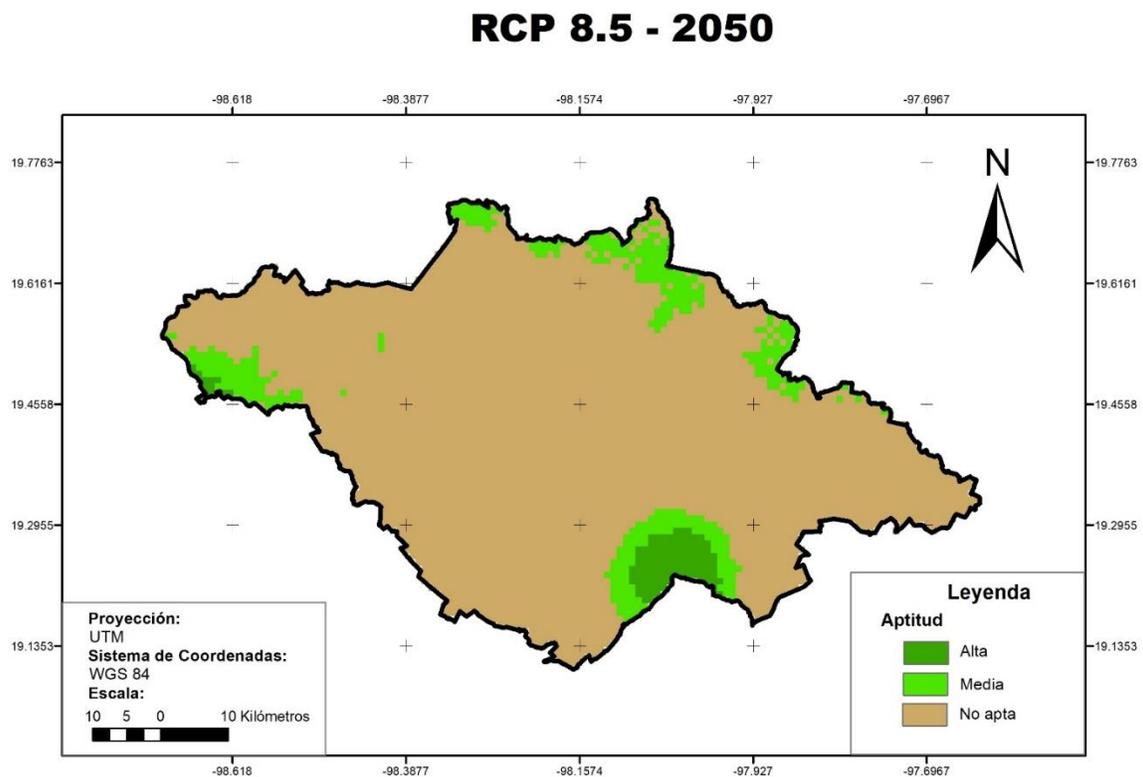


Figura 24. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5.

Para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 7.5 °C a 18.7 °C y una precipitación anual en un intervalo de 442 mm a 1 217 mm como se puede observar en las Figuras 25 y 26.

Temperatura media anual (°C)

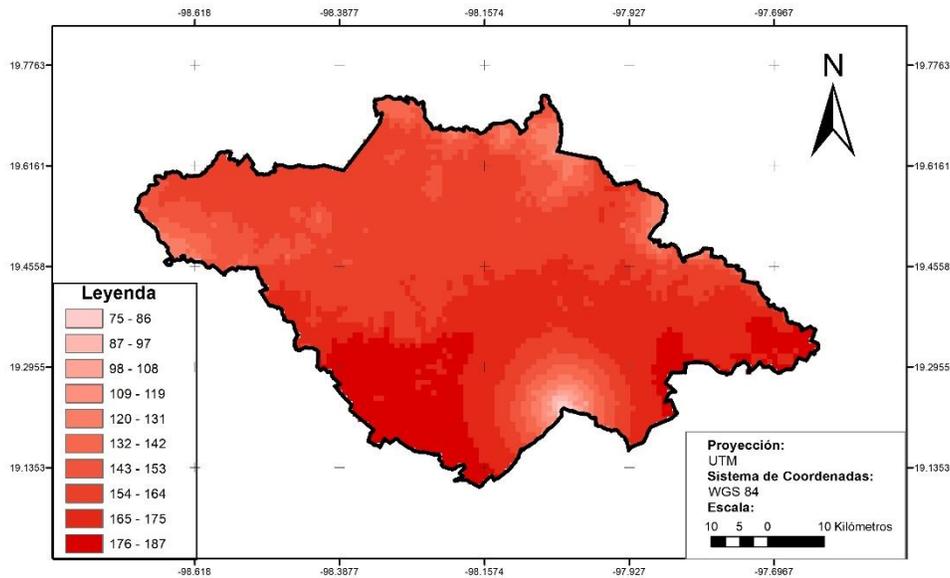


Figura 25. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5.

Precipitación anual (mm)

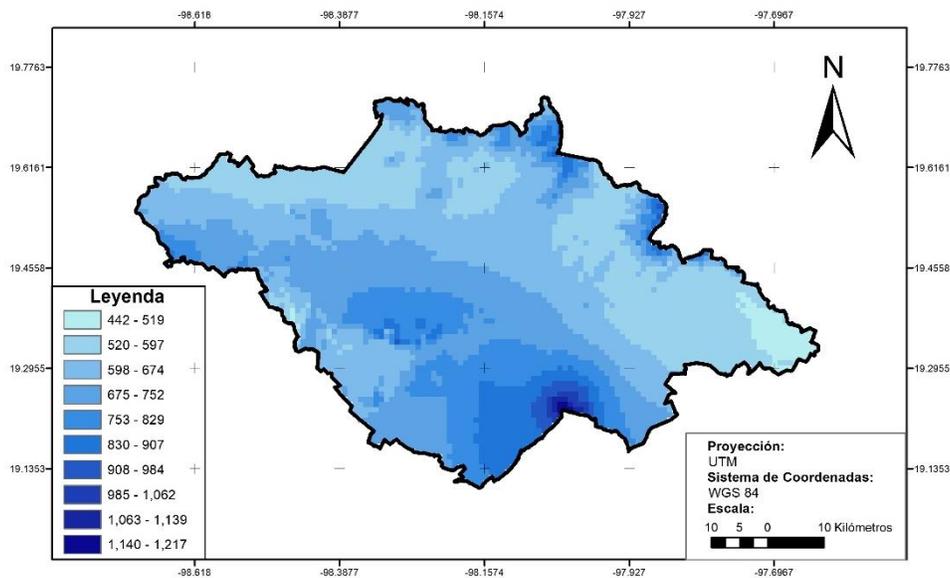


Figura 26. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2041-2060 y forzamiento radiativo RCP 8.5

E. Escenario RCP 4.5 (2070)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro lejano con un periodo climático de 2061-2080 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 4.5 (escenario estable). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.941 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 10 768 ha, la media fue de 40 868 ha y la no óptima fue de 352 392 ha, lo cual representa una reducción de área potencial de 61% con respecto al área del escenario base.

