



"Enseñar la Explotación de la Tierra,
No la del Hombre"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

"DISTRIBUCIÓN PASADA Y FUTURA DE *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham EN EL ORIENTE DEL ESTADO DE MÉXICO"

Que como requisito parcial
Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

LUIS FELIPE ROMAHN HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de: DR. DANTE ARTÚRO RODRÍGUEZ TREJO



DIVISIÓN GENERAL ACADÉMICA
CENTRO DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISIÓN DE EXÁMENES PROFESIONALES

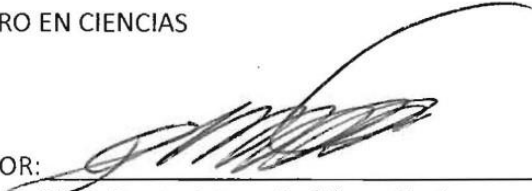
Chapingo, México, Enero de 2020.

"Distribución pasada y futura de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham en el oriente del Estado de México"


Tesis realizada por Luis Felipe Romahn Hernández bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTOR:


Ph.D. Dante Arturo Rodríguez Trejo

ASESOR:


M. C. María de Jesús Pérez Hernández

ASESOR:


Ph. D. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

DEDICATORIA

A mi padre, Carlos Francisco Romahn de la Vega, por ser el mejor profesor.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mi comité asesor por su tiempo, enseñanzas y guía.

Al Dr. Antonio Villanueva Morales por el apoyo proporcionado.

A la Dra. María Isabel Palacios Rangel por su asesoría y tiempo otorgado.

A los trabajadores de la UACH que facilitaron el desarrollo de esta investigación.

A colegas y amigos que apoyaron directa o indirectamente en la realización de estos proyectos.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos Personales

Nombre Luis Felipe Romahn Hernández

Fecha de Nacimiento 25 de mayo de 1980

Lugar de Nacimiento Distrito Federal

No. Cartilla Militar Matrícula C-3978528

CURP ROHL800525 HDFMRS06

Profesión Estudiante de Maestría

Cédula profesional 09143050

Desarrollo académico

Bachillerato Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma
Chapingo

Licenciatura Ingeniería en Recursos Naturales, Universidad
Autónoma Chapingo

CONTENIDO

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iii
Datos biográficos	iv
Contenido	v
LISTA de Cuadros	vii
LISTA de Figuras	viii
1 RESUMEN GENERAL	xii
Capitulo 1.....	1
2 Introducción general.....	1
3 Justificación.....	4
4 Objetivos	5
4.1 Objetivo general.....	5
4.2 Objetivo Especifico	5
5 Hipótesis.....	5
Capitulo 2.....	5
6 Análisis bibliométrico	6
6.1 Cambio Climático.....	6
6.1.1 Documentos según su año de publicación.....	7
6.1.2 Documentos según su fuente y año de publicación	7
6.1.3 Documentos por Autor	8
6.1.4 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones.....	9
6.1.5 Documentos según su país de origen	9
6.1.6 Documentos según el tipo de documento	10
6.2 Calentamiento Global	13
6.2.1 Documentos según su año de publicación.....	13
6.2.2 Documentos por Autor	14

6.2.3	Documentos según su país de origen	14
6.3	<i>Abies spp.</i>	15
6.3.1	Documentos según su año de publicación.....	17
6.3.2	Documentos según su fuente y año de publicación	18
6.3.3	Documentos por Autor	19
6.3.4	Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones...	19
6.3.5	Documentos según su país de origen	20
6.4	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. & Cham	21
6.5	Zona de Estudio.....	26
6.5.1	Documentos según su año de publicación.....	27
6.5.2	Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones...	28
6.6	Declinación Forestal	28
6.6.1	Documentos según su año de publicación.....	29
6.6.2	Documentos según su fuente y año de publicación	30
6.6.3	Documentos por Autor	31
6.7	“Global Warming” AND “Abies”.....	31
6.7.1	Documentos según su año de publicación.....	32
6.7.2	Documentos según su fuente y año de publicación	32
6.7.3	Documentos por Autor	33
6.7.4	Documentos según su país de origen	34
6.7.5	Documentos según el tipo de documento	34
6.8	Enfoques metodológicos.....	35
Capitulo 3.....		48
7	Modelación de la distribución potencial ACTUAL y futura de oyamel en la zona centro del país.....	48
7.1	RESUMEN.....	48
7.2	INTRODUCCIÓN.....	50
7.3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
7.3.1	Base de datos	51

7.3.2	Establecimiento del Área M y Datos de Presencia.....	51
7.3.3	Variables topográficas y bioclimáticas.....	53
7.3.4	Validación del modelo	55
7.3.5	Modelos de Circulación General	56
7.3.6	Modelación de la distribución potencial.....	57
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
9	Conclusiones.....	71
10	LITERATURA CITADA.....	72
	Capitulo 4.....	81
	CONCLUSIONES GENERALES	108
11	Literatura Citada.....	109

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Tabla con las características de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham	22
Cuadro 2.	Variables empleadas para la modelación de distribución de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. Fuente: INEGI (2007, 2013), WorldClim (2016).....	53
Cuadro 3.	Superficies de distribución potencial actual y futura para los modelos HADGEM y GFDL, y distribución actual de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham.....	61
Cuadro 4.	Desplazamiento altitudinal por sección y orientación. Los datos con (+) representan un incremento en la distribución hacia altitudes menores.....	70
Cuadro 5.	Porcentajes de vigor por estrato y por cota altitudinal.	95
Cuadro 6.	Valores de F, p y r ² para la altura y diámetro logarítmicos y la densidad por estrato.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Variación observada del promedio mundial de las temperaturas en la superficie, período 1961-1990. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre.....	2
Figura 2 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS.....	7
Figura 3 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS ..	7
Figura 4 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS	8
Figura 5 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS	9
Figura 6 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS.....	10
Figura 7 Documentos según el tipo de documento. Fuente: SCOPUS	10
Figura 8 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS.....	13
Figura 9 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS	14
Figura 10 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS	15
Figura 11 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS	17
Figura 12 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS	18
Figura 13 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS.....	19
Figura 14 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS	20
Figura 15 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS	20
Figura 16 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS	27
Figura 17 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS	28
Figura 18 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS	29

Figura 19 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS.....	30
Figura 20 Documentos por autor. Fuente: SCOPUS	31
Figura 21 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS	32
Figura 22 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS.....	32
Figura 23 Documentos por autor. Fuente: SCOPUS	33
Figura 24 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS	34
Figura 25 Documentos según el tipo de documento. Fuente: SCOPUS	34
Figura 26 Diagrama BAM (Soberon & Peterson, 2005)	52
Figura 27 Prueba de Jackknife para la validación del modelo HADGEM.....	56
Figura 28 Área bajo la curva (izq) y área de predicción y omisión (der) para el modelo HADGEM.....	58
Figura 29 Comportamiento en la predicción de la variable bio04 en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.	59
Figura 30 Comportamiento en la predicción de la variable bio11 en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.	59
Figura 31 Comportamiento en la predicción de la variable etpm en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.	60
Figura 32 Distribución real y potencial actual de oyamel en la zona centro del país y secciones de análisis: (A) Michoacán, (B) Michoacán y Estado de México, (C) Estado de México, (D) Estado de México, Ciudad de México y Morelos, (E) Hidalgo, (F) Estado de México, Puebla y Morelos.....	62
Figura 33 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección A de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.....	63

Figura 34 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección B de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.	64
Figura 35 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección C de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.	66
Figura 36 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección D de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.	67
Figura 37. Macrolocalización de la poligonal de <i>A. religiosa</i> reportada en la Serie V, Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, INEGI (2015) y sitios de muestreo, los cuales se numeraron con la cota altitudinal y número consecutivo de SO a NE (ej. 3000-1). Fuente: elaboración propia.	87
Figura 38. Forma de la unidad de muestreo utilizada. En los círculos verdes (400 m ²) se mide el arbolado con DAP mayor a 7.5 cm. En los círculos naranjas (12.56 m ²) se miden las plantas y árboles que tengan como mínimo 25 cm de altura y DAP menor a 7.5 cm. En los cuadros amarillos (1 m ²) se registran hierbas, helechos, musgos y líquenes. Fuente: CONAFOR (2011).....	89
Figura 39. Forma de los sitios de muestreo, el círculo mayor para arbolado adulto, medianos para arbolado joven y los menores para renuevo de <i>A. religiosa</i> . Fuente: CONAFOR (2011).	91
Figura 40. Densidad de individuos por estrato y por cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.	93
Figura 41 Correlación entre la altura y diámetro logarítmicos de los estratos A (superior), B (en medio) y C (inferior) y la cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.	97
Figura 42 Gráfico de cajas con la interacción entre la densidad forestal del estrato A (izq.), B (centro) y C (der.) con la cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 43. Diagrama de la técnica para favorecer la regeneración de oyamel. Fuente: elaboración propia.	102

Figura 44. Distribución potencial actual y futura para oyamel en el polígono
muestreado en la zona del monte Tlaloc. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo)
Modelo GFDL109

1 RESUMEN GENERAL

Distribución pasada y futura de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham en el oriente del Estado de México.¹

Introducción: La distribución del oyamel, así como el vigor de sus masas forestales puede verse afectada por el cambio climático, principalmente con la elevación de las temperaturas, lo que puede ocasionar un desfase entre su distribución actual y las zonas de distribución potencial actual y futura. La altitud tiene una relación directa con las condiciones de humedad y temperatura, por lo que la vegetación de oyamel puede presentar distintas condiciones en diferentes altitudes.

Objetivos: Modelar la distribución potencial actual y futura (2099) del oyamel en el Estado de México, mediante los modelos HADGEM (Reino Unido) y GFDL (Estados Unidos) y el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt.

Evaluar el vigor forestal y la regeneración natural de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham) en la zona oriente del Estado de México, considerando variables topográficas (altitud, pendiente, exposición, profundidad y pedregosidad del suelo) y ecológicas (asociación vegetal, estructura forestal, densidad forestal).

Materiales y Métodos: Se empleó el programa de máxima entropía MaxEnt, las ocurrencias de *Abies spp.* (a excepción de *Abies vejarii*) de la república mexicana y las variables bioclimáticas de Worldclim 1.4 para modelar la distribución potencial actual y futura de oyamel y se evaluó el vigor forestal y la regeneración natural de oyamel en la zona oriente del Estado de México, considerando principalmente la altitud y también variables topográficas (pendiente, exposición,

¹ "Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo" Luis Felipe Romahn Hernández, Dante Arturo Rodríguez Trejo.

profundidad y pedregosidad del suelo) y ecológicas (asociación vegetal, estructura forestal, densidad forestal).

Resultados: El modelo GFDL presentó resultados con una afectación mayor para la distribución potencial futura del oyamel, desplazamientos altitudinales para el 2099 de 50 a 100 m s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) para la zona de Hidalgo, de 400 a 600 m s.n.m. para la parte entre el Estado de México y Michoacán y Estado de México con la Ciudad de México, y de 200 m s.n.m. aproximadamente, en el eje neovolcánico, siendo mayor el desplazamiento en la zona del Estado de México que en Puebla, y de entre 300 a 600 m s.n.m. en la parte sur del Volcán Popocatepetl, entre los estado de México, Puebla y Morelos. Los datos del muestreo mostraron un mayor vigor forestal y regeneración natural en las cotas altas disminuyendo conforme a la altitud, y masas forestales de oyamel por encima de las altitudes reportadas. Se encontró relación entre la densidad forestal con el vigor forestal y la regeneración natural, la cual disminuye en ambos extremos de la densidad forestal.

Conclusiones: La distribución potencial futura modelada en Maxent, así como los resultados del capítulo 4, presentan una tendencia de desplazamiento altitudinal, hacia arriba, de las masas forestales de oyamel y una reducción del vigor forestal y establecimiento de la regeneración natural en las bajas altitudes, reduciendo la idoneidad para el establecimiento de esta vegetación por efecto del incremento de la temperatura. Otros factores como la densidad forestal también son determinantes en el vigor forestal y el crecimiento de los individuos.

Palabras clave: MaxEnt; Diagrama BAM; Área M; Modelos HADGEM y GFDL

2 GENERAL SUMMARY

Past and future distribution of *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham in the east of the State of Mexico.

Introduction: The distribution of the sacred fir, as well as the vigor of its forest masses can be affected by climate change, mainly with the rise of temperatures, which can cause a gap between its current distribution and the current and future potential distribution areas. Altitude has a direct relationship with humidity and temperature conditions, so sacred fir vegetation may present different conditions at different altitudes.

Objectives: To model the current and future (2099) potential distribution of sacred fir in the State of Mexico, using the models HADGEM (United Kingdom) and GFDL (United States) and the algorithm of maximum entropy, Maxent.

Evaluate the forest vigor and natural regeneration of sacred fir (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham) in the eastern zone of the State of Mexico, considering topographic (altitude, slope, exposure, depth and soil stoniness) and ecological variables (plant association, forest structure, forest density).

Materials and Methods: The maximum entropy program, MaxEnt, the occurrences of *Abies spp.* (except *Abies vejarii*) of the Mexican Republic and the bioclimatic variables of Worldclim 1.4 were used to model the current and future potential distribution and the forest vigor and natural regeneration of sacred fir in the eastern zone of the State of Mexico, considering mainly altitude and also topographic (slope, exposure, depth and soil stoniness) and ecological variables (plant association, forest structure, forest density).

Results: The GFDL model presented results with a greater affectation for the potential future distribution of the oyamel, altitudinal displacements for 2099 from 50 to 100 m.a.s.l. for the area of Hidalgo, from 400 to 600 m.a.s.l. for the part

between the State of Mexico and Michoacan and State of Mexico with Mexico City, and from 200 m s.n.m. approximately, in the neovolcanic axis, being greater the displacement in the zone of the State of Mexico and smaller in Puebla, and between 300 and 600 m s.n.m. in the south part of the Popocatepetl volcano, between the States of Mexico, Puebla and Morelos.

Sampling data showed increased forest vigor and natural regeneration at higher elevations decreasing with altitude, and oyamel forest stands above reported altitudes. A relationship was found between forest density with forest vigor and natural regeneration, which decreased at both extremes of forest density.

Conclusions: The potential future distribution modelled in Maxent, as well as the results of Chapter 4, show a trend of upward altitudinal displacement of the oyamel forest stands and a reduction of forest vigour and establishment of natural regeneration at low altitudes, reducing the suitability for the establishment of this vegetation by the effect of increased temperature. Other factors such as forest density are also determinants of forest vigour and individual growth.

Keywords: MaxEnt; BAM diagram; Area M; HADGEM and GFDL models

CAPITULO 1

3 INTRODUCCIÓN GENERAL

“Se ha escrito mucho sobre la influencia de la absorción de la atmósfera sobre el clima”, así inicia el artículo científico *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground* escrito por Arrhenius† y publicado el mes de abril de 1896 en la revista científica *Philosophical Magazine and Journal of Science* donde también refiere la difusión de calor cuando pasa a través del aire; que algunos de los gases atmosféricos absorben considerables cantidades de calor, y ya se cuestionaban si “¿La temperatura media del suelo está influenciada de algún modo por la presencia de gases que absorben calor en la atmósfera?”; unos años antes Fourier (1827) sostuvo que la atmósfera actúa como el vidrio de un invernadero, porque deja pasar los rayos de luz del sol pero retiene los rayos al rebotar en el suelo.

Este calentamiento global se ha ido incrementando de manera paulatina pero constante y de manera exponencial en el último siglo. Según información corroborada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) y la NASA, los últimos once de los doce años más calurosos desde que se tienen registros se produjeron entre 1995 y 2006 y el año 2015 se reporta como el más cálido desde los últimos 136 años.

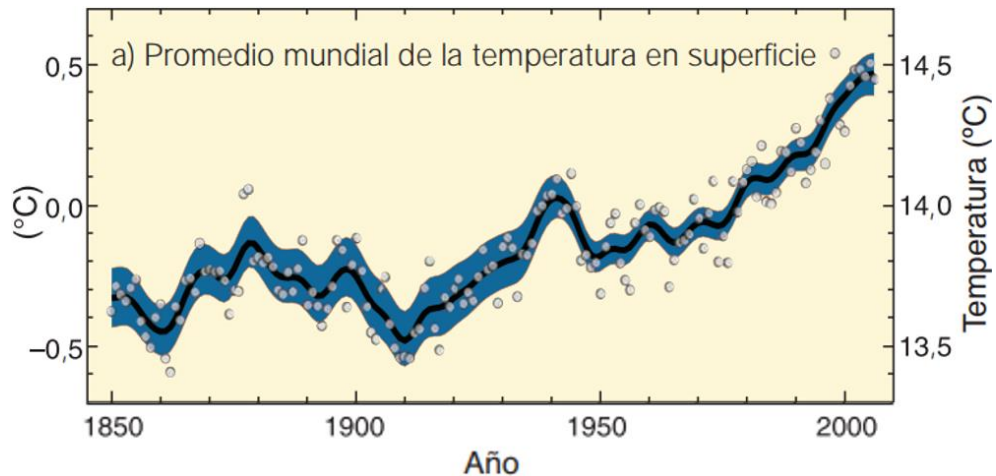


Figura 1 Variación observada del promedio mundial de las temperaturas en la superficie, período 1961-1990. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenales, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre.

Fuente: IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis.

En el informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) se proyectan intervalos probables de incremento de las temperaturas de la superficie con seis distintos escenarios, donde el aumento sería de 1,1 y 2.9°C en los escenarios de emisiones de GEI más conservadores y de entre 2.4 y 6.4°C para los escenarios con una mayor cantidad de emisiones.