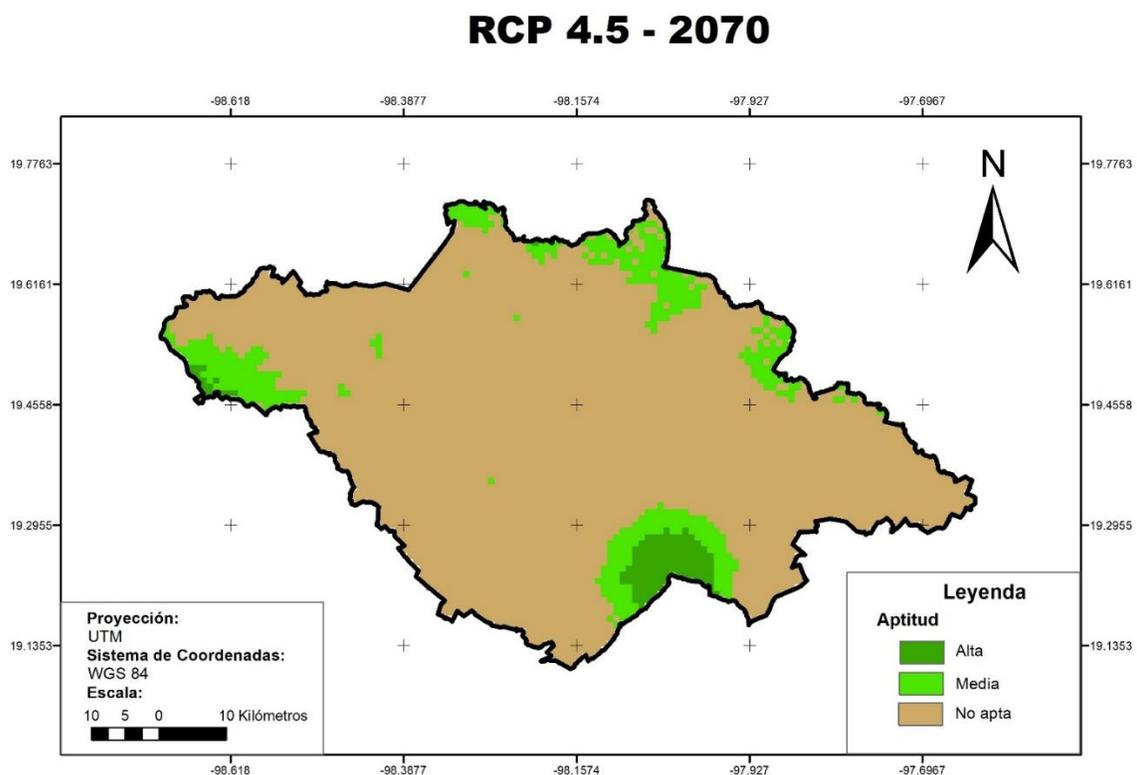


Figura 27. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

Para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 7.3 °C a 18.6 °C y una precipitación anual en un intervalo de 449 mm a 1 224 mm como se puede observar en las Figuras 28 y 29.

Temperatura media anual (°C)

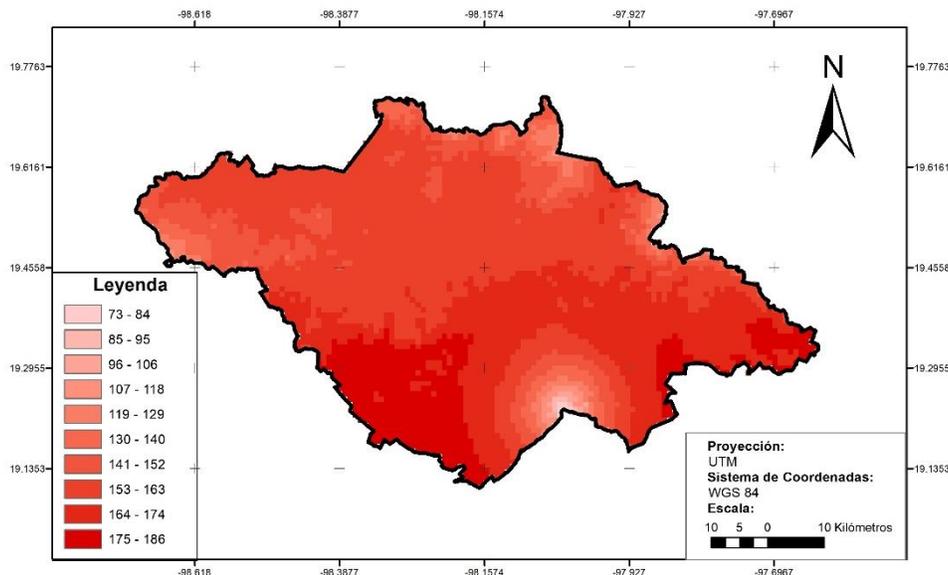


Figura 28. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

Precipitación anual (mm)

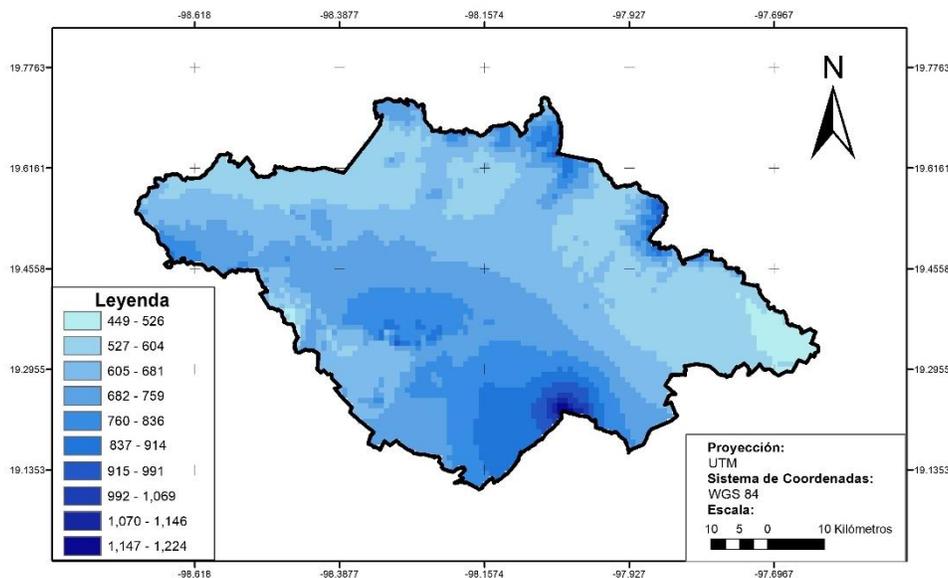


Figura 29. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 4.5.

F. Escenario RCP 6.0 (2070)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro lejano con un periodo climático de 2061-2080 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 6.0 (escenario estable). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.944 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 10 604 ha, la media fue de 34 913 ha y la no óptima fue de 358 510 ha, lo cual representa una reducción de área potencial de 66% con respecto al área del escenario base.

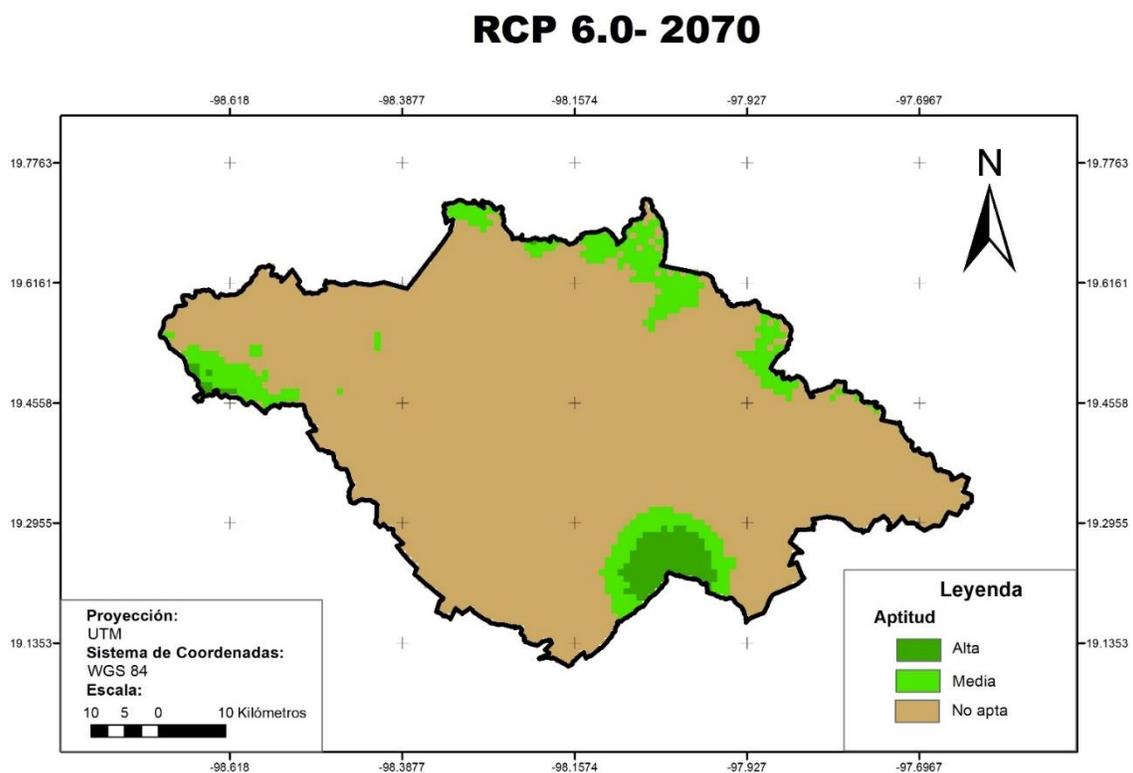


Figura 30. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0.

Para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 7.4 °C a 18.6 °C y una precipitación anual en un intervalo de 462 mm a 1 252 mm como se puede observar en las Figuras 31 y 32.

Temperatura media anual (°C)

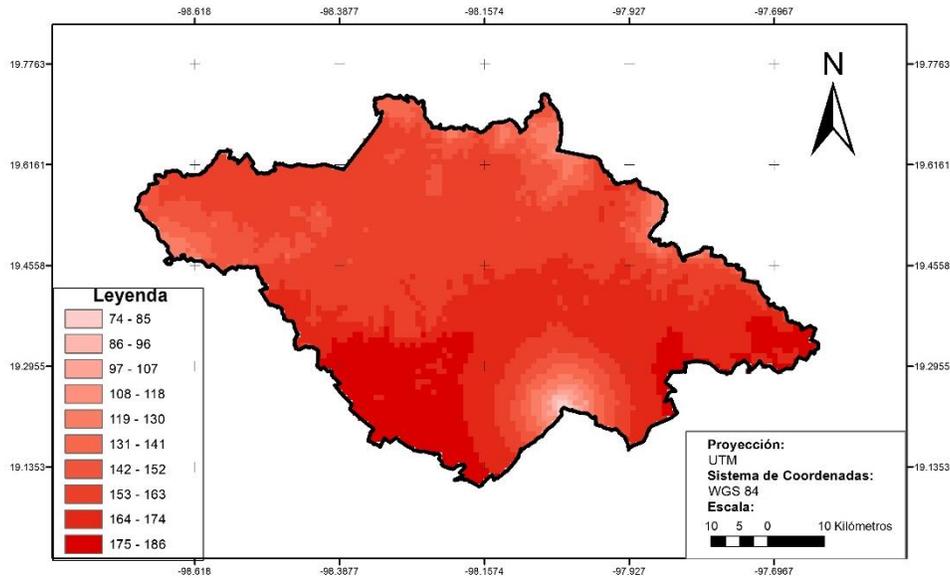


Figura 31. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0

Precipitación anual (mm)

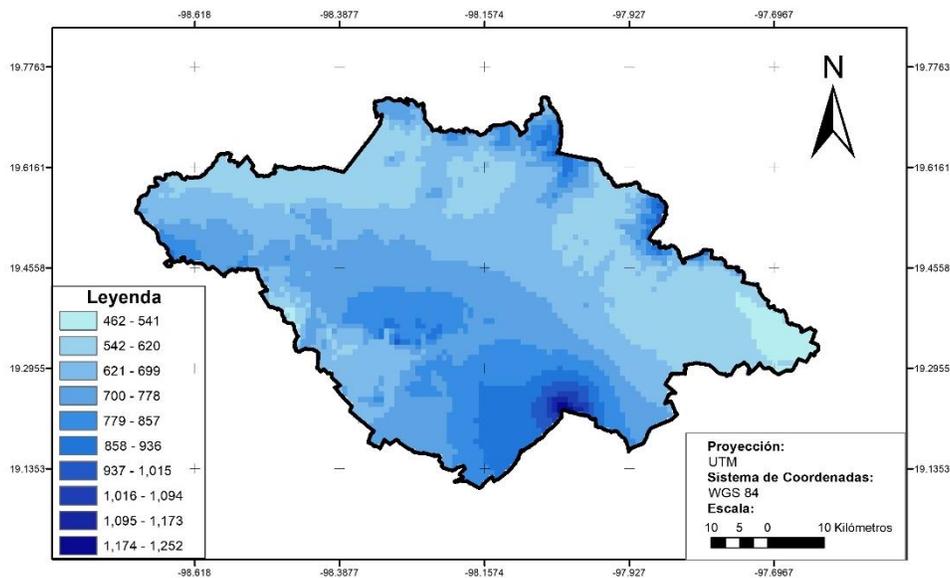


Figura 32. Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 6.0.

G. Escenario RCP 8.5 (2070)

Para la distribución potencial de *Pinus montezumae* para un futuro lejano con un periodo climático de 2061-2080 se utilizó el modelo CCSM4 para el forzamiento radiativo RCP 4.5 (escenario estable). Se emplearon los siguientes parámetros bioclimáticos de precipitación y temperatura del modelo CCSM4: Bio1, Bio3, Bio12, Bio14 y Bio18.

El AUC del modelo es de 0.938 lo cual representa que la validación del modelo es excelente, se puede observar una disminución significativa del área potencial de la especie. El área óptima alta fue de 4 106 ha, la media fue de 12 888 ha y la no óptima fue de 386 979 ha, lo cual representa una reducción de área potencial de 87% con respecto al área del escenario base.

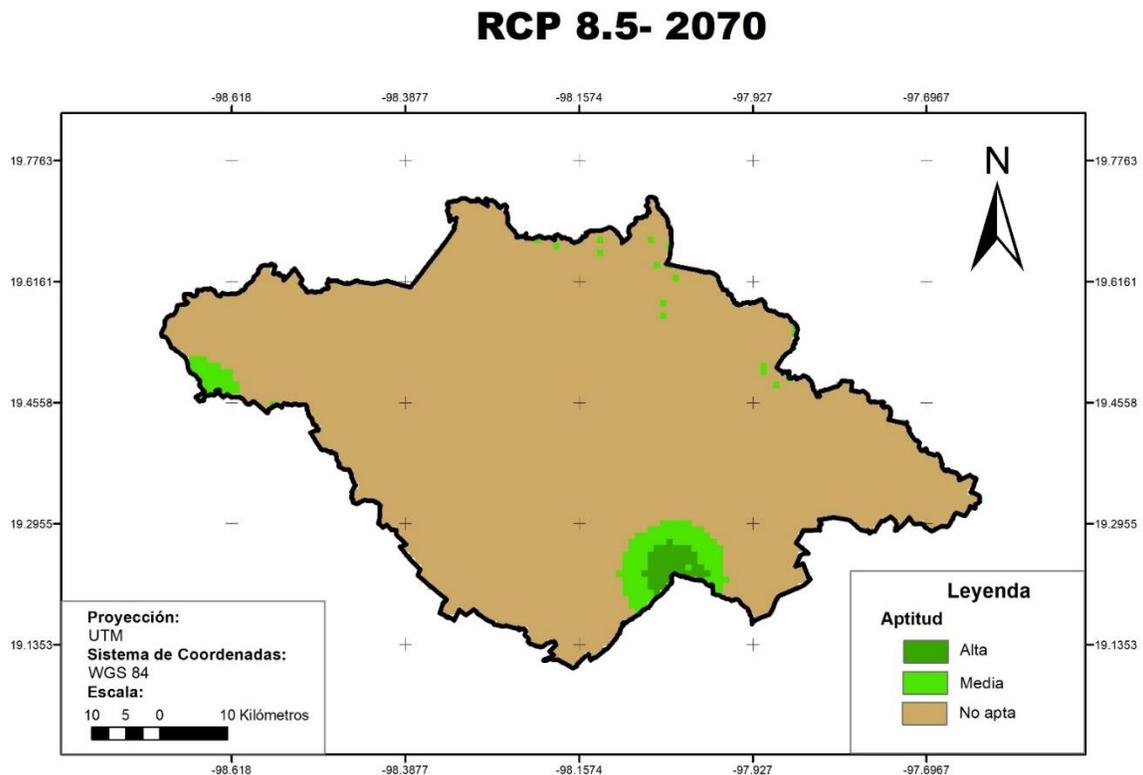


Figura 33. Distribución potencial de *Pinus montezumae* para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.

Para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5 en el estado de Tlaxcala, se presentó una temperatura media anual en un intervalo de 8.5 °C a 19.8 °C y una precipitación anual en un intervalo de 420 mm a 1 139 mm como se puede observar en las Figuras 34 y 35.