El aumento en las concentraciones de algunos de los más importantes gases de efecto invernadero en la atmósfera se han incrementado más de un tercio desde la revolución industrial, esto debido a la quema de combustibles fósiles y en menor proporción a los cambios de uso de suelo

Es decir, la composición química de la atmósfera, principalmente el CO₂, CH₄, N₂O y F afectan su temperatura y por consiguiente las variables climáticas (Caballero et al. 2007), lo que puede representar para los distintos ecosistemas terrestres alteraciones de diversas escalas, así como a sus organismos, pudiendo llegar a modificarse la composición de especies o su distribución latitudinal o altitudinal así como sus características biológicas y con tres consecuencias posibles que son el adaptarse a estos cambios, desplazarse en

busca de condiciones más óptimas o extinguirse (Holt 1990; Peterson et al. 2001).

Por lo anterior, puede decirse que si el calentamiento global está relacionado con la concentración de ciertos gases en la atmosfera y que si este calentamiento puede afectar a organismos vegetales que en parte son los encargados de absorber y reducir la cantidad de CO₂, se convierte de una consecuencia a ser parte del problema, y cada vez con mayor intensidad, por lo que es importante conocer la manera en que el calentamiento global afectará a los biomas y sus comunidades vegetales para conocer panoramas futuros y tomar decisiones a partir de estos.

No solo el incremento de la temperatura representa una amenaza para las comunidades en los distintos ecosistemas, también las lluvias torrenciales, temporadas de sequias más largas, huracanes de mayor intensidad y con mayor frecuencia, incremento en la velocidad de los vientos, granizadas más intensas, entre otros, pueden llegar a afectar severamente a los organismos.

Estas modificaciones pueden afectar la fenología y fisiología de las especies, en especial si se trata de especies restringidas, como es el caso del *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham, el cual es nativo de las montañas centrales y del sur de México y es muy resistente al frio, pero no al calor, prefiere temperaturas de 7 a 15 grados centígrados y una temperatura máximas de 25 grados centígrados y una precipitación anual alrededor de 1000 mm o más.

Es importante conocer las modificaciones a los ecosistemas y organismos que pudieran ocasionar los cambios en el clima y en la temperatura de la troposfera, para predecir panoramas futuros; para ello existen herramientas como los programas para la modelación de la distribución potencial futura, así como, datos climatológicos, topográficos, edafológicos, de uso de suelo y vegetación, que pueden ayudar en la investigación de estas modificaciones.

El presente documento de investigación se enfocará en la revisión de la distribución pasada de los bosques conformados por *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham, así como su distribución actual, distribución potencial actual, y distribución potencial futura, utilizando modelos de proyección climática, pronosticadas para el 2099, para representarlo por medio de planos de distribución.

En el Capítulo 2 se presenta un análisis bibliométrico de los artículos científicos relacionados con la temática que se maneja en el presente estudio, revisando enfoques teóricos, conceptuales y metodológicos que pueden ayudar al desarrollo de esta investigación. El análisis se concentró en las palabras clave “cambio climático”, “calentamiento global”, “*Abies spp*”, “*Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham”, “Monte Tláloc”, “declinación forestal” y los enfoques metodológicos a emplear en el capítulo 3, donde se realizó una modelación de distribución potencial y futura (2099) para la especie *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham.

En el Capítulo 4 se realizó un muestreo forestal de las condiciones de los bosques de oyamel, considerando su vigor forestal y la cantidad de regeneración natural presentes en los distintos rangos de distribución altitudinal, de 2900 a 3600 m s.n.m. en el oriente del Estado de México, para después realizar un análisis estadístico con las variables dasométricas y topográficas de los sitios.

4 JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación radica en que el calentamiento global y sus consecuencias son un problema actual y que a futuro puede tener mayores repercusiones, por lo que se hace necesario conocer las afectaciones que puede ocasionar en los distintos ecosistemas y sus organismos con el fin de predecir panoramas futuros y poder tomar decisiones en torno a ellos, enfocados al manejo forestal, su conservación y restauración.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Modelar la distribución potencial actual y futura (2099) del oyamel en el Estado de México, mediante los modelos HADGEM (Reino Unido) y GFDL (Estados Unidos) y el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt.

5.2 Objetivo Especifico

Elaborar un plano de distribución potencial actual y futura de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham considerando variables topográficas, geológicas y bioclimáticas, además de proyecciones climáticas.

6 HIPÓTESIS

Utilizando variables topográficas y climáticas, así como la distribución actual de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham, es posible, mediante el uso de proyecciones climáticas, realizar modelos de distribución potencial de la vegetación bajo escenarios de calentamiento global.

CAPITULO 2

Se realizó un análisis bibliométrico de las palabras clave del tema de investigación, utilizando Scopus® que es una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas editado por Elsevier, así mismo previo al análisis bibliográfico se expone la información más relevante de cada palabra clave, para el desarrollo del proyecto de investigación.

En esta investigación se manejan variables climáticas (precipitación, temperatura, radiación solar, sus medias mensuales, anuales, valores extremos), variables bioclimáticas (Temperatura media del trimestre más húmedo, oscilación diurna, precipitación del trimestre más cálido), proyecciones climáticas al año 2099, variables topográficas (relieve, pendiente, exposición), variables edáficas (pedregosidad, profundidad del suelo), conceptos como cambio climático, calentamiento global, vigor forestal, declinación forestal, regeneración natural,

relación entre las condiciones del arbolado con la altitud. A continuación se presenta el análisis bibliométrico de los conceptos más relevantes.

7 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

7.1 Cambio Climático

Buscando Cambio climático en Scopus®, específicamente en la parte del título del artículo, el resumen y las palabras clave, se encontró como resultado 381 documentos, publicaciones que van de 1993 al 2018, el año con mayor número de publicaciones son el 2016 y 2017 con 56 y 48 correspondientemente. Con los 381 resultados encontrados se realiza un filtrado de la búsqueda enfocándose a las áreas de estudio, seleccionando la categoría Agricultural and Biological Sciences y Environmental Science, con lo que se reduce a 166 resultados. Con la información obtenida se procede a realizar el análisis bibliométrico mediante las cifras y graficas que el programa Scopus permite generar.

Los tres principales autores con mayor número de publicaciones que contienen la palabra clave cambio climático son, en orden de aparición, Lynch, A. J. de los Estados Unidos, Monterroso-Rivas, A. I. de México y Paukert, C. P. igual de Estados Unidos y los años de las publicaciones son del 2009 al 2018 y de estos los que tienen una mayor cantidad de publicaciones son los años recientes, principalmente el 2006. A continuación se presentan las gráficas elaboradas mediante Scopus® referentes a la palabra clave cambio climático, presentando los documentos según su año de publicación, según su fuente de origen, por autor, por la afiliación a una dependencia o institución, por su país de origen y por el tipo de documento que se trate.

7.1.1 Documentos según su año de publicación.

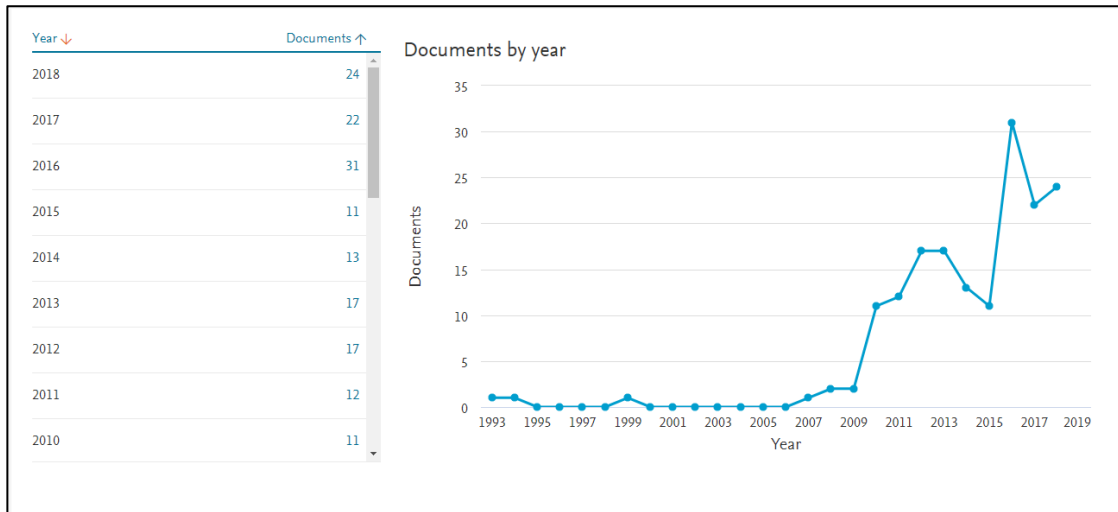


Figura 2 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

Como se puede ver en la gráfica anterior, se trata de un tema reciente, de los 166 documentos localizados la mayoría corresponde a los últimos años y los primeros años de las publicaciones no datan más allá de 1993 y en los últimos años se produjo un incremento en las cantidades de publicaciones referidas al tema.

7.1.2 Documentos según su fuente y año de publicación

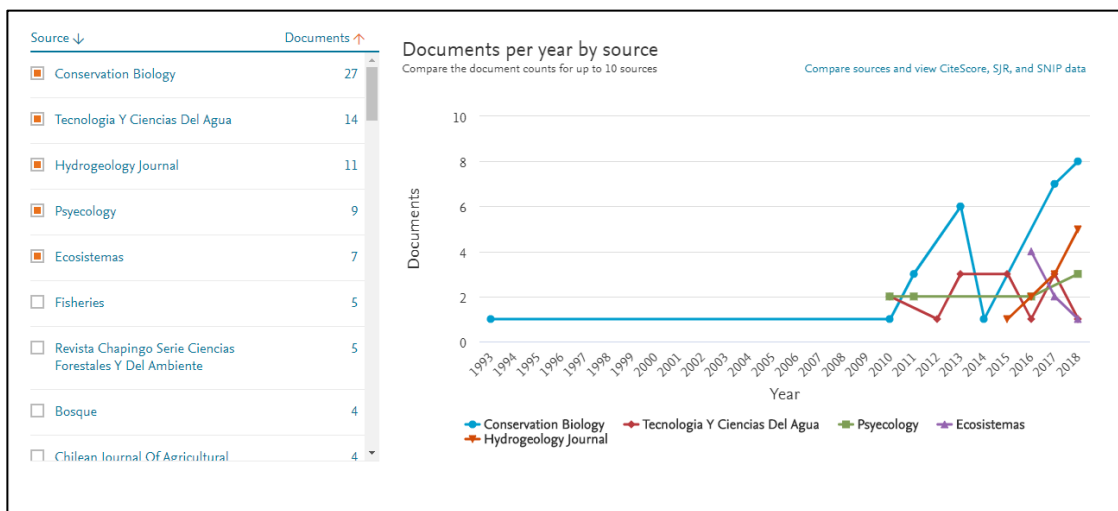


Figura 3 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS

Las fuentes que más destacan en la publicación del tema sobre cambio climático son las revistas Conservation Ecology de Estados Unidos, Tecnología y Ciencias del Agua de México, Hydrogeology Journal de Estados Unidos, Psycology de Reino Unido y la revista Ecosistemas de México; la mayor concentración de publicaciones referentes al temas se da en los últimos años como ya se había descrito anteriormente, cabe destacar que dentro de las 5 principales revistas que publican artículos referentes al tema de cambio climático dos son mexicanas.

7.1.3 Documentos por Autor

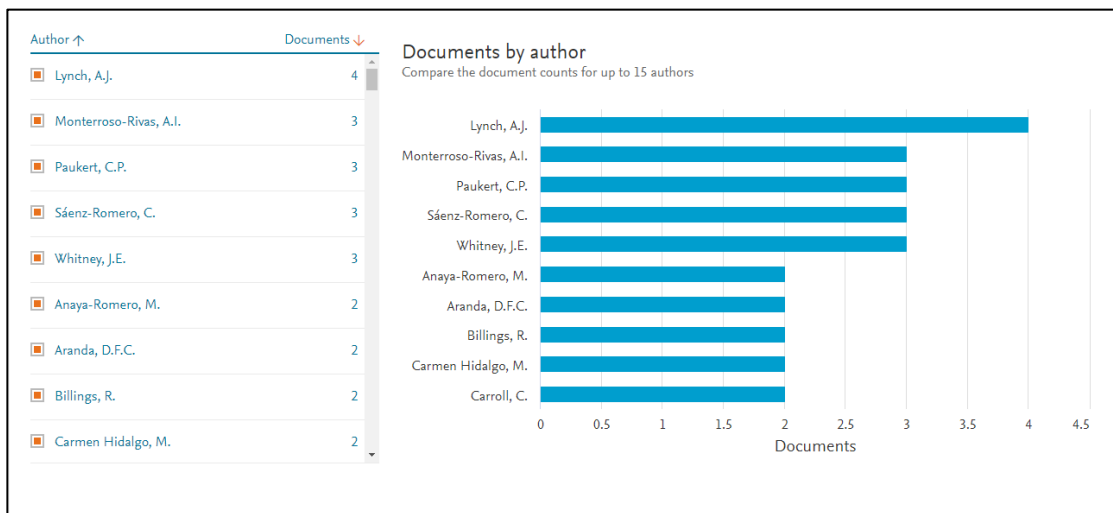


Figura 4 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS

En esta gráfica se pueden observar los principales autores que publican artículos referentes al tema de cambio climático, la Dra. Abigail Lynch de Estados Unidos con 4 publicaciones y el Dr. Alejandro Monterroso de México con 3 publicaciones encabezan la lista, por cuestiones visuales solo se grafican los principales autores.

7.1.4 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones

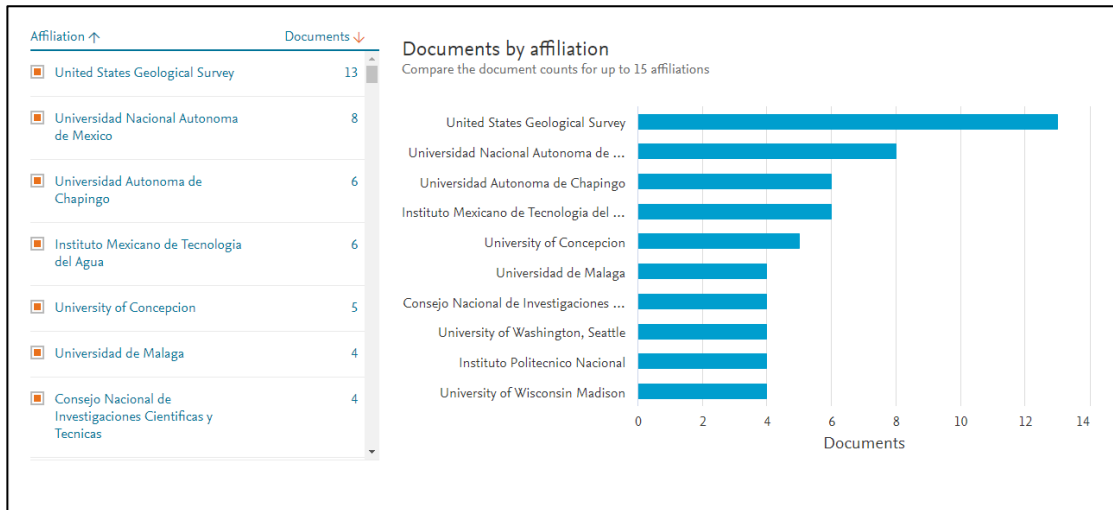


Figura 5 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS

La agencia científica USGS de los Estados Unidos encabeza la lista de las organizaciones o instituciones que publican más artículos referentes al tema de cambio climático con 13 artículos, seguida de dos universidades mexicanas, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma Chapingo con ocho y seis publicaciones respectivamente, seguidas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, igual con seis publicaciones.

7.1.5 Documentos según su país de origen

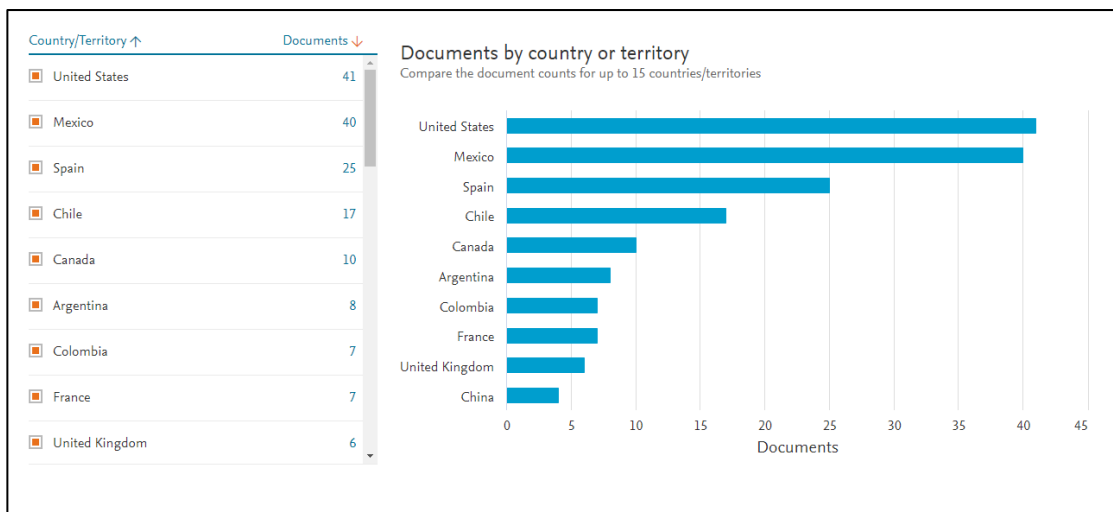


Figura 6 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS

Referente al país de origen de las publicaciones de artículos relacionados al cambio climático, destacan Estados Unidos, México, España y Chile, con 41, 40, 25 y 17 publicaciones respectivamente, un total de 122 publicaciones de las 166 involucradas en el presente análisis bibliométrico.

7.1.6 Documentos según el tipo de documento

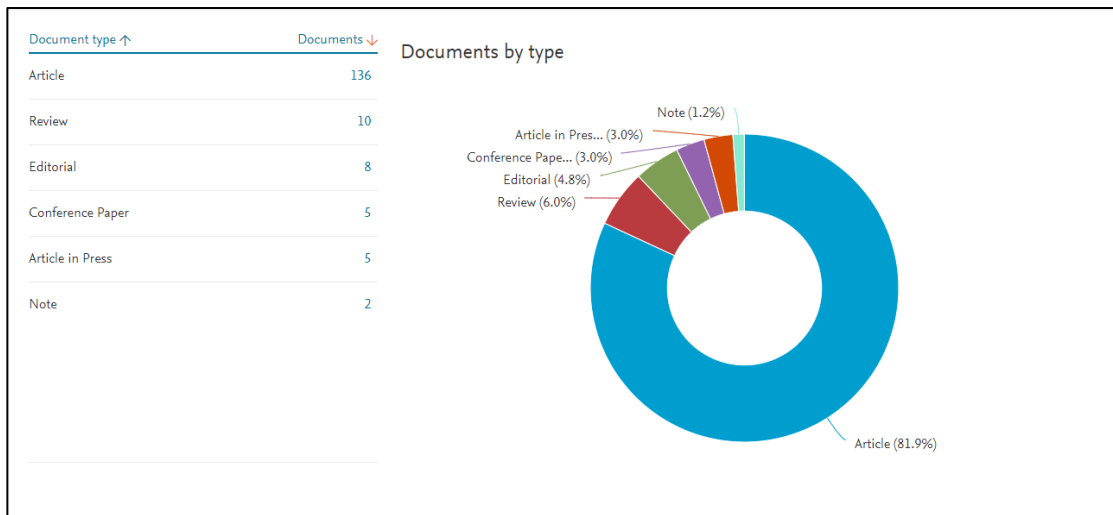


Figura 7 Documentos según el tipo de documento. Fuente: SCOPUS

La mayoría de los documentos localizados para el tema de cambio climático corresponden a artículos científicos, 136 de los 166 documentos localizados, los demás corresponden a revisiones, editoriales, conferencias, artículos de prensa y notas.

El cambio climático en México supondrá un incremento de las temperaturas y una reducción de la precipitación, modificando las establecidas clasificaciones climáticas, presentando escenarios de mayor sequía y teniendo repercusiones sobre la salud, y distribución de la vegetación, debido a un desfase de las variables climáticas actuales y futuras y las variables climáticas requeridas por la vegetación, tal como lo mencionan Rehfeldt, Crookston, Duval, Jean, & Bryce en el 2010.

Esto puede representar una reducción de la superficie con las condiciones apropiadas para ciertos tipos de vegetación, como lo expresan Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros (2012), quienes realizaron un modelo utilizando variables climáticas como temperatura del mes más cálido, precipitación, temperaturas en invierno, entre otras, para proyectar la posible variabilidad de la superficie de nichos ecológicos para *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.

Concluyen que la superficie de *Abies religiosa* disminuirá 69.2% para el 2030 y hasta 96.5% para el 2090 y un desfase altitudinal de hasta 300 metros para el 2030; mientras que Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, et al. (2012) predicen incrementos de temperatura de 1.5°C para el año 2030, de 2.3°C para el 2060 y de hasta 3.7°C para el año 2090 y una reducción de la precipitación de -6.7% para el 2030, de -9.0% para el 2060 y de -18.2% para el año 2090.

Este calentamiento global se ha ido incrementando de manera paulatina pero constante y casi de manera exponencial en el último siglo. Según información corroborada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (National Centers for Environmental Information, 2015) y la NASA, los últimos once de los doce años más calurosos desde que se tienen registros, año 1880, se produjeron entre 1995 y 2006 y el año 2015 se reporta como el más cálido desde los últimos 136 años, que fue 0.9 grados centígrados más alto que el promedio del siglo 20..

En el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (Nakicenovic & Swart, 2000) se proyectan intervalos probables de incremento de las temperaturas de la superficie con seis distintos escenarios, donde el aumento sería de 1,1 y 2.9°C en los escenarios de emisiones de GEI más conservadores y de entre 2.4 y 6.4°C para los escenarios con una mayor cantidad de emisiones. Es decir, la composición química de la atmosfera, principalmente el CO₂, CH₄, N₂O y F afectan su temperatura y por consiguiente las variables climáticas (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007)

Esto puede representar para los distintos ecosistemas terrestres alteraciones de diversas escalas así como en sus organismos, pudiendo llegar a modificarse la composición de especies o su distribución latitudinal o altitudinal así como sus características biológicas y con tres consecuencias posibles que son el adaptarse a estos cambios, desplazarse en busca de condiciones más óptimas o extinguirse (Holt, 1990).

Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Tinoco-Rueda (2013), evaluaron las condiciones actuales y futuras, bajo escenario de cambio climático para ocho especies representativas del bosque mesófilo en el estado de Hidalgo, concluyendo que la distribución espacial de su hábitat potencial puede verse disminuida debido a las afectaciones provocadas por los efectos del cambio climático.

Guitérrez y Trejo (2014) estiman, mediante mapas de distribución potencial, generados con dos modelos de circulación general (MCG) y dos escenarios de emisiones de carbono a la atmosfera, que la superficie de su distribución potencial de *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Q. ocoteifolia* se reducirá principalmente por la modificación de la temperatura y la precipitación, esperando una reducción de sus poblaciones, hasta extinciones locales.

A continuación se presenta en análisis bibliométrico de la palabra clave calentamiento global, la cual generó en Scopus® una búsqueda de 38 documentos originalmente, después de refinar la búsqueda a las áreas de Agricultural and Biological Sciences, Environmental Science y Earth and Planetary Sciences se reducen los resultados a 19 documentos.

7.2 Calentamiento Global

7.2.1 Documentos según su año de publicación.

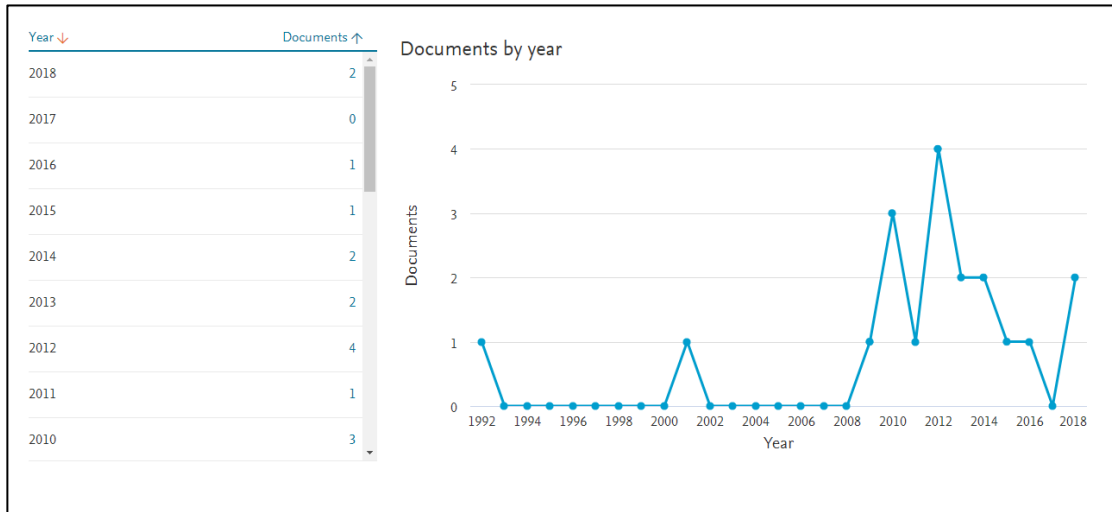


Figura 8 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

Referente al tema de calentamiento global, al igual que el tema de cambio climático, tiene un mayor auge en los últimos años y la publicación menos reciente no es de más de tres décadas, se trata de temas relativamente nuevos, siendo a partir del 2009 el incremento del interés por el tema y su correspondiente aumento en publicaciones generadas; el año que más destaca es el 2012 con cuatro publicaciones. Las revistas que más aportan artículos científicos referentes al tema de calentamiento global son Acta Agronómica y Agrociencia de México, y Conservation Biology y Psyecology de Estados Unidos y Reino Unido, todas con dos publicaciones siendo más recientes las de las revistas mexicanas.

7.2.2 Documentos por Autor

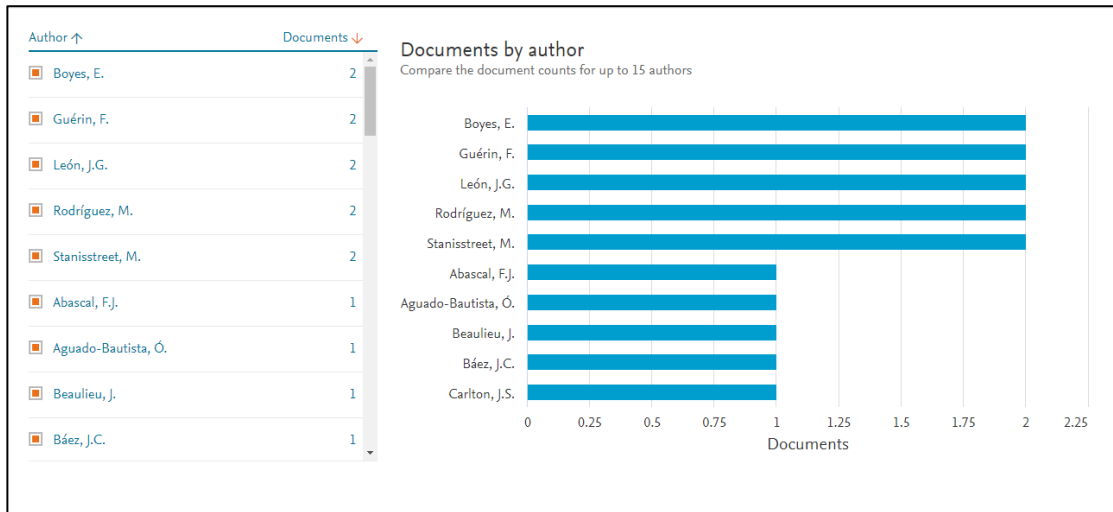


Figura 9 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS

Los principales autores que han publicado artículos referentes al calentamiento global son Boyes, E., Guérin, F., León, J. G., Rodríguez, M. y Stanisstreet, M. con dos publicaciones cada uno, al igual que en las publicaciones por dependencia o institución donde la USDA Forest Service, la Universidad de Liverpool, la Universidad Autónoma de Madrid, la Universidad Paul Sabatier de Toulouse, la Universidad Nacional de Educación a Distancia y la Universidad Nacional de Colombia cuentan con dos publicaciones referentes al tema cada una.

7.2.3 Documentos según su país de origen

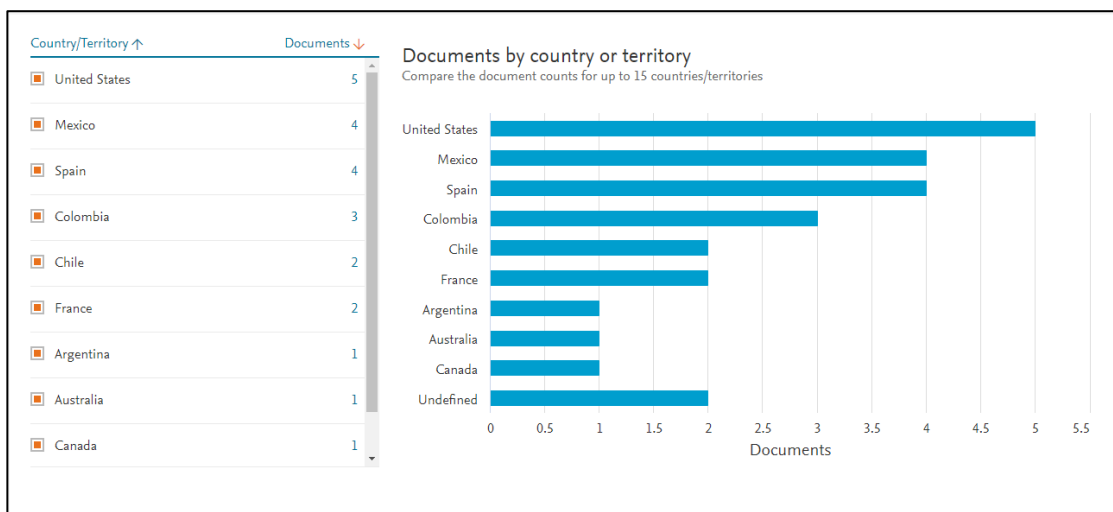


Figura 10 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS

Al igual que con el tema de cambio climático, en el tema de calentamiento global los países con mayor número de publicaciones corresponde, en el mismo orden a Estados Unidos con cinco publicaciones y México y España con cuatro publicaciones. De los 19 documentos localizados por Scopus® 16 corresponden a artículos científicos.

7.3 *Abies spp.*

De acuerdo con Starker Leopold, publicado en 1950 en la revista científica *Ecology*, clasifica a las comunidades de *Abies religiosa* dentro de los bosques boreales por su similitud con los bosques de coníferas de las partes septentrionales de Norteamérica, norte de Europa y Asia, lo que hace suponer que las poblaciones de oyameles que actualmente se localizan en México, se desplazaron desde el hemisferio norte en el Plioceno (Biota, 2017; Rzedowski, 1978a). Por otra parte, Critchfield en 1983 propone que durante los periodos glaciares, comunidades de *Abies spp.* se desplazaron a los actuales desiertos del Norte de México, y se establecieron en las zonas altas como en sierras y formaciones volcánicas.

El oyamel se puede encontrar en menor cantidad en terrenos planos, pero actualmente se conserva en reducidas comunidades aisladas en varias partes del país, limitándose a establecerse en laderas inclinadas en cerros y barrancas, esto también debido a que en las partes planas puede que no se cuente con los rangos de humedad requeridos por la especie o que hayan sido removidas por cambio de uso de suelo para dar paso a otras actividades. De acuerdo a Rodríguez-Trejo que en el 2014 señaló que este tipo de vegetación no puede prosperar en altitudes superiores a los 3,200 msnm debido a la deficiencia de humedad, por lo que a estas alturas prácticamente solo se establecen comunidades arbóreas de *Pinus*.

De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000, serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se

calcula que la vegetación de *Abies spp.* abarca una superficie a nivel nacional de 125,017.121 ha, siendo *Abies religiosa* la de mayor distribución. Los estados de la república que presenta este tipo de vegetación son Chihuahua, Sinaloa, Durango, Coahuila, Jalisco, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Michoacán de Ocampo, Estado de México, Ciudad de México, Tlaxcala, Puebla, Morelos, Oaxaca y Chiapas.

Las demás especies de oyamel que existen en el país son *Abies concolor*, en el extremo noroeste del país, en las sierras del norte de Baja California y en el estado de Sonora, *Abies durangensis*, en el occidente y norte del país, en la Sierra Madre Occidental en los estados de Chihuahua y Durango presentado en manchones reducidos en las partes de mayor humedad, *Abies guatemalensis* en Tamaulipas, Jalisco, Hidalgo, San Luis Potosí y principalmente en el sur del país, *Abies hickelii* en Veracruz, Guerrero y Chiapas, *Abies oaxacana* característica del sureste del país, *Abies vejarii* en el norte del país, más específicamente en el estado de Nuevo León y *Abies mexicana* en el sur del estado de Coahuila (Martínez & Matuda, 1979 y Rzedowski, 1978)

Aunque los oyametales se conforman como una población clímax, siendo esta especie el único componente del estrato arbóreo, en diversas zonas del país se le asocia con a *Cupressus lusitánica*, *Pseudotsuga*, *Quercus* y *Cupressus*, además a especies como *Pinus ayacahuite*, *Pinus hertwegii*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus patula*, con reforestaciones de *Pinus oocarpa* y *Pinus montezumae*, *Cupressus lusitánica*, *Pseudotsuga*, *Quercus*, *Alnus* entre otros, y con especies de arbustivas y herbáceas como *Salvia spp*, *Eupatorium*, *Festuca*, *Ribes spp*, *Arbutus*, *Salix*, *Prunus*, *Garrya*, *Buddleia*, *Senecio*, *Stevia*, *Archibaccharis*, *Alchemilla*, *Thuidium*, *Stachys*, *Symphoricarpos*, *Lolium*, *Galium*, *Cinna*, *Pernettya*, *Dydimaea*, *Acaena*, *Brachypodium*, *Buddleia*, *Sigesbeckia*, *Alchemilla*, *Thuidium*, *Bryum*, *Muhlenbergia*, *Calamagrostis* y otras especies como musgos, hongos comestibles, hongos basidiomicetos, saprófitos y ectomicorrizógenos, líquenes y bromelias. (Rzedowski, 1978, Velazquez,

V.M.Toledo, I.Luna, Barbour, & W.D.Billings, 2000, Rodríguez-Trejo, 2014 y Oros-Ortega et al., 2017).

A continuación se realiza el análisis bibliométrico de la palabra clave *Abies*, generó una búsqueda en Scopus® de 21,821 documentos, los cuales una vez redefinida la búsqueda solo a las áreas de Agricultural and Biological Sciences, Environmental Science y Earth and Planetary Sciences se reducen los resultados a 19,638 documentos encontrando documentos desde 1853, por lo que se delimitará aún más la búsqueda especificando la palabra clave de *Abies* a *Abies religiosa* con lo que se obtienen 116 documentos los cuales se reducen a 102 documentos después de especificar las áreas de interés, con estos 102 documentos se realizará el análisis bibliométrico.