Temperatura media anual (°C)

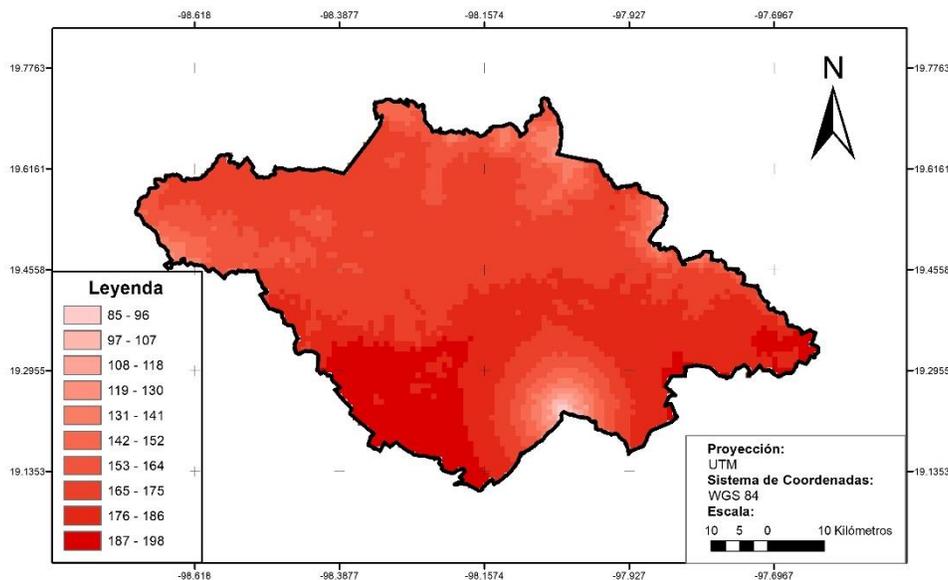


Figura 34. Mapa de isotermas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.

Precipitación anual (mm)

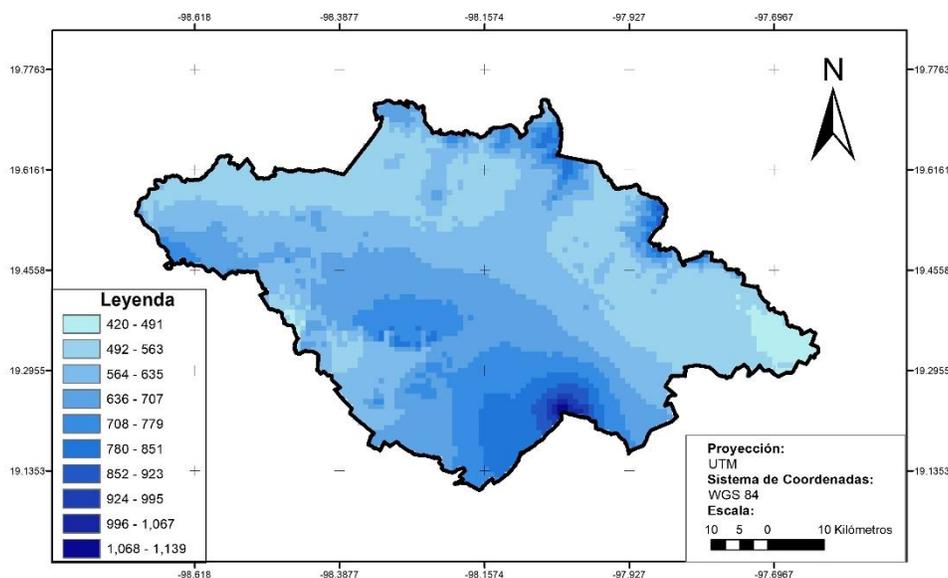


Figura 35 . Mapa de isoyetas del estado de Tlaxcala para el período climático 2061-2080 y forzamiento radiativo RCP 8.5.

En la Tabla VII se presentan las condiciones ambientales extremas de las variables seleccionadas para *Pinus montezumae* en el estado de Tlaxcala para el escenario base y los escenarios futuros.

Tabla VII. Condiciones ambientales extremas de las variables seleccionadas

	Bio1 (°C)	Bio3 (°C)	Bio12 (mm)	Bio14 (mm)	Bio18 (mm)
Base	5.1-16.3	6.8-7.4	483-1344	4-18	187-386
RCP4.5-2050	6.9-18.2	6.7-7.3	452-1245	4-16	176-348
RCP4.5-2070	7.3-18.6	6.7-7.3	449-1224	4-17	165-344
RCP6.0-2050	6.9-18.1	6.7-7.2	484-1328	4-16	170-392
RCP6.0-2070	7.4-18.6	6.8-7.3	462-1252	4-16	174-342
RCP8.5-2050	7.5-18.7	6.7-7.3	442-1217	4-16	160-345
RCP8.5-2070	8.5-19.8	6.7-7.1	420-1139	4-15	156-314

En la Tabla VIII se observan las áreas potenciales para la distribución actual, futuro cercano y futuro lejano para las distintas trayectorias de concentración y su correspondiente porcentaje de reducción de área con respecto al escenario base.

Tabla VIII. Áreas potenciales para la distribución actual, 2050 y 2070.

Escenario	Área no óptima (ha)	Área óptima media (ha)	Área óptima alta (ha)	Área óptima (ha)	% Reducción
Base	270086	78717	55224	133942	NA
RCP4.5-2050	348722	42499	12807	55306	59
RCP6.0-2050	350190	41765	12073	53838	60
RCP8.5-2050	362018	31405	10604	42010	69
RCP4.5-2070	352392	40868	10768	51635	61
RCP6.0-2070	358510	34913	10604	45517	66
RCP8.5-2070	386979	12888	4160	17049	87

iii. Evaluación y validación de los modelos

Para evaluar el rendimiento del modelo se realiza a partir de la tasa de omisión. En la Figura 36 se puede observar la gráfica de omisión y área pronosticada de una repetición del modelo, la línea roja es la fracción de los datos de fondo predichos, la línea negra indica la omisión predicha, la línea azul indica la omisión en las muestras de entrenamiento y la línea verde la omisión en las muestras de prueba. En la Figura 37 se puede observar la gráfica de omisión y área pronosticada promedio de 30 repeticiones para la generación del modelo.

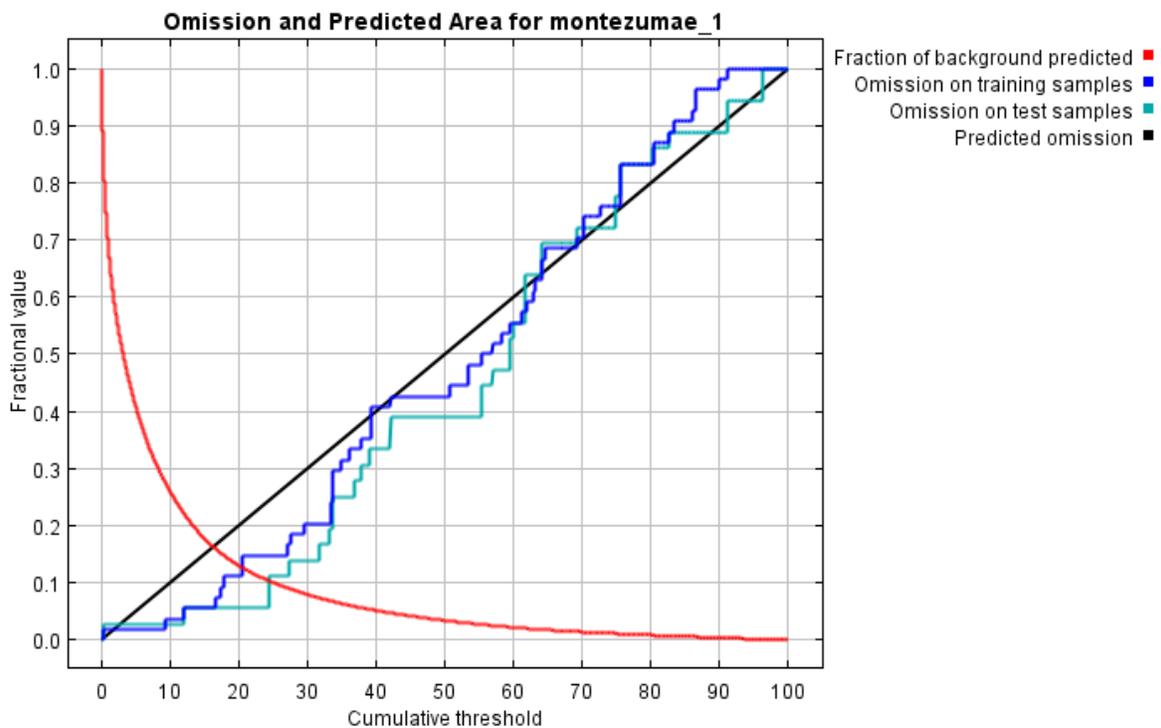


Figura 36. Gráfica de omisión y área pronosticada para una de las réplicas.