7.3.1 Documentos según su año de publicación.

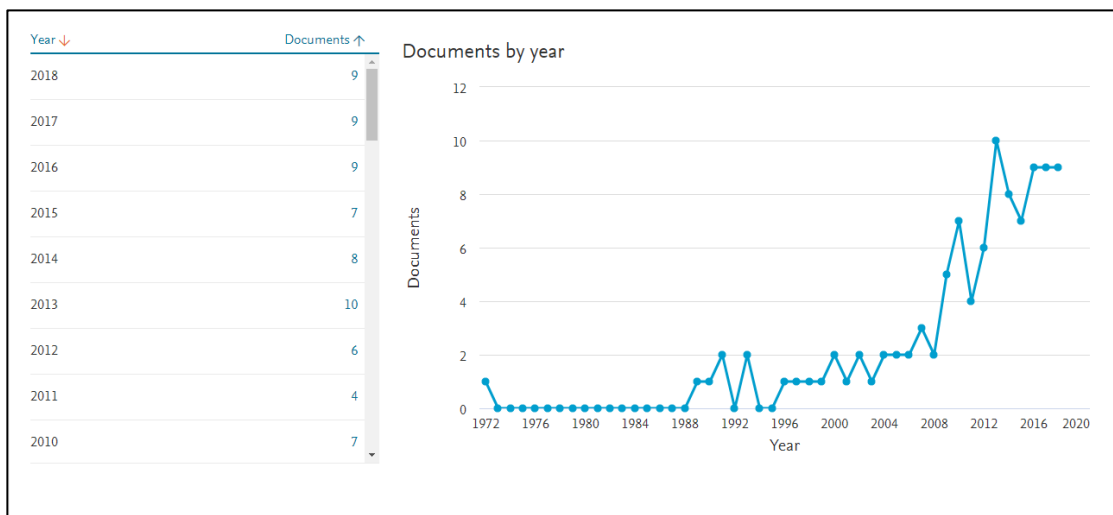


Figura 11 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

La publicación de documentos referentes a la especie arbórea *Abies religiosa* se ha ido incrementando en los últimos años pero se tienen documentos referentes desde 1972. El 2013 es el año con mayor número de publicaciones seguido del 2016, 2017 y 2018 con 9 publicaciones en cada año.

7.3.2 Documentos según su fuente y año de publicación

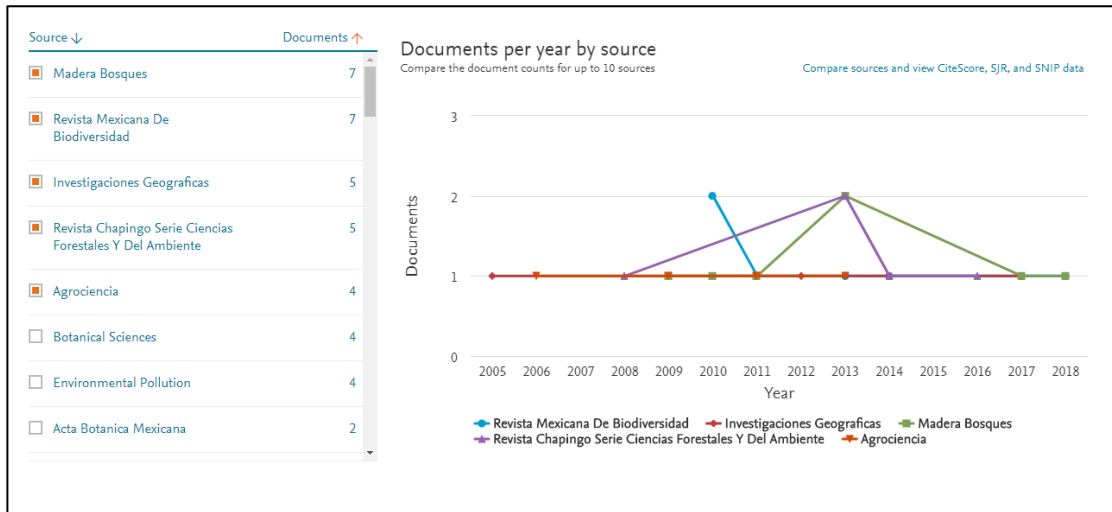


Figura 12 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS

Si consultamos la fuente de la información observaremos que las cinco principales revistas que han publicado sobre la especie *Abies religiosa* son mexicanas, esto debido a que al tratarse de una especie limitada a la parte central de la República Mexicana solo son dependencia e instituciones de este país las que generan información sobre la especie; las revistas con más artículos relacionados al oyamel son Madera Bosques y Revista Mexicana de Biodiversidad con siete artículos e Investigaciones Geográficas y Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales con cinco publicaciones cada una y finalmente la Revista Agrociencia.

7.3.3 Documentos por Autor

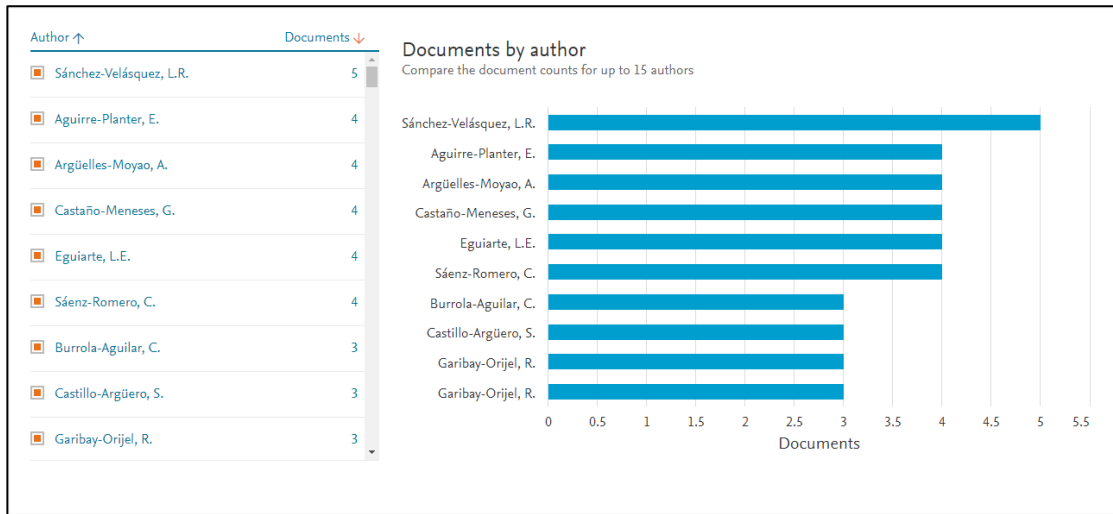


Figura 13 Documentos por Autor. Fuente: SCOPUS

En cuanto a los autores igualmente destacan científicos mexicanos como el Dr. Lázaro Rafael Sánchez-Velásquez del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA) de la Universidad Veracruzana y la Dra. Erika Aguirre Planter del Instituto de Ecología de la UNAM y el Dr. Argüeyes Moyao del Departamento de Botánica del instituto de Biología de la UNAM.

7.3.4 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones

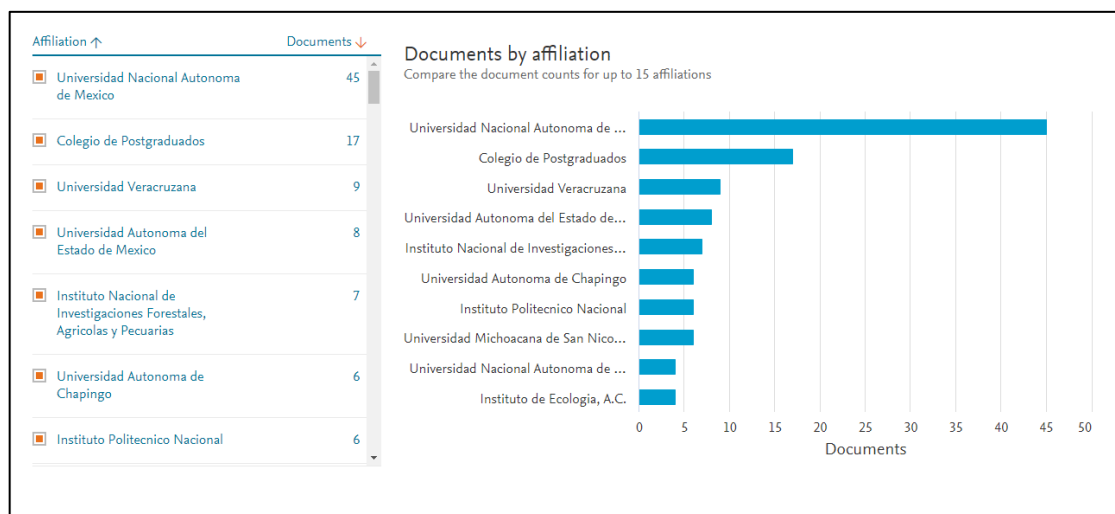


Figura 14 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS

De entre las instituciones o dependencias que más publicaciones tienen registradas en Scopus® son la UNAM con 45 publicaciones, El Colegio de Postgraduados con 17, la Universidad Veracruzana con nueve artículos, la Universidad Autónoma del Estado de México con ocho, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias con siete, la Universidad Autónoma Chapingo con 6 publicaciones, entre otras.

7.3.5 Documentos según su país de origen

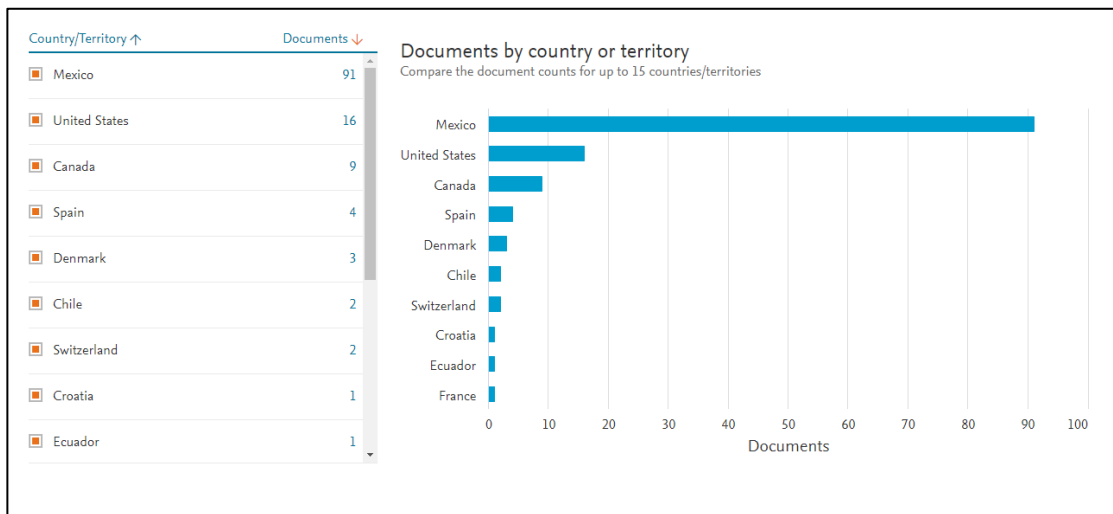


Figura 15 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS

Una vez revisadas las fuentes y los autores de las publicaciones sobre la especie *Abies religiosa* no es de sorprender que la lista de los países con mayor número de publicaciones registradas en Scopus® la encabece México con 91 publicaciones, seguido de Estados Unidos con 16 y Canadá con nueve, seguidos por otros países con menos publicaciones como España, Dinamarca, Chile, Suiza, Croacia, Ecuador, entre otros. De los 102 documentos localizados por Scopus® 98 corresponden a artículos científicos, mientras tres son revisiones y apuntes de conferencia.

7.4 *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham

El *A. religiosa*, el de mayor distribución de los oyameles en México, principalmente se encuentra en la zona centro del país en forma de rodales puros y amplios en comparación a otras masas forestales de la misma especie, principalmente en los estados de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Guerrero, Tlaxcala y Ciudad de México (Eguiarte Fruns & Furnier, 1997; SIRE, 2012).

En el estado de México la superficie cubierta por *A. religiosa* es de 65002.670 ha de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000, serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, aproximadamente un 2.91% del territorio estatal, en forma de manchones dispersos y agrupados en superficies altas en formaciones montañosas y volcánicas.

Principalmente distribuido en los municipios de San José del Rincón, Donato Guerra, El Oro, Villa de Allende, Jocotitlán y San Felipe del Progreso al oeste del estado, en Amanalco, Zinacantepec, Temascaltepec, Almoloya de Juárez, Coatepec de Harinas, Villa Guerrero, Tenango del Valle, Toluca y Valle de Bravo en otra agrupación de masas forestales cercana a la Ciudad de México y en los municipios de Xalatlaco, Ocoyoacac, Santiago Tianguistenco, Huixquilucan, Lerma, Naucalpan de Juárez alargándose hasta Jilotzingo, Xonacatlán, Oztolotepec, Temoaya, Isidro Fabela, Nicolás Romero, Jiquipilco, Morelos y Villa del Carbón.

En otra agrupación hacia el oriente del estado, en la región del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl abarcando los municipios de Atlautla, Amecameca, Tlalmanalco, Ecatzingo, Chalco, Ixtapaluca, Nanacamilpa y Texcoco, siempre limitándose a cierto rango altitudinal cercano al cinturón de nubes que alcanzan las elevaciones montañosas y a los sitios con mayores concentraciones de humedad y con una exposición que dificulta el acceso a la radiación solar como barrancas, cañadas, exposición de ladera a contra luz.

Las características y requerimientos de la especie *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Tabla con las características de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham

Característica	Descripción	Fuente
Nombre Científico	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham	(SIRE, 2012)
Nombres comunes	Abeto – Veracruz; acshoyatl – México; bansú (lengua otomí) – Hidalgo; ocopetla - Teotepec, Gro.; oyamel - México, Hidalgo; pinabete – Michoacán y Jalisco; thúcum (lengua tarasca) – Michoacán; ueyomel - Ixcaltepec, Gro.; xolócotl – México	(SIRE, 2012)
Origen	Árbol nativo de México	(SIRE, 2012)
Forma biológica	Árbol monóico de 35 a 40 m de altura, en ocasiones hasta 60 m, y diámetro normal de entre 0.40 a 1.80 m, copa cónica, simétrica y aguda	(Eguiarte Fruns & Furnier, 1997), (SIRE, 2012)
Hojas	Perennifolio, con hojas alternas	(SIRE, 2012)
Flores	Las estructuras reproductivas masculinas y femeninas se presentan desde diciembre hasta marzo, la floración llega a su máximo en los meses de mayor temperatura. Surgen entre los 21 y 25 años o más.	(Santillán-Peréz, 1991; SIRE, 2012)
Frutos	La fructificación se presenta de noviembre a enero, la dispersión de las semillas ocurre entre marzo y abril. Surgen entre los 21 y 25 años o más y tarda más en rodales densos.	(Santillán-Peréz, 1991; SIRE, 2012)
Semillas	Dispersión polícora y con viabilidad mayor a 3 años. Se dan cada dos años entre los meses de diciembre y marzo.	(Niembro, 1980, Santillán-Peréz, 1991)
Raíz	Raíz principal vertical pivotante con raíces secundarias gruesas que pueden llegar a extenderse tanto como la	--

Característica	Descripción	Fuente
	principal que se extiende a grandes profundidades pero siempre dependiendo de las propiedades físicas del suelo así como su riqueza en nutrientes	
Asociación vegetal	Principalmente en los límites superior e inferior se mezclan con otro tipo de vegetación, en el límite inferior con cedro, salix, madroño y pino y en el superior con aile, pino y encino, aunque también se encuentran masas de la misma especie.	(Champo-Jiménez, Valderrama-Landeros, & España-Boquera, 2012; INEGI, 2014)
Altura	Sobrepasan los 30 metros	(INEGI, 2014)
Estratos en sus estructuras	Estrato rasante, estrato herbáceo, estrato arbustivo, estrato arbóreo inferior (solo en límites altitudinales inferiores) y estrato arbóreo superior	--
Factores físicos y climáticos que lo afectan	Altitud, relieve, temperatura, precipitación, humedad relativa, drenaje, profundidad del suelo, textura, estructura y fertilidad del suelo. Protegidos de los fuertes vientos e insolación intensa	(INEGI, 2014)
Regeneración natural	La reproducción inicia alrededor de los 25 a 40 años, tiene un ciclo fenológico de 2 años, floración en diciembre, polinización en marzo abril, conos en noviembre y diseminación en diciembre. Las plántulas se establecen mejor en áreas abiertas e iluminadas, sin competencia, por lo que crece mejor en los límites de la comunidad.	(Manzanilla, 1974; Santillán-Peréz, 1991)
Coordenadas geográficas	Entre los 17°30' a 20°00' de latitud norte y los 97°104' de longitud oeste	(SIRE, 2012)
Entidades donde se distribuye	Ciudad de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, México, Guerrero y Tlaxcala	(SIRE, 2012)

Característica	Descripción	Fuente
Altitud Óptima (msnm)	3,200	(SIRE, 2012)
Altitud Mínima (msnm)	2,000	(Castellanos-Acuña, Lindig-Cisneros, Silva-Farias, & Sáenz-Romero, 2014; INEGI, 2014; Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, et al., 2012; Santillán-Peréz, 1991; SIRE, 2012)
Altitud Máxima (msnm)	4,000	(SIRE, 2012; INEGI, 2014)
Temperatura Promedio (°C)	De 7 a 15, de 6 a 18	(SIRE, 2012, INEGI, 2014)
Temperatura Mínima (°C)	-7.5 a -11, -12	(SIRE, 2012)
Temperatura Optima (°C)	8 a 14	(Gómez Díaz et al., 2011)
Temperatura Máxima (°C)	25 a 30	--
Precipitación Media Anual Optima (mm)	1000-1800	(Gómez Díaz et al., 2011), (SIRE, 2012)
Precipitación Media Anual Mínima (mm)	600	(Gómez Díaz et al., 2011), (INEGI, 2014)
Precipitación Media Anual Máxima (mm)	3,000	(INEGI, 2014)
Meses de sequía óptimos	0 a 3	(Gómez Díaz et al., 2011)

Característica	Descripción	Fuente
Meses de sequía máximos	5 a 6	(Gómez Díaz et al., 2011)
Evaporación Total (mm)	800 a 1,400	--
Suelos	<p>Suelos muy jóvenes, de origen volcánico, andesitas, basaltos, riolitas, andosoles, leptosoles, cambisoles y acrisoles, histosol, inceptisol y espodosol. suelos profundos ricos en alófanos, gruesas capas de materia orgánica en descomposición, cañadas profundas, agrestes y una alta humedad relativa</p> <p>Suelos con estructura granular o en bloques; con acidez de medio ácido hasta neutrales y presentan geoformas con pendientes muy pronunciadas, las propiedades físicas del suelo influyen más en el desarrollo de oyamel que las químicas, la profundidad, el drenaje, la textura, estructura y el contenido de humus son propiedades decisivas en su desarrollo.</p>	(Fogel, 2012; INEGI, 2014; SIRE, 2012; Valenzuela Pablo & Jose, 2017)
pH del suelo	5 a 7	(SIRE, 2012)
Textura del suelo	Limoarenosos, arcilloarenosos, arenosos; con textura gruesa a media	(SIRE, 2012)
Estructura del suelo	Granular o en bloques	(SIRE, 2012)
Profundidad del suelo	60-120, generalmente profundos aunque también se localiza sobre suelos someros, en el Estado de México sobre capa delgada de cenizas volcánicas	(SIRE, 2012)
Pedregosidad del suelo	De ligera a moderada	(SIRE, 2012)
Drenaje	Bien drenados	(SIRE, 2012)

Característica	Descripción	Fuente
Humedad aparente	Húmedos la mayor parte del año	(SIRE, 2012)
Materia orgánica	Muy ricos, hasta 70%	(SIRE, 2012)
Condiciones del terreno preferentes	Laderas sombreadas y húmedas con pendientes medias a fuertes como barrancas, pendientes de entre 17 y 60%	(INEGI, 2014; Santillán-Peréz, 1991)
Exposición preferente	Norte, noreste y noroeste	(INEGI, 2014)

7.5 Zona de Estudio

El monte Tláloc, en la parte norte de la Sierra Nevada, cuenta con lomeríos y sierras con bosques de coníferas, encino y mixtos del centro de México, se encuentra cubierto por bosque templado de coníferas con predominancia de pinos (*Pinus montezumae*, *P. hartwegii*), encinos (*Quercus rugosa*, *Q. laurina*), ailes (*Alnus jorullensis*, *A. acuminata*), cedro blanco (*Cupressus lusitanica*) y oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham) el cual tiene su origen a partir de la biota que arribó por el lado norte del país (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez, & Tchikoué Maga, 2005).

En la zona de estudio los rangos altitudinales que recorre el bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham van de los 3,100 a los 3,500 msnm (Sánchez González, 2004) y cubre una superficie de aproximadamente 3,709 ha (INEGI, 2015). El estudio se centrará en una poligonal de una masa forestal de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham que abarca una superficie de 1,361 ha, donde se evaluarán las condiciones de declinación forestal, así como de regeneración natural realizando una comparación entre los distintos rangos altitudinales, poniendo especial atención a las zonas límite superior e inferior.

Realizando una búsqueda en Scopus® con la palabra clave Monte Tláloc se encontraron cuatro registros con los que se procede a realizar en análisis

bibliométrico, aunque se debe señalar que la revisión bibliográfica no se limita a la plataforma de Scopus®, encontrando diversa información sobre el sitio de estudio en libros, otros artículos, tesis de maestría y doctorado, documentos oficiales entre otros.

7.5.1 Documentos según su año de publicación.

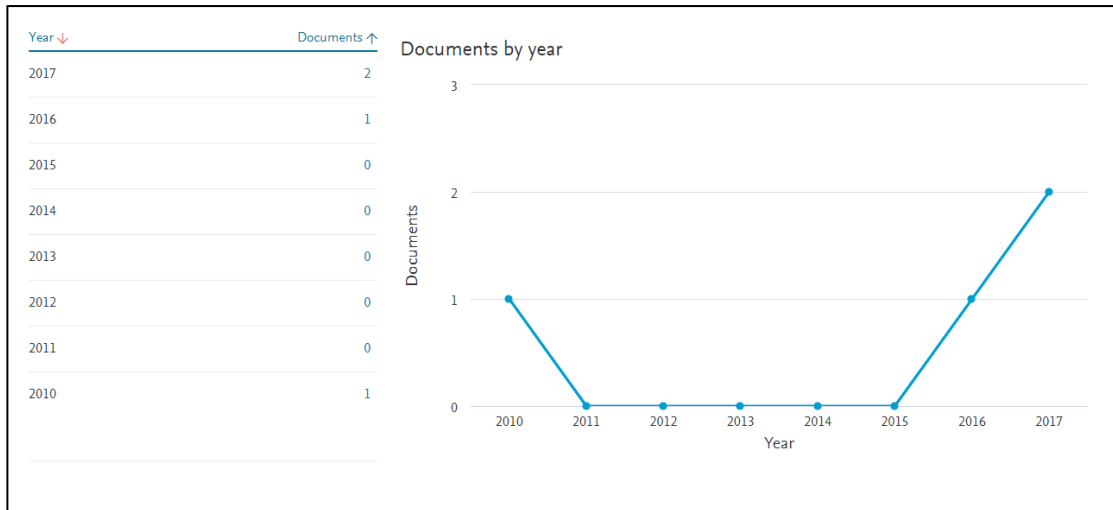


Figura 16 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

Se tiene registro de una publicación en el 2010, una más en el 2016 y dos para el 2017, dos elaboradas por la Revista Agrociencia y la Revista Fitotecnia Mexicana y las otras dos por la Revista de Dialectología y Tradiciones Populares y por la Revista Trees Structure and Function de los Estados Unidos. Tres de los cuatro documentos corresponden a artículos científicos y una revisión.

7.5.2 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones

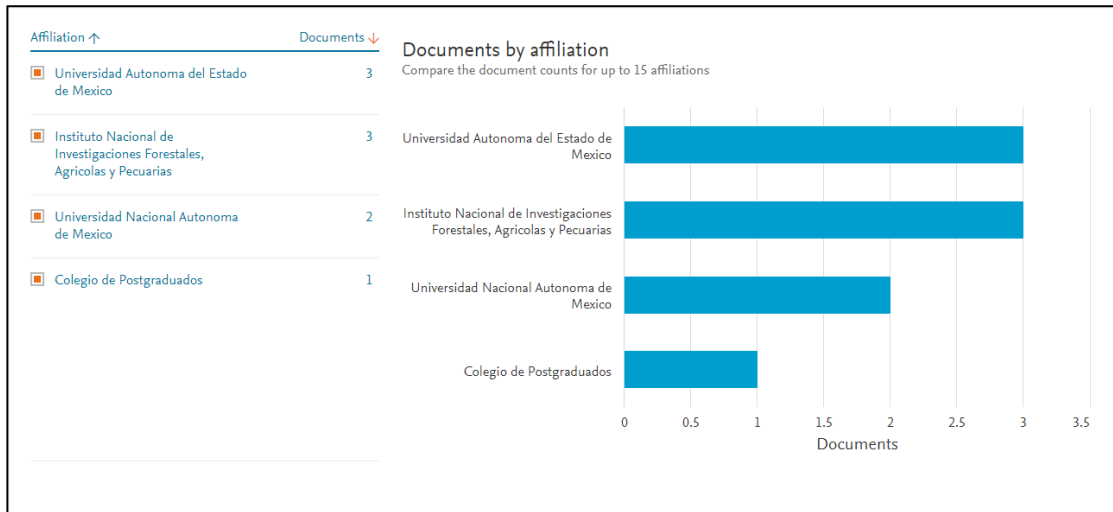


Figura 17 Documentos según la afiliación a dependencias o instituciones. Fuente: SCOPUS

Los documentos localizados por Scopus® se originaron en México a través de la Universidad Autónoma del Estado de México, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, la Universidad Nacional Autónoma de México y el Colegio de Postgraduados.

7.6 Declinación Forestal

Se han presentado casos de pérdida de arbolado por la declinación forestal prácticamente en bosques de todo el mundo (Sáenz-Romero et al., 2016), particularmente para la especie *A. religiosa*, se reporta el caso de El Desierto de los Leones, en la Ciudad de México (Granados-Sánchez, 2001; Castillo-Flores, López-López, López-Upton, Cetina-Alcalá, & Hernández-Tejeda, 2013; Rodríguez-Trejo, 2014), y más específicamente en las masas forestales de oyamel en el Monte Tláloc en el Estado de México (Flores-Nieves, López-López, Ángeles-Pérez, De la Isla-Serrano, & Calva-Vásquez, 2011).

La declinación forestal ocurre como un proceso donde intervienen diversos factores físicos, químicos y biológicos, que en conjunto, ocasionan una disminución gradual en la salud de las masas forestales o de los individuos arbóreos, ya sea por el desfase entre las variables climáticas actuales y el

clima óptimo para cada especie, climas extremos como sequías o heladas, la concentración de contaminantes en la atmosfera (como el ozono que propicia la caída de las hojas), lluvia acida que puede modificar el pH del suelo y las reacciones químicas de sus elementos, exceso o deficiencia de nutrientes en el suelo, debilitándolo y haciéndolo más propenso a las plagas y enfermedades, lo que disminuye su tiempo de vida (Granados-Sánchez, 2001; Rodríguez-Trejo, 2014; Sáenz-Romero et al., 2016), por ejemplo, en condiciones climáticas de sequía y de elevadas poblaciones del descortezador, los daños pueden ser observados en grupos de hasta 200 árboles afectados (CONAFOR, 2009 citado por Valenzuela Pablo & Jose, 2017).

Al ingresar la palabra clave en inglés “forest decline”, nos arroja un resultado de 14,697, refinando la búsqueda a las áreas de interés se reduce a 13,550 documentos con los que se realizará el análisis y se graficarán, para usos prácticos, solo los principales resultados de cada búsqueda.

7.6.1 Documentos según su año de publicación.

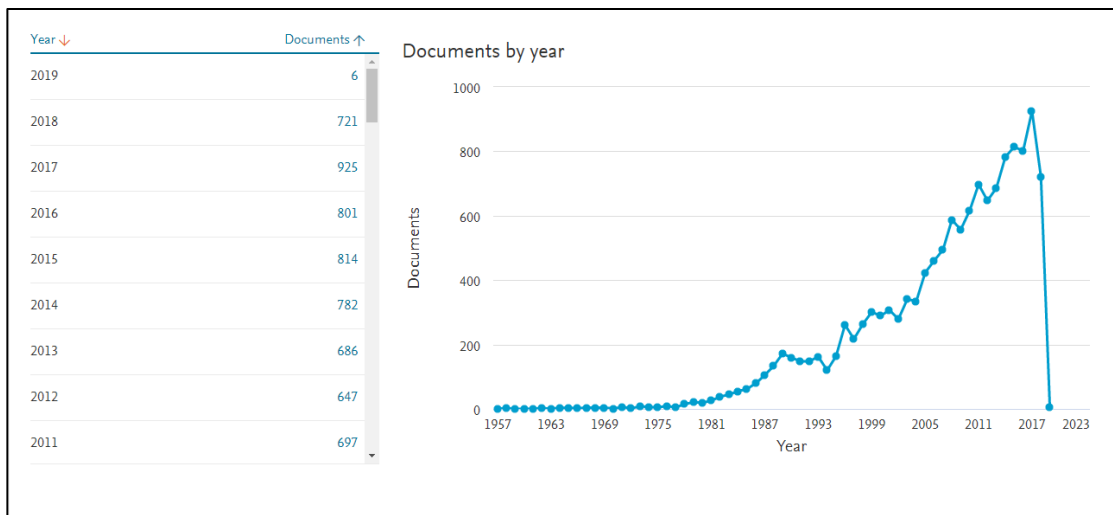


Figura 18 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

El tema de la declinación forestal tiene registros de mayor tiempo, ya que se tienen publicaciones desde 1957 aunque se ha notado un incremento a partir de

los ochentas teniendo al año 2017 con la mayor cantidad de publicaciones con 925 seguidos por el 2015 con 814, 2016 con 801 y 2014 con 782 publicaciones.

7.6.2 Documentos según su fuente y año de publicación

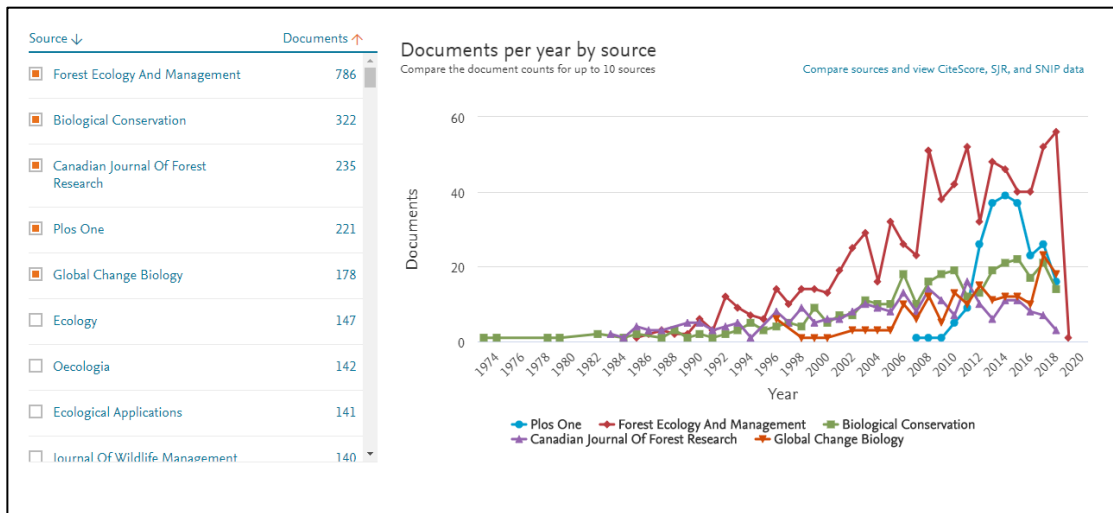


Figura 19 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS

Las fuentes de información y sus años de publicaciones se muestran en la gráfica anterior denotándose que la revista Forest Ecology and Management cuenta con la mayor cantidad de publicaciones respecto al tema de declinación forestal, 786, seguido por la revista Biological Conservation con 322 publicaciones, la revista Canadian Journal of Forest Research con 235 publicaciones entre otras.

7.6.3 Documentos por Autor

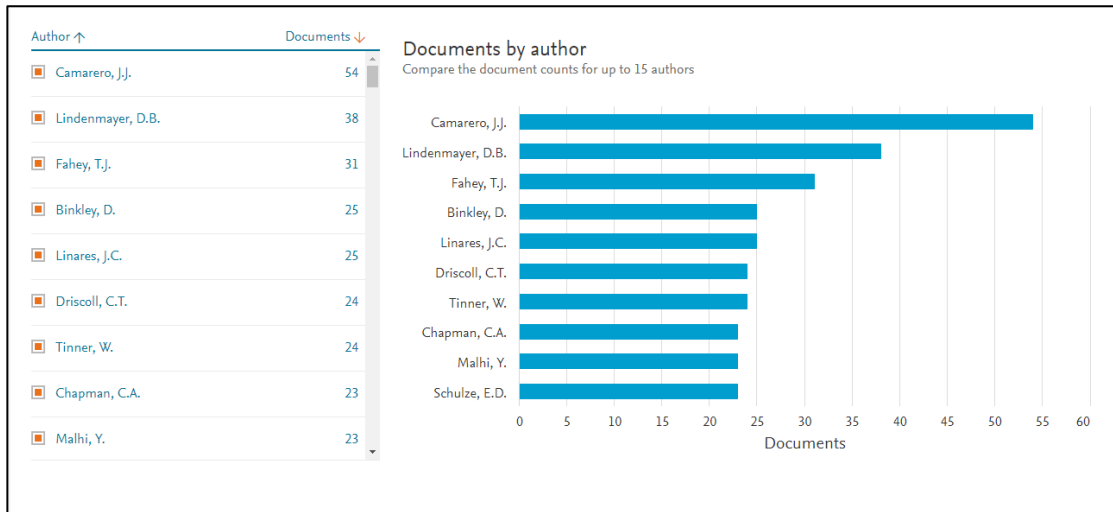


Figura 20 Documentos por autor. Fuente: SCOPUS

En la gráfica anterior se muestran los principales autores con mayor número de publicaciones referentes a la declinación forestal registradas en Scopus®, el autor que encabeza la lista cuenta con 54 publicaciones referentes al tema. Por instituciones destaca la USDA Forest Service, la Chinese Academy of Science, la United States Geological Survey entre otras y los países que tiene mayor cantidad de publicaciones referentes a la declinación forestal son Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemania, Australia, China, entre otros. De los 13,550 documentos, 12,296 corresponden a artículos científicos, 542 revisiones, 354 documentos de conferencias, 182 capítulos de libros, 74 artículos de prensa, entre otros.

7.7 “Global Warming” AND “Abies”.