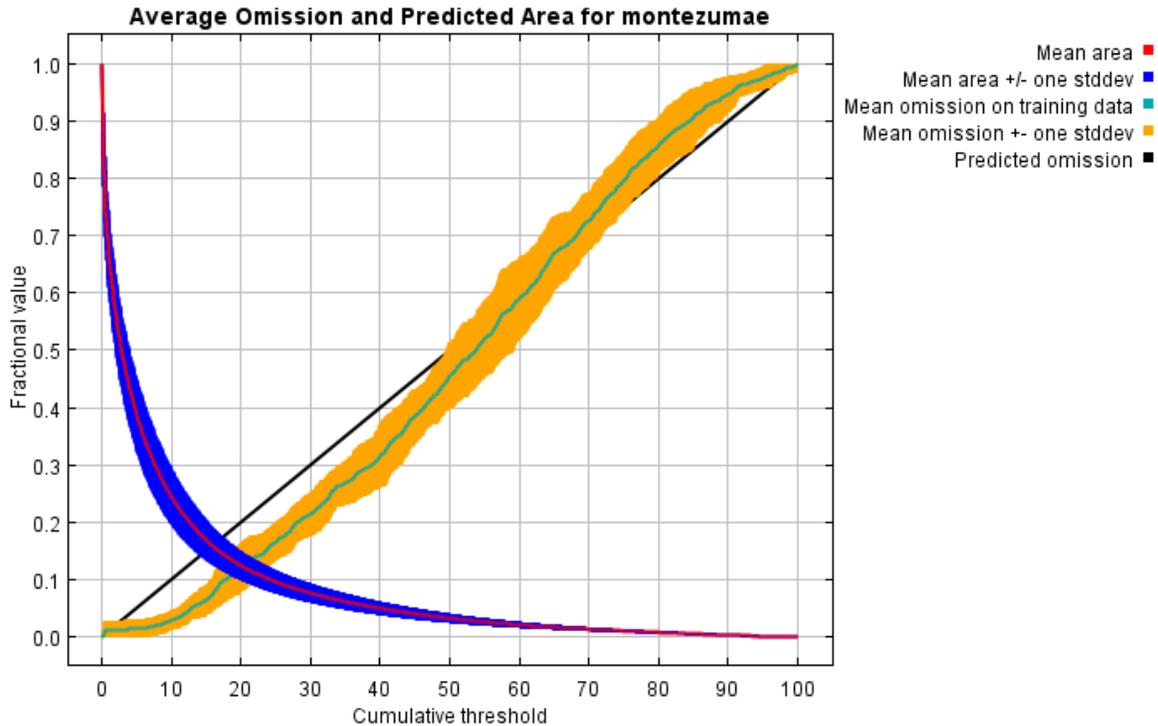


Figura 37. Gráfica de omisión y área pronosticada promedio de 30 réplicas.

Se puede observar que la omisión de las muestras de entrenamiento (línea azul) está junto a la omisión predicha (línea negra) por lo tanto se considera que las ocurrencias son independientes entre cada una de ellas. Este comportamiento se observó en todos los escenarios generados.

Si la omisión de las muestras de entrenamiento (línea azul) aparece debajo de la omisión predicha (línea negra) es posible que el modelo se haya sobre ajustado esto se debe a la dependencia de los puntos (Phillips *et al.*, 2009)

Para evaluar la capacidad de predecir los modelos generados por MaxEnt se utilizó el AUC, de la curva ROC. En la Figura 38 la línea roja muestra como es el ajuste de los datos de entrenamiento en el modelo, la línea azul muestra el ajuste de los datos de prueba en el modelo. La línea negra muestra la línea que se espera si el modelo no fuera mejor que un modelo aleatorio.

En la Figura 39 se muestra la curva ROC promedio de 30 repeticiones para la generación del modelo. Se observa en azul el promedio para cada una de las repeticiones, en color rojo el promedio de todas las repeticiones y en color negro la predicción aleatoria.

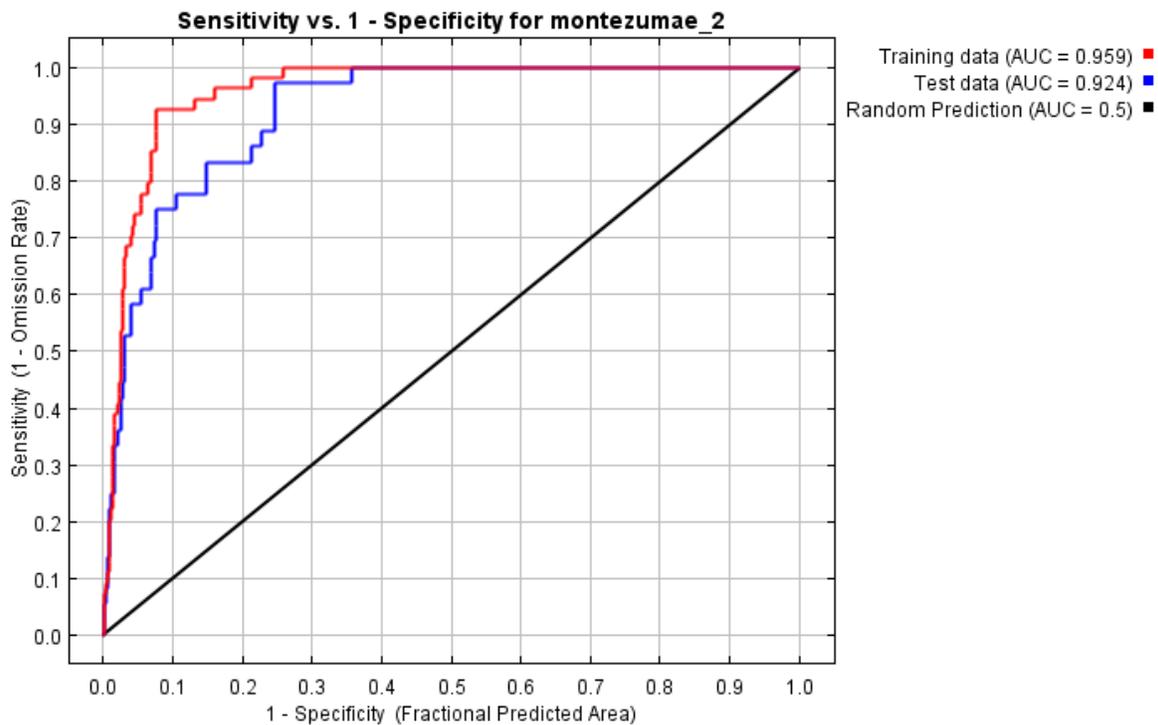


Figura 38. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) para una de las réplicas.