Finalmente, con ayuda del operador booleano “AND”, buscamos en Scopus® las palabras clave “Global Warming” junto con la palabra clave “Abies” para realizar una búsqueda a la par, y que aparezcan en el título del documento, en las palabras clave o en el resumen; se obtuvieron 254 resultados, los cuales se reducen a 247 documentos después de refinar la búsqueda solo considerando las áreas de Agricultural and Biological Sciences, Environmental Science y Earth

and Planetary Sciences, a continuación se presentan las gráficas del análisis bibliométrico para “Global Warming” AND “Abies”.

7.7.1 Documentos según su año de publicación.

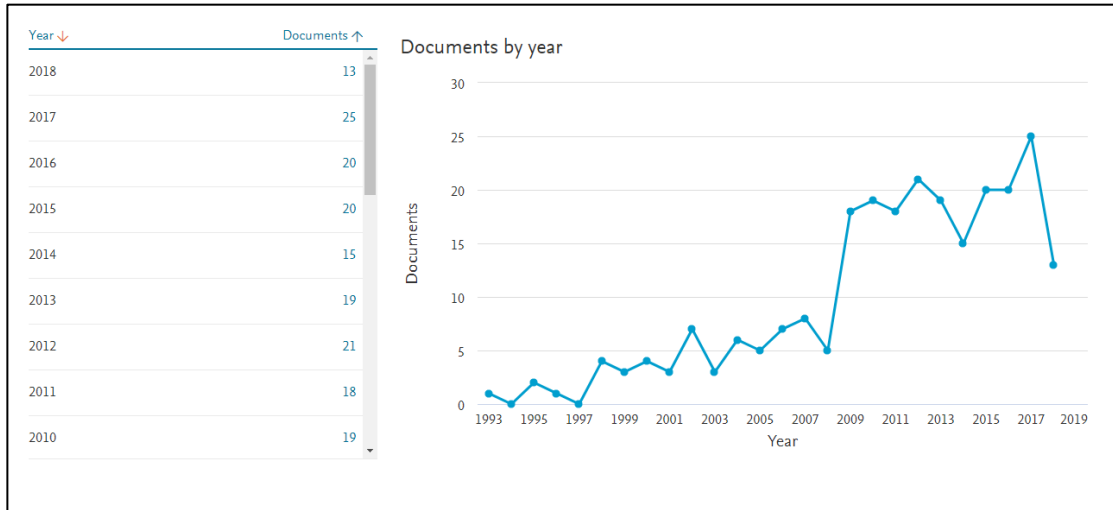


Figura 21 Documentos según su año de publicación. Fuente: SCOPUS

De los 247 documentos que relacionan las palabras calentamiento global con *Abies* la mayoría se han producido en la última década, siendo el 2017 el año con más publicaciones, y se tienen registros desde 1993.

7.7.2 Documentos según su fuente y año de publicación

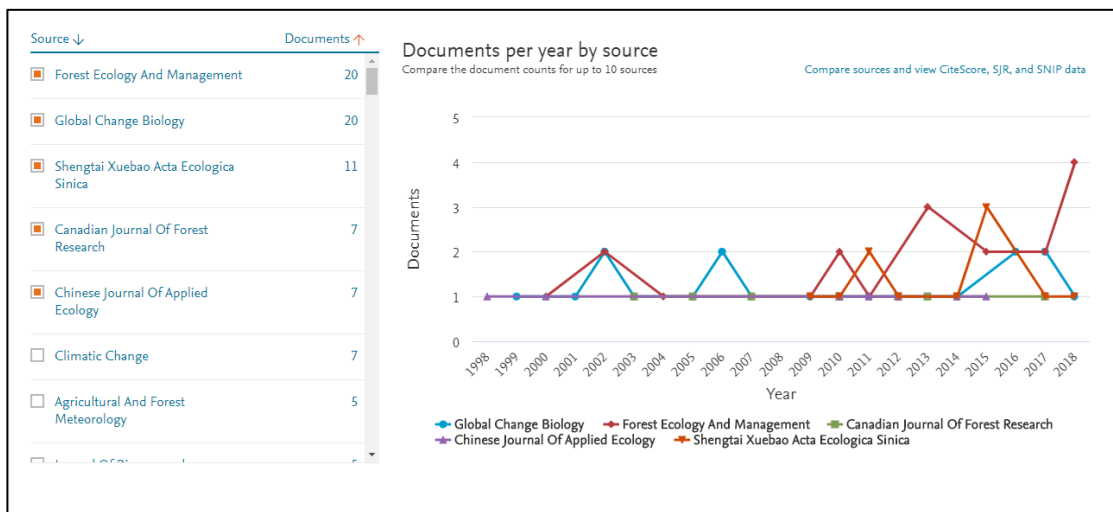


Figura 22 Documentos según su fuente y año de publicación. Fuente: SCOPUS

Las principales fuentes de donde proviene la información buscada son editoriales de Estados Unidos, Elsevier y Wiley-Blackwell con las revistas Forest Ecology and Management y Global Change Biology, seguida de la Ecological Society of China con la revista Shengtai Xuebao Acta Ecológica Sínica, la NRC Research Press con la revista Canadian Journal of Forest Research y la editorial china Ying Yong Sheng Tai Xue Bao Bian Ji Wei Yuan Hui con la revista Chinese Journal of Applied Ecology.

7.7.3 Documentos por Autor

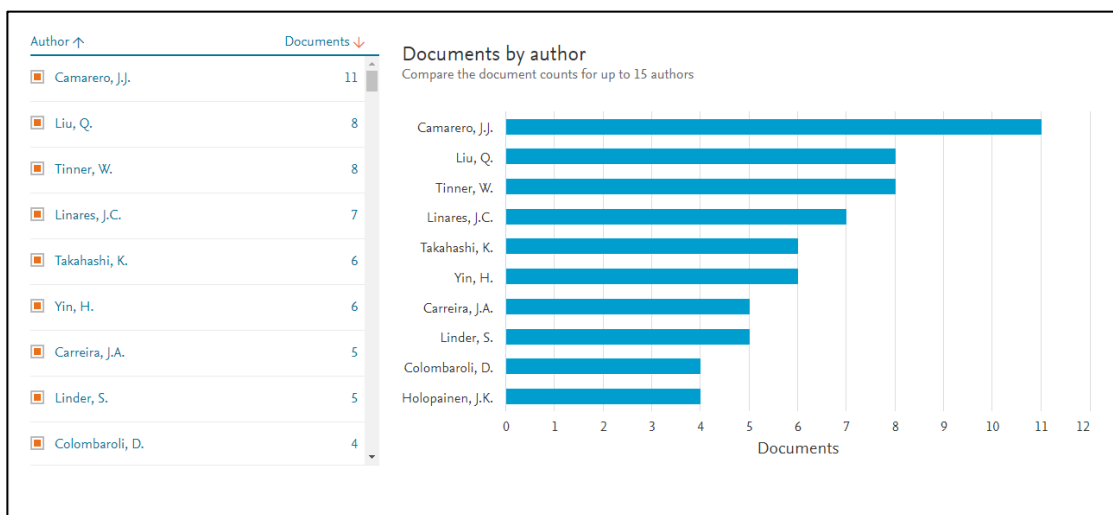


Figura 23 Documentos por autor. Fuente: SCOPUS

De los autores relacionados al tema destacan, de España, los científicos Julio Camarero del Instituto Pirenaico de Ecología y Linares, J. C. del Departamento de Sistemas Físicos, de Suiza Tinner, Willy del Center for Climate Change Research, de China Liu Qing del Chengdu Institute of Biology Chinese Academy of Sciences y de Japón Takahashi Koichi del Departamento de Biología de la Universidad Shinshu, entre los principales publicistas referentes al tema de calentamiento global relacionado a la vegetación de oyamel.

7.7.4 Documentos según su país de origen

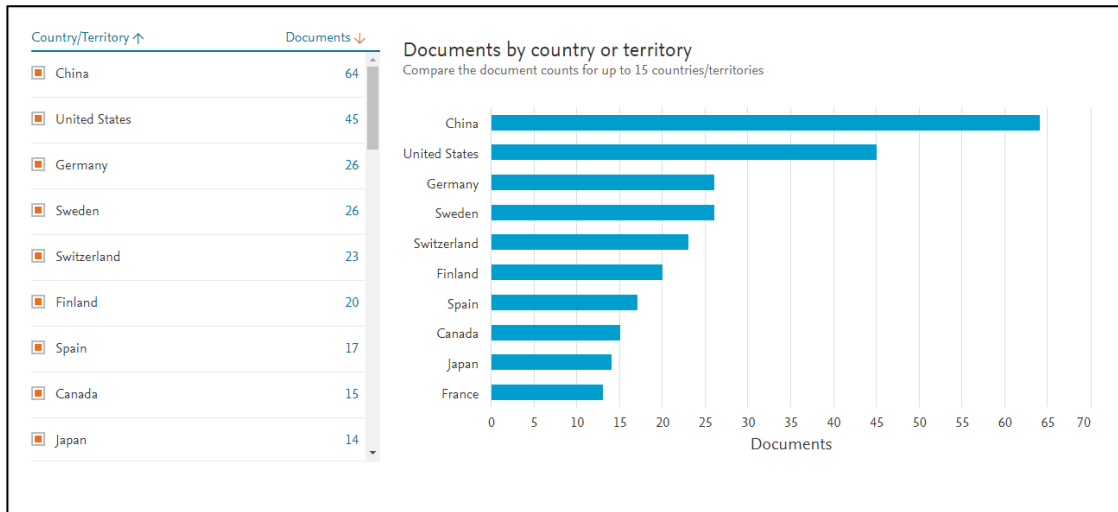


Figura 24 Documentos según su país de origen. Fuente: SCOPUS

Los países que cuentan con una mayor cantidad de documentos publicados y registrados en Scopus® son China, Estados Unidos, Alemania, Suecia, Suiza, Finlandia, entre otros.

7.7.5 Documentos según el tipo de documento

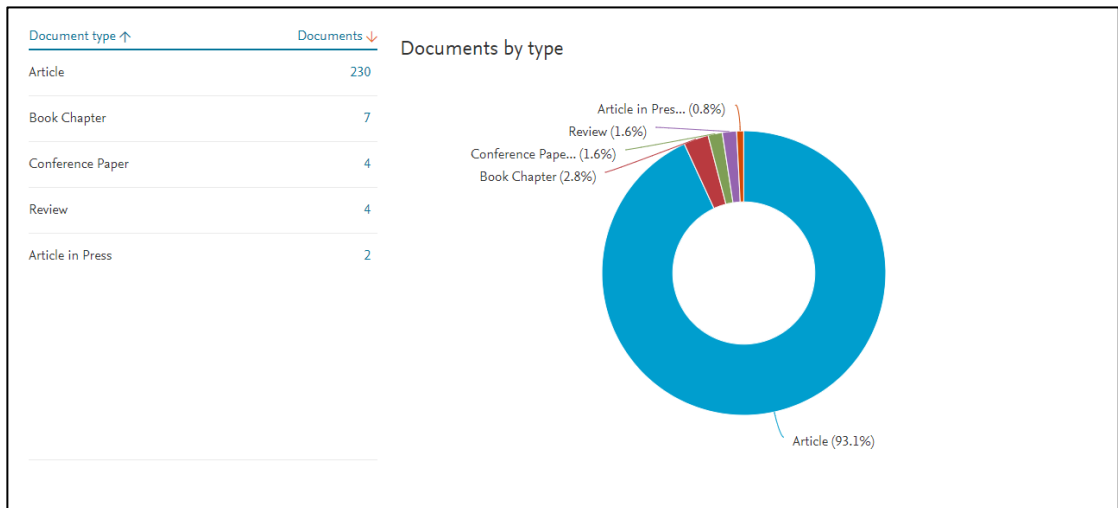


Figura 25 Documentos según el tipo de documento. Fuente: SCOPUS

De los 247 documentos localizados por Scopus® 230 corresponden a artículos científicos, siete a capítulos de libros, cuatro a documentos de conferencias, cuatro revisiones y dos artículos de prensa.

7.8 Enfoques metodológicos

Existen diversas metodologías para medir o pronosticar los cambios en la distribución de la vegetación por efecto del cambio climático, Vose, Peterson, & Patel-Weynand en el artículo "Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems" del 2012 mencionan que la mayoría de los modelos predictivos sobre la distribución de la vegetación pronostican un desplazamiento latitudinal hacia el norte y un desplazamiento altitudinal hacia rangos superiores de la vegetación.

Mediante un modelo Mapped Atmosphere–Plant– Soil system, MAPSS, y un modelo dinámico, se simuló los cambios en la distribución vegetal a través de varios escenarios con diversos gradientes de temperatura y considerando la disposición de carbono en el suelo en los Estados Unidos, concluyendo que un aumento de 4.5 grados centígrados podría causar estrés en la vegetación por efecto de la sequía en aproximadamente 50% del área forestal de ese país.

Jennings & Harris, en el suroeste de los Estados Unidos, en el año 2017, identificaron las relaciones entre 20 variables climáticas y 39 ecosistemas (composición vegetal) para entender la magnitud de estas relaciones, y donde eran más fuertes calcularon la cantidad de área proyectada para los años 2030, 2050 y 2070 para poder pronosticar, considerando los cambios climáticos, la cantidad de superficie de cada ecosistema donde se espera que el clima cambie.

Utilizaron datos generados de la distribución de la vegetación de la USGS National Gap Analysis Program, obtuvieron las variables climáticas desde 1950 al 2000 y generaron nuevas variables a través de métodos de cálculo, como por ejemplo el Déficit de Presión de Vapor relacionada a la evapotranspiración y a la aridez, y utilizaron proyecciones climáticas a los años 2030, 2050 y 2070,

utilizando el modelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL CM3) para realizar las proyecciones.

Por otra parte Geremew & Jebessa, en el año del 2018, en Etiopía, utilizaron una distinta metodología mediante series de tiempo Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, generada por espectroscopia de imagen de resolución moderada, MODIS, a bordo de los satélites de la NASA, utilizando datos de temperatura y precipitación con datos de la Estación de Riesgos Climáticos, la CHIRPS, y finalmente los límites de las ecorregiones obtenido en la plataforma Google Earth (GEE).

De igual forma, Palmate, Pandey, Kumar, Pandey, & Mishra en el año de 2017 en la India, evaluaron los efectos de los cambios climáticos (temperatura y precipitación) en la cubierta vegetal y forestal tomando información de 18 estaciones climatológicas y las cubiertas forestales y vegetales obtenidas del Satélite LANDSAT y trabajadas con ERDAS Imagine y ArcGIS; para monitorear los cambios temporales en la vegetación utilizaron el método NDVI, el estudio reveló que la temperatura se relaciona estrechamente con la distribución de la vegetación.

En México, Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, et al. en el 2012, utilizan tres modelos de circulación general y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero para predecir y mapear los futuros nichos ecológicos para *Abies religiosa*, mediante un modelo de circulación general que considera seis variables como temperatura del mes más cálido, temperatura media del mes más frío temperatura media anual, precipitación media anual, índice de sequedad, diferencia de temperatura verano-invierno, estimando que se reducirá, en México, la superficie óptima para el nicho ecológico a un 69.2 en la década que rodea 2030, 87.6 para alrededor del 2060 y 96.5% para 2090 y proponen realizar migración asistida a 275 metros más arriba en el rango altitudinal.

En el estado de Veracruz, Estrada-Contreras, Equihua, Castillo-Campos, & Rojas-Soto, en el 2015, exploran los posibles cambios en la distribución de 51

especies asociadas a ecosistemas forestales en ese estado, mediante un Algoritmo Genético para la Producción de Grupos de Reglas (GARP) que genera modelos de nichos ecológicos y variables climáticas, así como MAXENT, hasta el año de 2050, obteniendo resultados de afectación en la distribución del bosque tropical perennifolio en un 53%, de 16% para el bosque de coníferas y de 49% para el bosque mesófilo de montaña, causando la reducción total de algunas especies y extendiéndose la superficie para otras especies.

Monterroso-Rivas et al. (2013), para la modelación de hábitat potencial de ocho especies arbóreas del bosque mesófilo, emplearon el software Biomapper, variables topográficas, paisajísticas y climáticas y los Modelos de Circulación General (MCG) European Centre Hamburg Model (ECHAM5) y Hadley Centre Global Environmental Model (HADGEM) concluyendo que seis de las especies estudiadas presentarán un impacto negativo en su distribución futura.

Gómez Díaz et al. en el 2011 analizan los impactos del cambio climático en la distribución potencial de 16 especies forestales en la República Mexicana, mediante un escenario base de las variables climáticas así como sus áreas de influencia, mediante MCG de cambio climático, el balance de humedad del suelo y la distribución actual de la vegetación y utilizan diversos modelos para realizar comparaciones, como HADGEM-01, que establece las condiciones menos favorables para la mayoría de las especies, el modelo alemán MPI-ECHAM-5 y el modelo americano GFDL-CM-2.0 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), los cuales no tuvieron diferencias significativas entre ellos, concluyendo que las condiciones de la superficie con categoría de “adecuadas” para las vegetación de zonas templadas se reduciría, afectando principalmente a *Abies religiosa*, así como a especies de zonas tropicales y zonas áridas.

Por otra parte, en el norte del país, López Santos, Pinto Espinoza, Ramírez López, & Martínez Prado (2013) modelan, considerando datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional, escenarios de cambios climáticos de la temporada 2010-2039 del INE-SEMARNAT, el índice de aridez y considerando propiedades edáficas como condiciones topográficas, susceptibilidad a la

erosión, la erosión laminar del suelo causada por el viento, entre otras y mediante modelos de circulación general, bajo dos distintos escenarios, predicen y concluyen, que para el año 2039 las condiciones climáticas habrán deteriorado la calidad y salud del ambiente.