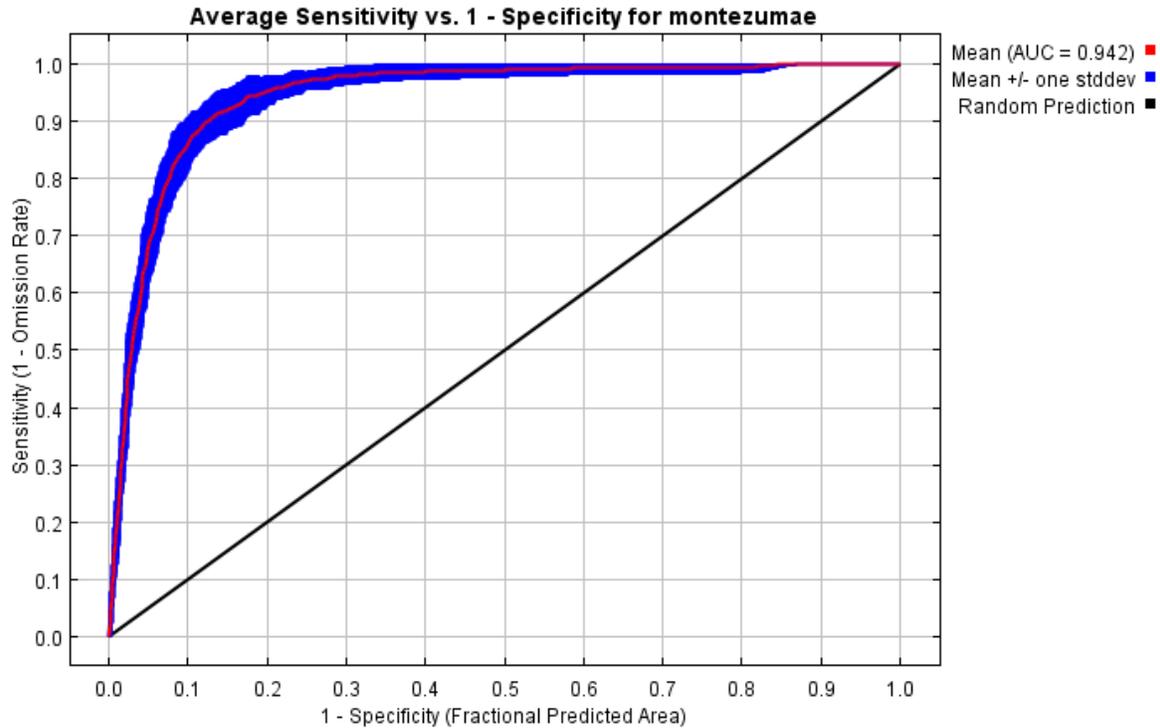


Figura 39. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) promedio de 30 réplicas.

Se puede observar que el AUC generado en los distintos escenarios fueron de 0.938 a 0.944, por lo que, de acuerdo con Araújo *et al.*, (2005) son considerados excelentes.

Si la línea de prueba (línea azul) cayera debajo de la predicción aleatoria (línea negra), esto indicaría que el modelo se comporta peor que un modelo aleatorio. Cuanto más hacia la parte superior izquierda del gráfico esté la línea azul, mejor será el modelo para predecir las presencias contenidas en los datos de prueba.

iv. Cálculo de los servicios ecosistémicos

En la Tabla IX se observa la cantidad de agua de niebla captada en milímetros por hora y de captación de CO₂ en Megagramo de carbono a partir del área potencial del escenario base y de los escenarios futuros. Así como la reducción de la captación de agua de niebla y la reducción de la captación de dióxido de carbono de los escenarios futuros con respecto al escenario base.

Tabla IX. Cálculo de los servicios ecosistémicos de *Pinus montezumae* para el escenario base, futuro cercano y futuro lejano.

Modelo	Captación de agua de niebla (mm/h)	Captación de dióxido de carbono (MgC)	Reducción de agua de niebla (mm/h)	Reducción de dióxido de carbono (MgC)
Base	56 576 978	17 372 240	NA	NA
RCP 4.5_2050	23 361 261	7 173 190	33 215 716	10 199 049
RCP 6.0_2050	22 741 051	6 982 752	33 835 927	10 389 488
RCP 8.5_2050	17 744 911	5 448 662	38 832 067	11 923 577
RCP 4.5_2070	21 810 735	6 697 094	34 766 243	10 675 146
RCP 6.0_2070	19 226 525	5 903 599	37 350 453	11 468 641
RCP 8.5_2070	7 201 333	2 211 205	49 375 645	15 161 035

Por cada hectárea de *Pinus montezumae* perdida, se reduce la captación de agua de niebla en 422 milímetros por hora mientras que la reducción de la captación de dióxido de carbono por hectárea perdida es de 130 Megagramos de carbono.

IX. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que el cambio climático promoverá variaciones significativas en los índices de precipitación y temperatura y en la distribución de la especie *Pinus montezumae* en el estado de Tlaxcala.

Varios autores concuerdan que el cambio climático afecta directamente a los bosques. Villers y Trejo (2004) mencionan que con el cambio climático habrá un aumento en los climas cálidos húmedos y secos, mientras que los climas templados fríos y semicálidos serán más sensibles e incluso, con tendencia a desaparecer debido al incremento de temperatura. Arriaga y Gómez (2007) indican que los bosques de coníferas y encinos son los que reportan un mayor riesgo por el efecto del cambio climático y que algunas de las especies más afectadas por estos cambios serán las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*.

Los resultados de este estudio muestran una disminución significativa de área potencial óptima de un 59% a un 87% con referencia al escenario base para un horizonte lejano cercano 2050 y horizonte lejano futuro 2070 para distintas trayectorias de concentración representativas en el estado de Tlaxcala. Estos resultados concuerdan con Pérez *et al.* (2014) quienes evidenciaron una disminución importante en la aptitud del terreno para *P. montezumae* en el Estado de México, en contraste con la superficie forestal de coníferas ante escenarios de cambio climático. Hubo una reducción para la aptitud media de 25.41% y para la aptitud alta de 97% para el año 2030 y una reducción sustancial del terreno para la aptitud media de 48.72% y para la aptitud alta de 98%. Arriaga y Gómez (2007) reportan que la disminución de *Pinus montezumae* para el año 2050 es de 10.59% para México. A diferencia de los resultados presentados en Pérez *et al.* (2014), Arriaga y Gómez (2007) y en el presente trabajo; en el trabajo de Cruz *et al.* (2016) mencionan un aumento en la distribución actual, para el horizonte cercano un aumento del 6.15% con respecto a la distribución actual y para el horizonte lejano un aumento de 4.55% con respecto a la distribución actual del estado de Michoacán.

Los resultados observados en estos estudios y en el estudio actual exceptuando el de Cruz *et al* (2016) muestran conclusiones similares a los presentados por Villers y Trejo (1997), que confirman que especies con afinidades a climas templados, tenderán a reducir su representación en el país; por Villers y Trejo, (1998) que indican que las zonas de vida que disminuirán o incluso pueden desaparecer son los bosques de clima frío y húmedos, de clima templados como los bosques de coníferas y por Arriaga y Gómez (2007) que concuerdan que los tipos de vegetación más afectados negativamente por el cambio climático serán los bosques de coníferas y encinos y los bosques mesófilos de montaña.

Las especies de coníferas dependen en gran medida de las variables climáticas, pero su distribución se modifica por el cambio climático (Aceves, 2017). La variable climática más significativa en el actual trabajo fue Bio 1 la cual representa la Temperatura media anual (°C) lo cual concuerda con lo presentado con Aceves (2017) donde las variables que más contribuyen a la predicción actual de la distribución de las especies de Pino son Bio 1, Bio 10 y altitud; así como lo declarado por Ramos *et al.*, (2017) que basado en la prueba de Jackknife la variable que mayor contribución tuvo en la mayoría de los modelos incluyendo el de *Pinus montezumae* fue Bio1.

Con este trabajo se demuestra que las variables climáticas pueden tener efectos en la distribución potencial de *Pinus montezumae* que concuerda con lo encontrado con Pérez *et al.* (2004) que indican que la desaparición de las condiciones ambientales propicias para el crecimiento de *Abies religiosa* y *Pinus montezumae* constituyen una amenaza para sus poblaciones, en particular, por el incremento térmico que modificará los límites de su distribución originando un desplazamiento hacia el norte, fundamentalmente, porque son especies intolerantes a las altas temperaturas.

Una disminución en la distribución potencial de la especie implica una afectación directa en los servicios ecosistémicos proporcionados por la especie, como es la captación de niebla y la captación de dióxido de carbono.

Otro tipo de precipitación que generalmente no se toma en consideración, es la precipitación indirecta, la cual se produce a partir de la niebla. Esta, al ser acarreada por el viento y colectada por cualquier tipo de superficie como son los árboles se precipita. Mediante este evento la vegetación en general y los árboles en particular contribuyen con una cantidad abundante de agua que se pasa por alto en el balance hidrológico de una región (Barradas, 1983).

En este trabajo se presenta que por cada hectárea de *Pinus montezumae* perdida, se reduce la captación de agua de niebla en 422 milímetros. Este valor se obtuvo a partir de los resultados mencionados por Barradas (1983, 2000) que indican que *Pinus montezumae* es capaz de precipitar 57.9 litros por hora por individuo equivalente a 0.88mm por hora por individuo a partir de la niebla.

Cabe resaltar que existen muy pocos trabajos sobre captura de agua a partir de la niebla por especies de Pino. En México se menciona sólo la captación de *Pinus montezumae* en el estado de Veracruz (Barradas, 1983). En el continente americano se encontró sólo la de *Pinus radiata* (Parsons, 1960) en el estado de California, Estados Unidos con una captura estimada de agua de niebla de 1.016 mm por hora; se registró una captación de agua de niebla de 254 mm durante los meses de verano. En todo el mundo se encontró sólo el de *Pinus pumila* (Uehara y Atsushi 2012) con una captación de niebla de 0.14 mm por hora.