Pérez-Miranda, Moreno-Sánchez, González-Hernández, & Arriola-Padilla (2014) en su artículo “Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. Et. Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático en el Estado de México”, mediante dos modelos de circulación general, GFDL 2.0 y HADGEM con dos distintos escenarios de cambio climático y proyectado para el 2030 y 2050, encuentran que las zonas con aptitudes altas para el establecimiento de estas especies se reducirá a pequeños manchones en el norte del estado y escasamente en la Sierra Nevada, zona donde se ubica el Monte Tláloc.

Metodologías referentes a las adaptaciones o modificaciones de los patrones de las especies vegetales son referenciadas por Venegas-González, Roig, & Gutiérrez, en Chile (2018), donde estudian la influencia del clima, en especial la sequía, sobre el crecimiento radial y el establecimiento de árboles, por lo que realizaron muestreo forestal y estimaron las cronologías de crecimiento y establecimiento de árboles, además utilizaron datos de estaciones meteorológicas y bases de datos del Centro Climático de la Universidad East Anglia (Climatic Research Unit CRU TS3.24) para estudiar la relación entre balance hídrico y crecimiento radial, encontrando que el 75% de los años con crecimientos bajos se asociaban a eventos de sequía.

Trabajo similar al que realizan en México Villanueva-Díaz et al. (2017) con *Pinus oocarpa* en el bosque de la Primavera, en Jalisco, donde a través de núcleos de crecimiento (anillos de crecimientos) e información climática del Extractor Rápido de Información Climática, ERIC 2013, y la Base de Datos Hidrométrica de la Comisión Nacional del Agua concluyen que el incremento de la temperatura en la región del Bosque de la Primavera fue de aproximadamente 1.5 grados centígrados en el periodo de 1956 al 2001 y que parece impactar negativamente el crecimiento radial de las especies estudiadas.

Un trabajo similar en España, en el año 2015, Linares et al estudian los efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra salzmannii* en el sur de la península ibérica y aunque denotan que el clima por si solo no fue el único factor de muerte o disminución del crecimiento (declinación forestal) en eventos de extrema sequía en la década de los noventas, notaron en *Abies pinsapo*, que los individuos con mayores diámetros, 80% menores a 20 centímetros y 5% con diámetros mayores a 40%, se ubican en los gradientes altitudinales inferiores, mientras que en el rango superior se encuentran individuos con diámetros menores a 10 centímetros establecidos recientemente y una mayor área basal de individuos muertos en el rango inferior y que decrece conforme se incrementa al altitud. Utilizando proyecciones climáticas realizadas con modelos globales del periodo 2011-2070, modelos de crecimiento de las especies estudiadas y considerando diversos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero del Panel Intergubernamental del Cambio Climático ajustaron modelos de crecimiento-clima.

En Oaxaca, con la especie *Pinus patula*, Sáenz-Romero, Beaulieu, & Rehfeldt en el 2011, comparan la variabilidad genética y el rango altitudinal en cámaras de crecimiento simulando panoramas futuros de calentamiento global y mencionan que el cambio climático desfasará la variabilidad genética de las especies en relación a los climas cambiantes. El experimento consistió en recolectar regeneración natural de pino a distintos gradientes altitudinales, cada 50 metros y se cultivaron en cámaras de crecimiento en el Centro Forestal de Laurentides, Quebec, bajo dos distintos gradientes de temperatura, uno a 17 grados centígrados y otro simulando un escenario con mayor temperatura, los resultados obtuvieron plántulas más altas en el rango altitudinal inferior, 2400 msnm y más pequeñas en lo rangos altitudinales mayores, 3050 msnm.

Referente a la especie *Abies religiosa*, Castellanos-Acuña, Lindig-Cisneros, Silva-Farias, & Sáenz-Romero (2014), notan diferencias genéticas relacionadas al gradiente altitudinal (2850-3550 m s.n.m.) en comunidades cercanas a la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, notando que las comunidades

de los rangos altitudinales superiores tienen acículas más largas y conos más pequeños y sugieren realizar migración asistida utilizando semillas de un rango altitudinal inferior para plantarlas en rangos altitudinales superiores, opiniones que comparten Sáenz-Romero et al. (2016) en su investigación “Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático”.

Literatura Citada

Aquino-Ramírez, M., Velazquéz-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-

Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25, 1–16.

<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521773>

Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the

temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin*

Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(251), 237–276.

<https://doi.org/10.1080/14786449608620846>

Biota, A. (2017). The Tertiary History of the Northern Temperate Element in the

Northern Latin, (July 2014). <https://doi.org/10.2307/2656952>

Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero,

calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 2–12.

<https://doi.org/1607-6079>.

Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., & Sáenz-

Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la reserva de la biósfera de la mariposa monarca,

Michoacán provisional. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>

Castillo-Flores, J. D., López-López, M. A., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M.,

& Hernández-Tejeda, T. (2013). Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 175–184.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.06.038>

Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L. (2012). PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA MONARCA , 18(2), 143–157.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.074>

Critchfield, W. B. (1983). *Impact of the Pleistocene on the Genetic Structure of North American Conifers*. Retrieved from
<https://books.google.com.mx/books?id=Vx5wHAAACAAJ>

Eguiarte Fruns, L. E., & Furnier, G. R. (1997). CONABIO , Número de Referencia B138 Area de Conocimiento : Ecológico y Genético Responsables : Glenn R . Furnier y Luis E . Eguiarte Fruns Colaboradores : Erika Aguirre Planter y Andrés Keiman Freire . Instituto de Ecología , UNAM. *Planter*.

Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Castillo-Campos, G., & Rojas-Soto, O. (2015). Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: An approach using ecological niche modelling. *Acta Botanica Mexicana*, 2015(112), 73–93.

Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, C.-Á. y T.-V. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. *Http://Atlasclimatico.Unam.Mx/Inecc/Atlas_2_190215_documentacion.Pdf*, 1–22. Retrieved from
http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf

Flores-Nieves, P., López-López, M., Ángeles-Pérez, G., De la Isla-Serrano, M., & Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. en proceso de

declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.*, 2(8), 9–20.

Fogel, R. B. (2012). *Cambio climático, alteraciones ambientales y pobreza en el*

Paraguay. (CLACSO, Ed.) (1. ed. en). Retrieved from

http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio

[climatico__Ff%3Afacetcollections%3A3%3A3%3ARecursos](http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio)

[electrónicos%3A%3A__Ff%3Afacetfields%3Atitle%3Atitle%3ATítulo%3A%](http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio)

[3A__P0%2C8__Orightresult__X6__T?lang=spi&suite=cobalt](http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio)

Fourier, J. (1827). Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires.

Geremew, T., & Jebessa, H. (2018). Climate change and its effects on vegetation phenology across ecoregions of Ethiopia. *Global Ecology and Conservation*, 13, e00366. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.e00366>

Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., TINOCO RUEDA, J. Á., TOLEDO MEDRANO, M. L., CONDE ALVAREZ, C., & GAY, C. (2011). Assesing current and potential paterns of 16 forest species driven by climate change in Mexico. *Atmósfera*, 21(1), 31–52.

Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*, 21(1), 35–56.

Granados-Sánchez, D. y F. L.-R. (2001). Declinación forestal. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 7(1), 5–13.

Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>

Holt, R. D. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(9), 311–315.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90088-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90088-U)

INEGI. (2014). Guía para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V, 195.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Escala 1:250,000, Serie V*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>

Islas Báez, A., Pérez Miranda, R., González Hernández, A., Romero Sánchez, M. E., & Velasco Bautista, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Ra Ximhai*, 49–62. <https://doi.org/10.35197/rx.11.01.e3.2015.03.ai>

Jennings, M. D., & Harris, G. M. (2017). Climate change and ecosystem composition across large landscapes. *Landscape Ecology*, 32(1), 195–207. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0435-1>

Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). Supporting Online Material for “A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century.” *Science*, 320(5884), 1–19. Retrieved from <papers3://publication/uuid/883ACB28-097E-4331-AE5E-ACB168E17504>

Linares, J. ., Tíscar, P. A., Camarero, J. J., Sangüesa, G., Domínguez-Clavijo, M., & Carreira, J. A. (2015). Efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra salzmannii* en el sur de la península ibérica: Tendencias pasadas, presentes y futuras. *Los Bosques y La Biodiversidad Frente Al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación En España*. 614 Pp., 255–269. Retrieved from http://origin.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap19-efectosdelcambioclimaticosobrelcrecimientodeabiespinsapoypinusnigrasalmanniiensurdela_tcm7-403997.pdf

Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005).

Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11(1), 57–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911109>

López Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26, 479–498.

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Teviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25, 1–16. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>

Manzanilla, H. (1974). *Investigaciones epidométricas y silvícolas de bosques mexicanos de Abies religiosa*. (S. de A. y Ganadería, Ed.). México.

Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 362–371. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>

Martínez, M., & Matuda, E. (1979). *Flora del Estado de México*.

Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 29–43. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.029>

Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES) – A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- National Centers for Environmental Information. (2015). *NOAA: 2015 es el año más caluroso globalmente por el margen más amplio en el registro*. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2015/13/supplemental/page-1>
- Oros-Ortega, I., Andrade-Torres, A., Lara-Pérez, L. A., Guzmán-Olmos, R. F., Casanova-Lugo, F., Sáenz-Carbonell, L. A., & Córdova-Lara, I. (2017). Ectomycorrhizal ecology, biotechnology and taxonomy for the conservation and use of *Abies religiosa* in temperate areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 411–426. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.11.060>
- Palmate, S. S., Pandey, A., Kumar, D., Pandey, R. P., & Mishra, S. K. (2017). Climate change impact on forest cover and vegetation in Betwa Basin , India. *Applied Water Science*, 103–114. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0222-6>
- Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Arriola-Padilla, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 18–33.
- Phillips, B. S. (2008). A Brief Tutorial on Maxent.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de Vegetación su Ecología Manejo e Historia, 1(November), 891. Retrieved from <http://www.liverpool.com.mx/tienda/incendios-de-vegetación-su-ecología-manejo-e-historia-vol-1/1038100650?skuld=1038100650>
- Rzedowski, J. (1978a). *Vegetación de México*. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ed.) (1a Edición). México. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- Rzedowski, J. (1978b). *Vegetación de México*.
- Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Altitudinal genetic

variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia*, 45(3), 399–411. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957623098&partnerID=tZOtx3y1>

Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXII(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacán state, México. Impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.03.004>

Sánchez González, A. (2004). *Análisis sinecológico florístico y biogeográfico de la vegetación del norte de la Sierra Nevada*. Universidad Autónoma Chapingo.

Santillán-Peréz, J. (1991). *Silvicultura de las coníferas de la región central*. Universidad Autónoma Chapingo.

SIRE. (2012). *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.). *Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*, 200(4), 1–7. Retrieved from [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies religiosa.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf)

Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity*

Informatics, 2(0), 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>

Starker Leopold, A. (1950). Vegetation Zones of Mexico. *Ecology*, 31(4), 507–518. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1931569>

Steven J., P., Miroslav, D., & Schapire, R. E. (n.d.). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Retrieved from http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2019-9-26..

Valenzuela Pablo, L., & Jose, L. G. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geograficas*, 2017(92), 1–2. <https://doi.org/10.14350/rig.52339>

Velazquez, A., V.M.Toledo, I.Luna, Barbour, M. G., & W.D.Billings. (2000). Mexican Temperate Vegetation. *North American Terrestrial Vegetation*, 2(January), 573.

Venegas-González, A., Roig, F., & Gutiérrez, A. G. (2018). Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central Effects of climate variability on growth and establishment patterns of *Nothofagus macrocarpa* in central Chile. *Bosque*, 39(1), 81–93. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100008>

Villanueva-Díaz, J., Rubio Camacho, E. A., Chávez Durán, A. A., Zavala Aguirre, J. L., Cerano Paredes, J., & Martínez Sifuentes, A. R. (2017). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>

Vose, J., Peterson, D., & Patel-Weynand, T. (2012). Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems : A Comprehensive Science Synthesis for the U . S . Forest Sector. *U.S. Department of Agriculture*, 265.

CAPITULO 3

8 MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL Y FUTURA DE OYAMEL EN LA ZONA CENTRO DEL PAIS

Luis Felipe Romahn-Hernández¹, Dante Arturo Rodríguez-Trejo¹ (autor de correspondencia),

Antonio Villanueva-Morales¹, Alejandro Ismael Monterroso Rivas¹, María Jesús Pérez Hernández.

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México – Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. MÉXICO, luis.romahn@hotmail.com, 5614670271

8.1 RESUMEN

Introducción: La distribución del oyamel, así como el vigor de sus masas forestales puede verse afectada por el cambio climático, principalmente con la elevación de las temperaturas, lo que puede ocasionar un desfase entre su distribución actual y las zonas de distribución potencial actual y futura. La altitud tiene una relación directa con las condiciones de humedad y temperatura, por lo que la vegetación de oyamel puede presentar distintas condiciones a distintas altitudes.

Objetivos: Modelar la distribución potencial actual y futura (2099) del oyamel en la zona centro del país, mediante los modelos HADGEM (Reino Unido) y GFDL (Estados Unidos) y el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt.

Materiales y Métodos: Se empleó el programa de máxima entropía MaxEnt, las cobertura de *Abies spp.* (a excepción de *Abies vejarii*) de la república mexicana y las variables bioclimáticas de Worldclim 1.4 para modelar la distribución potencial actual y futura (2099) de oyamel.

Resultados y discusión: El modelo HADGEM presenta una reducción altitudinal de la superficie con alta idoneidad de 200 a 400 y de 400 a 600 m s.n.m. para el modelo GFDL entre los estados de México y Michoacan y estado de México y

Ciudad de México. En la parte de Hidalgo, el modelo HADGEM presenta un incremento altitudinal inferior de 200 m s.n.m. y una reducción de 50 a 100 m s.n.m. para el modelo GFDL. En la parte oriente del estado de México se presenta, para el modelo HADGEM, un aumento de 100 m s.n.m. para la parte del Monte Tiáloc e Iztaccíhuatl y una reducción de 200 a 300 m s.n.m. para la parte sur del Popocatepetl, mientras que para el modelo GFDL se presenta una reducción de 50 m s.n.m. para la parte norte de la sierra nevada, de 200 a 400 m s.n.m. para su parte este, de 200 a 300 para la parte oeste y de 400 m s.n.m. para la parte sur del Popocatepetl.

Conclusiones: Se presenta un desplazamiento altitudinal de la distribución potencial, al 2099, de la vegetación de oyamel, prácticamente en todo el país, alcanzando alturas donde no era posible su distribución y perdiendo superficie idónea en las partes bajas de su distribución actual, viéndose menos afectadas las partes más húmedas, ya sea por exposición, una mayor precipitación o influencia de masas de aire húmedas.

Palabras clave: MaxEnt; Diagrama BAM; Área M; Modelos HADGEM y GFDL

8.2 INTRODUCCIÓN

Existen diversas metodologías para medir o pronosticar los cambios en la distribución de la vegetación por efecto del cambio climático, Vose, Peterson, & Patel-Weynand en el artículo "Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems" (2012) mencionan que la mayoría de los modelos predictivos sobre la distribución de la vegetación pronostican un desplazamiento latitudinal hacia el norte y un desplazamiento altitudinal hacia rangos superiores de la vegetación.

En México, Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, et al. en el 2012, utilizan tres modelos de circulación general y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero para predecir y mapear los futuros nichos ecológicos para *Abies religiosa*, mediante un modelo de circulación general que considera seis variables como temperatura del mes más cálido, temperatura media del mes más frío temperatura media anual, precipitación media anual, índice de sequedad, diferencia de temperatura verano-invierno, estimando que se reducirá, en México, la superficie óptima para el nicho ecológico a un 69.2 en la década que rodea 2030, 87.6 para alrededor del 2060 y 96.5% para 2090 y proponen realizar migración asistida a 275 metros más arriba en el rango altitudinal.

Manzanilla-Quñones, Aguirre-Calderón, et al., (2019) concluyen que la distribución de *Pinus hartwegii* Lindl para 2041-2060 en el Eje Neovolcánico Transversal (Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba) se reducirá entre 11.7 y 26.9% y un aumento de su nicho ecológico de 37.4% en el parque Izta-Popo. Lo anterior para escenario de cambio climático con un aumento de temperatura promedio anual entre 0.7 y 2.1 °C. De igual forma concluyen que las variables determinantes para el modelo fueron la altitud y la temperatura promedio anual.

En este mismo estudio, refieren una reducción de la distribución actual del bosque de *P. hartwegii* de 29.6% bajo el MCG HADGEM_ES para 2041-2060 y que en la zona del Nevado de Toluca e Izta-Popo se reducirá de 6338 a 5478 ha. para el escenario HADGEM2_ES RCP 4.5 y a 3885 ha para el escenario HADGEM2_ES RCP 8.5, siendo las zonas de la Malinche, el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba las más afectadas.

8.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la modelación de la distribución potencial de *A. religiosa* se empleó el algoritmo de modelado de distribución de especies de máxima entropía MaxEnt versión 3.4.1, el análisis se realizó a nivel nacional para contemplar en el modelado las condiciones de la especie, sin restringirlo solo a las condiciones presentes en la zona centro de México, aunque el análisis se enfocará en esta zona, abarcando los bosques de oyamel ubicados en el Estado de México, Michoacán, Ciudad de México y Puebla.

8.3.1 Base de datos

La distribución actual de *A. religiosa* se obtuvo de la carta de Uso de suelo y vegetación serie V (INEGI, 2013) y se extrajeron las poligonales correspondientes a bosque de oyamel; mediante la herramienta Create Fishnet de ArcMap, se distribuyó sobre estas poligonales una red de puntos equidistantes a cada 10000 metros lineales uno de otro, para un total de 1,300 puntos, se grabaron en formato “.csv” para poder ingresarlos como las ocurrencias de *A. religiosa* en MaxEnt. No se emplearon las ocurrencias de GBif debido a que reportaba la especie en sitios fuera de su ecosistema, además de que se evita tener que depurar la base de datos.