Se puede observar que hay pocos estudios de captación de agua en pinos, la mayoría se hace de manera artificial, como el de Jofre *et al.* (2015) donde utilizaban un mosquitero de 3m², 1m de altura, ubicada en un poblado cerca de la microcuenca de Pixquiac, Veracruz y la recolección de la malla fue en promedio de 1.16mm por día.

Otro servicio que proporciona *Pinus montezumae* es la captación de dióxido de carbono. La capacidad de medir con precisión el carbono almacenado en los bosques está ganando cada vez más atención a nivel mundial en reconocimiento del rol que tienen los bosques en el ciclo global del carbono, en particular con respecto a la mitigación de las emisiones de dióxido de carbono. En una escala

global, los cambios en la cubierta forestal han sido y son fuentes netas de dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (Brown, 2020).

En este trabajo se presenta que por cada hectárea de *Pinus montezumae* perdida, la reducción de la captación de dióxido de carbono por hectárea perdida es de 130 Megagramos de carbono.

Este valor se obtuvo a partir de Castro y Tucker (2009) que indican que para *Pinus montezumae* su correspondiente contenido de carbono es de 129.7 Megagramos de Carbono por hectárea. Los bosques que se encuentran en los municipios de Huamantla, Teolocholco, Tepatlaxco, San Francisco Tetlanohcan y Zitlaltepec que presentan un grado de conservación y alta calidad de carbono almacenado son los compuestos por comunidades de *Pinus montezumae*, *Abies religiosa* o una combinación de ambas.

Considerando los resultados obtenidos acerca de la distribución potencial en distintas especies de Pinos sometidos a diferentes escenarios de cambio climático en este y varios trabajos; concuerdan que con el cambio climático las áreas potenciales de las especies forestales de climas templados se verán reducidas en gran porcentaje en años venideros. Por ello, es de gran importancia tomar medidas encaminadas a la protección, conservación, mantenimiento, planes de manejo para la adaptación y mitigación de ésta y otras especies forestales por su importancia social, económica y ecológica como son los servicios ecosistémicos que nos brindan.

X. CONCLUSIONES

Los modelos de distribución de especies son una herramienta numérica muy útil que desarrolla relaciones entre las especies y las variables ambientales que serían difíciles de analizar y estudiar por otros medios. Los modelos generados en este trabajo se pueden considerar confiables, ya que los valores de AUC fueron superiores a 0.93.

De las 19 variables bioclimáticas se emplearon Bio1 (Temperatura media anual °C), Bio3 (Isotermalidad), Bio12 (Precipitación anual mm), Bio14 (Precipitación del mes más seco) y Bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), las cuales fueron seleccionadas debido a que presentan mayor significancia en el modelado de distribución de especies, las que evitan la correlación entre variables y la que de acuerdo al análisis multivariado MESS disminuyen la disimilitud entre las variables actuales y las futuras.

Al observar las condiciones climáticas actuales y futuras se puede apreciar que la temperatura anual media de cada modelo presentó un aumento en un 35% a un 67% en comparación al escenario base y en la precipitación anual habrá un decremento de un 0.2% a un 13% en el estado de Tlaxcala.

La distribución potencial actual determina ciertas zonas como altamente viables que cuenta con las condiciones ambientales favorables para *Pinus montezumae* en el estado de Tlaxcala como es la zona norte de Tlaxco, la zona noreste de Terrenate, la zona noroeste de Nanacamilpa y la zona de La Malinche, estos sitios proporcionan 133 941 hectáreas de áreas potenciales adecuadas disponibles para la especie.

La distribución espacial de *Pinus montezumae* en el estado de Tlaxcala bajo escenarios de cambio climático para el horizonte futuro cercano 2050 y el horizonte futuro lejano 2070 tiende a reducirse en cuanto al área potencial con respecto al escenario base de un 59% a un 87%

Los modelos de distribución potencial de especie para la trayectoria de concentración representativa 8.5 presentó la mayor disminución de la distribución potencial con una reducción del 69% con respecto al escenario base para el horizonte futuro cercano 2050 y una reducción del 87% con respecto al escenario base para el horizonte futuro lejano 2070, mientras que con la trayectoria 4.5 presentó la menor disminución de área potencial con una reducción de 59% con respecto al escenario base para el horizonte futuro cercano 2050 y una reducción del 61% con respecto al escenario base para el horizonte futuro lejano 2070, con lo que se acepta la hipótesis de trabajo.

XI. LITERATURA CITADA

- Aceves, L. 2017. Distribución Potencial Actual de 20 Especies de Pinos en México. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Aguirre, O. 2013. Modelización del crecimiento de *Pinus teocote* Schltld. et Cham. en el noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 4(17): 28-41.
- Araújo, M., Pearson, R., Thuillers, W., y Erhard, M. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. Global Change Biology 11: 1504-1513.
- Arias, A., y Chávez, A. 2006. Resina: entre la madera y el desarrollo comunitario integra. CONABIO. . Biodiversitas 65: 1-7.
- Arriaga, L., y Gómez, L. 2007. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En: Martínez, J. y Fernández, A. (Comp.) Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1ª ed. México, D.F. pp. 255-265.
- Barradas, V. 1983. Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* Lambert, de la región de las grandes montañas del estado de Veracruz. Biotica. 8(4): 427-431.
- Barradas, V. (2000). La importancia de la niebla como fuente natural y artificial de agua en la región de las grandes montañas del estado de Veracruz, México. Foresta Veracruzana. 2(2): 43-48.
- Brown, S. (2020). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution. 116: 363-372.
- Bruijnzeel, L. A., y Hamilton, L. S. 2000. Decisions time for cloud forests. IHP Humid Tropics Programme Series. 13: 1-36
- Carillo, F., Acosta, M., Flores, E., Juárez, J., y Bonilla, E. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5(5): 779-793.
- Castro, F., y Tucker, T. .2009. Políticas forestales en la Malinche. La captura de carbono como una alternativa de desarrollo local. En Castro, Francisco. y Tucker, Tim (Comp.). Matlacuéyetl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo. Ed. El Colegio de Tlaxcala. Tlaxcala, México. 341-366.
- CEA. .2010. Sistemas de Información Geográfica. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <http://sig.cea.es/SIG>
- CMNUCC. 1992. Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. ONU. 2-26
- CONABIO. 2008. Claves taxonómicas para la identificación de los pinos del noreste de México. Recuperado el 12 de Marzo de 2018, de <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfH038Clave%20taxonomica.pdf>

- CONABIO. 2008. Nichos y Áreas de distribución. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <http://nicho.conabio.gob.mx/home/proposito-y-guia-del-usuario>
- CONAFOR. 2013. Bosques, cambio climático y REDD en México. Guía básica. 2ª ed. Jalisco, México.
- CONAFOR. 2015. Ficha Técnica de *Pinus montezumae*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017 de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/971Pinus%20montezumae.pdf>
- Correia, M. J. 2018. Criterios confiables para la construcción del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt) orientados a la pesquería con red de cerco en el pacífico oriental. Primera Parte. COFA. 11: 13-17.
- Correia, M. J. 2018. Criterios confiables para la construcción del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt) orientados a la pesquería con red de cerco en el pacífico oriental. Segunda Parte. COFA. 3: 8-13.
- Cruz, G., López, L., Silva, J., Bernal, N., Estrada, F., y López, J. 2016. Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 2(21): 135-148.
- Cruz, G., Villaseñor, J., López, L., Martínez, E. y Ortiz, Enrique. 2014. Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en MaxEnt. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 20(2): 187-201.
- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., y Dudík, M. .2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Biodiversity Research. 17: 43-57.
- Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M., Illoldi-Rangel, P., y González-López, R. 2013. Identification of areas of endemism from species distribution models: Threshold selection and Neartic Mammals. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 16(1): 5-17.
- FAO. 2006. El aumento de la temperatura modificará la distribución mundial de los bosques. FAO Sala de Prensa.
- FAO. 2006. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Roma.
- FAO. 2006. Los bosques y el cambio climático. FAO Sala de Prensa.
- FAO. 2015. Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>
- FAO-CONAFOR. 2011. Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. Informe Final del proyecto TCP/MEX/3301/MEX. México.
- Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., y Conde Álvarez, A. C. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNIATMOS.

- Fernández, J., y López, J. 2005. Biodiversidad del Parque Nacional Malinche. 1ª ed. México.
- Flores, N., Mendizábal, L., y Alba, J. 2012. Potencial de captura y almacenamiento de CO₂ en el valle de perote. *Foresta Veracruzana*. 14(1): 17-22.
- Fymat, A., y Kapalanga, J. .2018. *Advancing Africa's Sustainable Development: Proceedings of the 4th Conference on Science Advancement* . 1ª ed. Reino Unido: Cambrigde Scholars Publishing.
- Galeana, J., Benjamín, J., y Corona, N. 2013. Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques*. 19(1): 53-69.
- Galicia, L., y Zarco-Arista, A. 2014. Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*. 10(4): 275-288.
- García, A., Méndez, J., y Hernández, J. 2017. Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 5(13): 3-13.
- Gent, P., Danabasoglu, G., Donner, L., Holland, M., y Hunke, E. L. 2011. The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*. 24: 4973-4991.
- Gernandt, D., y Pérez de la Rosa, J. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 126-133.
- Greenpeace. 2017. Cambio climático. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>
- Guerra de la Cruz, V. y Mallén, R. 2008. Tlaxcala sus recursos forestales: Conservación, aprovechamiento y bases para su manejo sustentable. México: INIFAP-CENID-COMEF.
- Gutiérrez, A., y Dulvenvoorden, J. 2010. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 81(3): 875-882.
- Hamilton, L. 2009. Los bosques y el agua. 1ª ed. Roma: FAO.
- Hernández-Abreu, E., y Martínez-Pérez, M. 2012. El método Bootstrap en la estimación de incertidumbres. *Boletín Científico Técnico INIMET*. 1: 8-16.
- Hutchinson, E. 1957. Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitive Biology*. 22(2): 415-427.
- IEFyS. 2014. Inventario Estatal Forestal y de Suelos - Tlaxcala 2014. 1ª ed. México.
- Illoldi, P. y Escalante, T. 2008. De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*. 3: 7-12.
- INAFED. 2006. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017, de <http://inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM29tlaxcala/mediofisico.html>

- INECC. 2017. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 12 de Marzo de 2018, de <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126>
- INECC. 2018. Efectos del cambio climático. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>
- IPCC. 2012. IPCC Site. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC. 2014. Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Ginebra, Suiza: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo.
- Jofre, R., Cervantes, J. y Barradas, V. 2015. Calidad del agua de la niebla captada artificialmente en la microcuenca del río Pixquiac, Veracruz, México: resultados preliminares. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 18.2: 122-130.
- Katila, P. 2009. Adecuar los bosques al cambio climático. Una perspectiva global de los efectos del cambio climático sobre los bosques y las poblaciones y opciones de adaptación al mismo. Erweko, 1ª Ed. Oulu, Finlandia.
- Leyva, Á., Velázquez, A., Aldrete, A. y Gómez, A. 2013. La producción de resina de pino en México. 1ª ed. México: CONAFOR.
- Liu, C., Newell, G., y White, M. 2016. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution*. 6(1): 337-348.
- López, N., Gómez, A., Velázquez, A., Fierros, A., y Castruita, L. 2017. Reservorios y dinámica de nutrientes en dos rodales bajo aprovechamiento de *Pinus montezumae* Lamb. en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 24(1): 115-129.
- Manzanilla, U., Martínez, C., y Aguirre, O. 2019. Modelado espacial histórico y actual del oyamel (*Abies religiosa* [Kunth] Schldl. y Cham.) en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 25(2): 201-217.
- Martínez, B., y Cervantes, P. 2012. Requerimientos técnicos para estimar la distribución potencial de máxima entropía con el programa computacional MaxEnt. *Ciencia y Mar*. 16(48): 63-69.
- Martinez, G. 1990. Tesis, "Sistemas de tratamiento de aguas residuales para poblaciones menores de 40,000 habitantes. México: UNAM.
- Matellanes, R., Quesada, L., y Muñoz, D. 2014. Creación de modelos predictivos con MaxEnt. Pamplona, España: Proyecto Pandora y Asociación Geoinnova.
- Mejía, D., Tonón, M., y Abad, L. 2018. Distribución potencial del género *Polylepis* en la Cuenca del río Paute bajo un escenario de cambio climático. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*. 19: 21-37.
- Merow, C., Smith, M., y Silander, J. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*. 36: 1058-1069.

- OMM. 2016. Organización Meteorológica Mundial. Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- ONU. 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- OSCC. 2011. El cambio climático. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017, de http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/cambio_climatico_es.htm
- OSCC. 2014. Nuevos escenarios de emisión: RCPs. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm
- Parada-Molina, P., y Cervantes, J. 2017. Captación de agua de lluvia y niebla en la época de secas en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. *Ingeniería del Agua*, 21.3: 153-163.
- Parsons, J. 1960. Fog drip from coastal stratus, with special reference to California. *Weather*. 15: 58-62.
- Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M., y Peterson, T. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. 34: 102-117.
- Pérez, R., Francisco, M., Antonio, G., y Victor, A. 2014. Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et. *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales*. 5(25): 18-33.
- Pérez, R., Romero, M., González, A., Pérez, E., y Flores, E. 2017. Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl y Cham. Bajo escenarios de cambio climático en el eje neovolcánico, México. *Agroproductividad*. 10(8): 29-34.
- Peterson, A., Soberón, J., y Sánchez, V. 1999. Conservatism of Ecological Niches in Evolutionary Time. *Science*. 285: 1265-1267.
- Peterson, T. 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*. 3: 59-72.
- Peterson, T. S. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Naturaleza y Conservacao*. 10(2): 1-6.
- Phillips, S., Anderson, R., y Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231-259.
- Phillips, S., Dudík, M., y Schapire, R. 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. 655-662.
- Phillips, S., Dudík, M., Elith, J., Graham, C., Lehmann, A., Leathwick, J., y Ferrier, S. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudoabsence data. *Ecological Applications*. 19(1): 181-197.

- Ramos, D., Villaseñor, J., Ortiz, E., y Gernandt, D. 2017. Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88: 215-223.
- Rojas, F., y Villers, L. 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*. 33(104): 59-86.
- Romero, J. 2008. *Máxima Entropía*. México: UNAM Facultad de Ciencias.
- Rosas, J. 2008. Ecogeografía del género *Pinus* (Linnaeus, 1753) en la subcuenca Tecuantepec - Apulco, México. *Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*. 1-104.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México* 1ª ed. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- SAGARPA. 2012. INIFAP Tlaxcala. Recuperado el 12 de Marzo de 2018 de <http://www.inifap.gob.mx/circe/SitePages/internas/datostlax.aspx>
- Scheldeman, X., y Maarten, v. Z. 2010. *Training Manual on Spatial Analysis of Plant Diversity and Distribution*. Roma, Italia: Bioersity International.
- SEMARNAT-DGGFS. 2017. Conjunto Básico del Desempeño Ambiental. Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores17/conjuntob/indicador/07_forestales/7_2.html
- Soberón, J., y Peterson, T. A. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*: 2 1-10.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., y Peterson, T. 2017. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88(2): 437-441.
- Uehara, Y., y Atsushi, K. 2012. Canopy Rainfall Interception and Fog Capture by *Pinus pumila* Regal at Mt. Tateyam in the Northern Japan Alps, Japan. *Artic, Antarctic and Alpine Research*. 44(1): 143-150.
- Vertenstein, M., Graig, T., Middleton, A., Feddema, D., y Fischer, C. 2010. *CCSM4.0 User's Guide*. Community Earth System Model. 1-130.
- Villers, L., y Trejo, I. 1997. Assesment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in México. *Climate Research*. 9: 87-93.
- Villers, L., y Trejo, I. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En: Martínez, J. y Fernández, A. (Comp.) *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1ª ed. México, D.F. pp. 239-254.
- Villers, L., y Trejo, V. (1998). Climate change on Mexican forests and natural protected areas. *Global Enviromental Change*. 8(2): 141-157.
- WorldClim. (2016). WorldClim- Global Climate Data. Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de <http://worldclim.org/>

Young, N., Carter, L., y Evangelista, P. 2011. International Biological Information System. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de http://ibis.colostate.edu/webcontent/ws/coloradoview/tutorialsdownloads/a_maxent_model_v7.pdf