8.3.2 Establecimiento del Área M y Datos de Presencia

Para obtener una mejor modelación de la distribución potencial es necesario considerar el diagrama BAM (Figura 26), donde se establece que en un espacio geográfico convencional, representado por G, intervienen tres factores: A) Región determinada por las variables scenopoéticas, usualmente bioclimáticas y topográficas que simulan las condiciones medioambientales dentro de las cuales una especie puede o no sobrevivir (nicho fundamental), B) Región del mundo que contiene el ambiente biótico (variables bióticas) adecuado para la especie, representa los cambios denso-dependientes y los relacionados con la presencia de interactores y M) Región de accesibilidad, área donde ha sido capaz de

ingresar la especie bajo estudio (nicho realizado) (Soberon & Peterson, 2005, CONABIO, 2014).

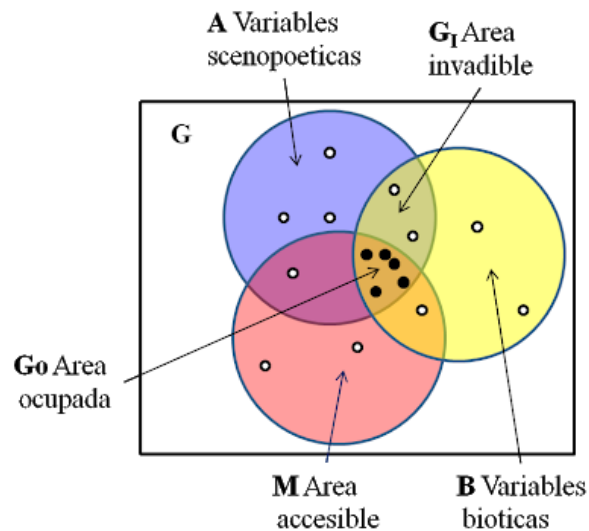


Figura 26 Diagrama BAM (Soberon & Peterson, 2005)

Fuente: CONABIO, 2014

Estos tres factores, principalmente, tienen una mayor importancia para determinar la distribución de una especie, también llamada espacio E, que está compuesta de n variables scenopoéticas que representan las condiciones de los sitios donde la especie de interés pueda establecerse. Para cada punto en el espacio G, corresponden una serie de variables en el espacio E, las cuales determinan la presencia o ausencia de la especie.

Como ya se estableció, las ocurrencias de *A. religiosa* se obtuvieron mediante las poligonales de “Bosque de Oyamel” de la carta de Uso de suelo y vegetación serie V; al querer determinar el área M mediante la carta de Ecorregiones terrestres de México, escala 1:1,000,000 (INEGI, 2018) solo dos de las poligonales de oyamel no se traslaparon con la ecorregión de Bosque Templado, ambos en Coahuila, correspondientes a *Abies vejarii* y a la ecorregión de “Partes elevadas del desierto Chihuahuense”, las cuales no se consideraron para la modelación, por lo que con el área M se hizo un clip a la capa de Ocurrencias disminuyéndolas a solo 1,244 puntos.

Estos puntos, debido a que se generaron con las poligonales correspondientes a oyamel, pueden contener, en su minoría, la distribución de otras especies del género *Abies*, pero considerando lo señalado por Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, & Jaramillo-Correa (2016), donde establecen que las especies mexicanas de oyamel tienen un mismo ancestro común, y que dada la poca diferenciación genética y morfológica, se espera que tengan nichos ecológicos muy similares, por lo que se consideraron dentro de la modelación.

8.3.3 Variables topográficas y bioclimáticas

Para la modelación de la distribución potencial de oyamel se emplearon las variables climáticas de temperatura máxima, temperatura promedio, precipitación, radiación solar y 19 variables bioclimáticas para el periodo de 1970 al 2000 a una resolución de 1 km² por pixel, obtenidas de WorldClim versión 2 (WorldClim, 2016); y de la versión 1.4 se obtuvieron las proyecciones climáticas y bioclimáticas para el 2099, a una resolución de 1 km² por pixel, basadas en las áreas de influencia climática de Gómez et al. (2008), a una resolución de 500 x 500 metros para el territorio nacional.

Las variables bioclimáticas, topográficas y de suelo, utilizadas para la validación de la modelación se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Variables empleadas para la modelación de distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. & Cham. Fuente: INEGI (2007, 2013), WorldClim (2016).

Nombre	Variable ambiental
Altitud	Elevación (msnm) obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano CEM 3.0, resolución 15 m., (INEGI, 2013).
Expos	Orientación de la ladera (°), generado mediante el CEM (categórica)
Pend	Pendiente del terreno en %, generado mediante el CEM
Suelo	Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 2007) (categórica)
Bio3	Isotermalidad (°C) (BIO2/BIO7) (* 100)
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)

Nombre	Variable ambiental
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio7	Rango anual de temperatura (°C) (BIO5-BIO6)
Bio11	Temperatura Media del trimestre más frío (°C)
Bio12	Precipitación Anual (mm)
Bio13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio15	Estacionalidad de Precipitaciones (Coeficiente de Variación)
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
pp04	Precipitación del mes de abril
pp09	Precipitación del mes de septiembre
Etpm	Evapotranspiración
física	Fase física del suelo
geo	Geología

El CEM se utilizó como máscara para realizar el recorte de las variables presentes en el Cuadro 2, mediante la herramienta “Extract by masc” de ArcGis 10.0, solo para las capas raster, mientras que para el caso de las capas en formato shape, antes se deben de convertir en formato raster mediante la herramienta “Feature to raster” y posteriormente realizar el corte con la máscara. Una vez que se tienen las capas recortadas se trasformaron a formato ASCII mediante la herramienta “Raster to ASCII” para poder ingresarlas a MaxEnt.

Es recomendable emplear variables bioclimáticas como “Precipitación del trimestre más seco” en lugar de variables climáticas mensuales, ya que podría resultar una ganancia negativa para el modelo (Phillips, 2008). Esto se puede

saber a través de la validación del modelo, así como con la prueba con el método Jackknife del propio Maxent.

8.3.4 Validación del modelo

Para la validación del modelo se realizó una primer corrida del algoritmo de Maxent con todas las variables disponibles y con los resultados se registra el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) y se analizan los resultados de la prueba de Jackknife para registrar las ganancias de cada variable para la modelación, para descartar las variables con un coeficiente menor a 0.80 y realizar una nueva corrida con las variables elegidas, para ayudar a prevenir la sobreinterpretación de resultados.

Los MCG HADGEM y GFDL obtuvieron, para la corrida de validación en Maxent, una ganancia del entrenamiento regularizado de 1.999, y una AUC de entrenamiento de 0.949, la ganancia del entrenamiento no regularizado es 2.065. Se realizaron 500 interacciones en cada modelo y se utilizó la siguiente configuración durante la ejecución:

- 976 registros de presencia utilizados para la capacitación.
- 10973 puntos utilizados para determinar la distribución de Maxent (puntos de fondo y puntos de presencia).
- Capas ambientales utilizadas: exposición, altitud, bio03, bio04, bio06, bio07, bio11, bio12, bio13, bio14, bio15, bio17, bio18, etpm, física, geo, pp04, pp09 y suelo.
- Valores de regularización: lineal / cuadrático / producto: 0.050, categórico: 0.250, umbral: 1.000, bisagra (hinge): 0.500

En la figura 27 se muestran los resultados de la prueba de Jackknife para determinar la importancia de cada variable. La variable ambiental con mayor ganancia cuando se usa aisladamente es la altitud, además de que es la información más útil para la modelación por sí misma. La variable ambiental que disminuye más la ganancia cuando se omite es geo, que tiene la mayor cantidad de información que no está presente en relación a las otras variables.

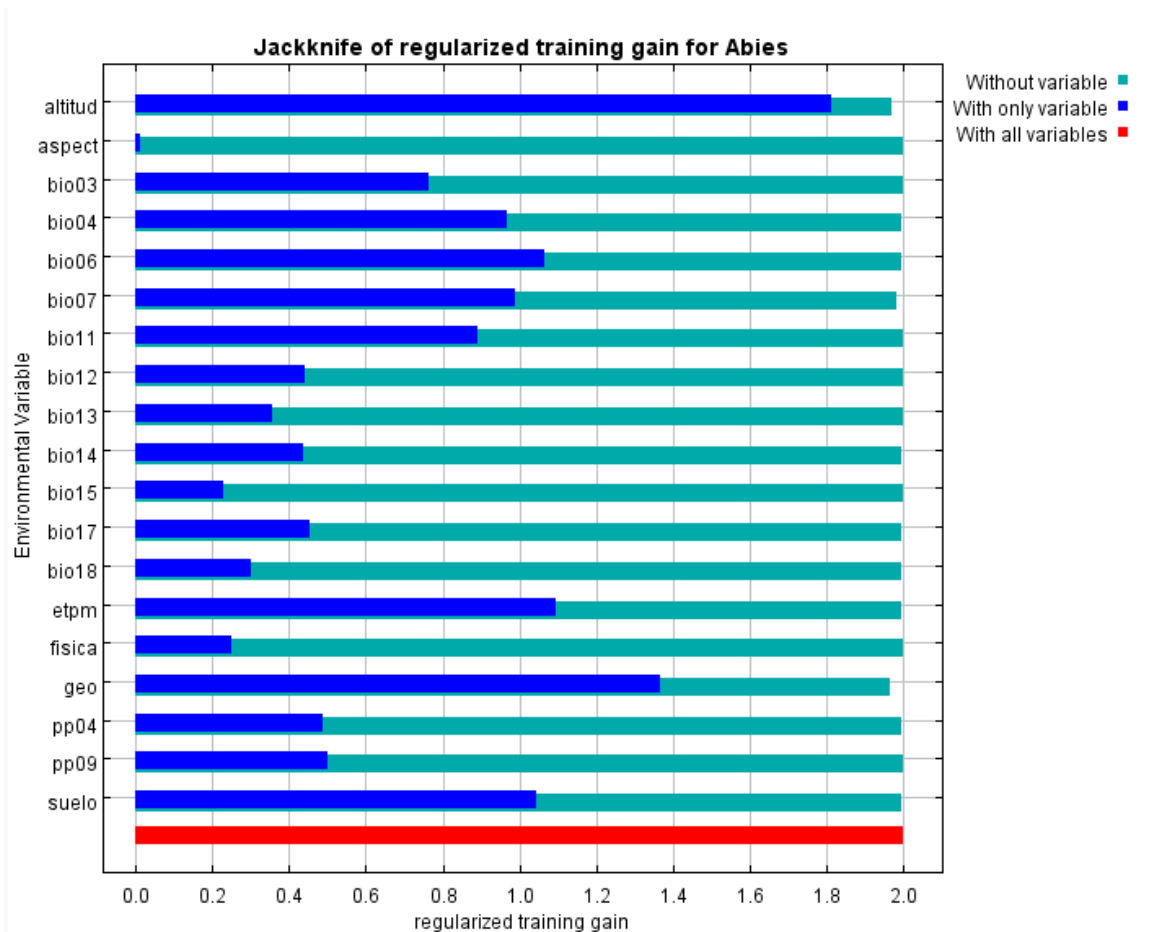


Figura 27 Prueba de Jackknife para la validación del modelo HADGEM

Fuente: MaxEnt

Las variables en la prueba de Jackknife se comportaron igual en ambos modelos, por lo que solo se muestra el correspondiente a HADGEM, asimismo, las variables elegidas, mayores a 0.80, para mejorar la modelación de distribución, fueron las mismas para ambos modelos: altitud, bio04, bio06, bio07, bio11, etpm, geo y suelo.

8.3.5 Modelos de Circulación General

Para la modelación del nicho ecológico se emplearán dos Modelos de Circulación General (MCG), el primero es el modelo estadounidense GFDL_CM3 de la institución Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) y el modelo británico HADGEM2_ES de la institución Met Office Hadley Centre (MOHC) (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, 2015). Estos MCG

permiten analizar la modificación en la vegetación por efecto del cambio climático (Manzanilla-Quñones et al., 2019).

8.3.6 Modelación de la distribución potencial

Para realizar la modelación de la distribución de oyamel se utilizó Maxent versión 3.4.1, que permite realizar modelos predictivos sobre la distribución potencial de especies de flora y fauna, cuyo algoritmo (regresión de Poisson) permite ingresar distribuciones conocidas de la especie bajo estudio y variables atmosféricas, topográficas, climáticas, edáficas y biológicas. Utilizando el concepto de modelado de máxima entropía, le permite a Maxent, expresar la distribución de la probabilidad de que en cada celda del espacio modelado tenga las condiciones predichas para el establecimiento o mantenimiento de la especie (Steven J., Miroslav, & Schapire, n.d.).

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los MCG HADGEM y GFDL obtuvieron, para la corrida definitiva en Maxent, una ganancia del entrenamiento regularizado de 1.986, y una AUC de entrenamiento de 0.948, la ganancia del entrenamiento no regularizado es 2.041. Se realizaron 420 interacciones en cada modelo y se utilizó la siguiente configuración durante la ejecución:

- 976 registros de presencia utilizados para la capacitación.
- 10970 puntos utilizados para determinar la distribución de Maxent (puntos de fondo y puntos de presencia).
- Capas ambientales utilizadas: altitud, bio04, bio06, bio07, bio11, etpm, geo(categorical), suelo(categorical)
- Valores de regularización: lineal / cuadrático / producto: 0.050, categórico: 0.250, umbral: 1.000, bisagra (hinge): 0.500

La modelación de validación presentó un mejor desempeño de acuerdo a su AUC (0.949) que la modelación definitiva, por lo que se empleó, para el análisis, los resultados de la validación.

El AUC de la característica operativa del receptor (ROC) evalúa la precisión de los modelos de distribución potencial de especies. Debido a que el comportamiento del AUC y del área de predicción y omisión fueron similares para ambos modelos, solo se presenta, en la Figura 28, los correspondientes al modelo HADGEM.

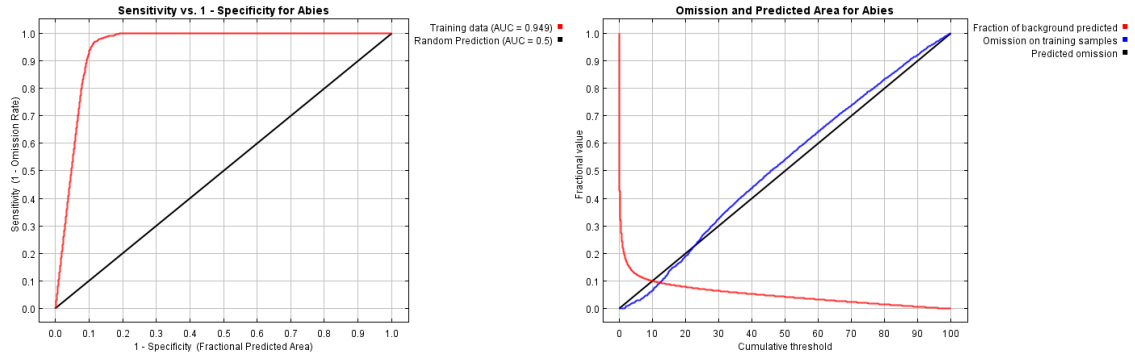


Figura 28 Área bajo la curva (izq) y área de predicción y omisión (der) para el modelo HADGEM
Fuente: MaxEnt

Del lado derecho en la Figura 28 se muestra la tasa de omisión y el área pronosticada para *A. religiosa* en función del umbral acumulativo. La tasa de omisión se calcula con los registros de presencia y con los registros de prueba. La tasa de omisión de los registros de prueba (línea azul) debe estar cerca de la omisión prevista (línea negra), como es el caso para ambos modelos empleados.

Cabe mencionar que algunas variables ambientales presentaron distintas curvas de afectación a la predicción durante ambas modelaciones. Las variables que presentaron las mayores variaciones fueron la estacionalidad de la temperatura (bio04), temperatura media del trimestre más frío (bio11) y evapotranspiración (etpm), (Figuras 29-31).

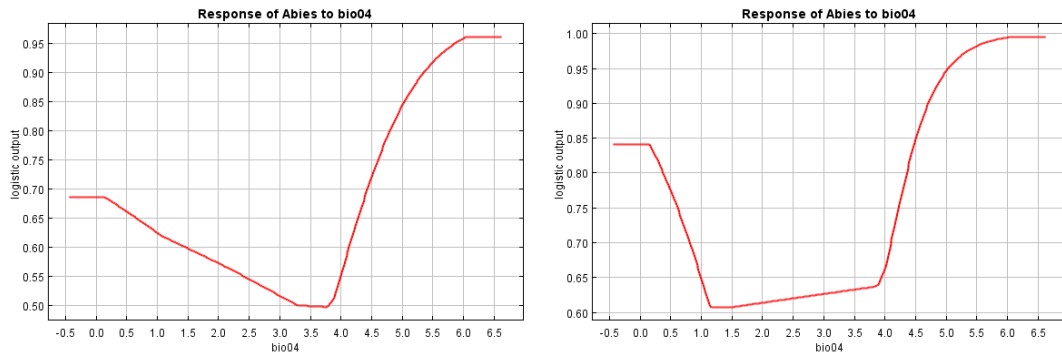


Figura 29 Comportamiento en la predicción de la variable bio04 en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.

Fuente: MaxEnt

La estacionalidad de la temperatura (bio04) tuvo un mayor peso en la modelación definitiva que en la de validación, llegando casi al valor de uno, además de que su comportamiento tuvo ligeras modificaciones, quizás por la forma de interacción entre variables, durante las modelaciones.

La temperatura media del trimestre más frío (bio11) presentó comportamientos invertidos en cada modelación, siendo que para la modelación de validación inició con una salida logística alta, reduciendo hacia el final del proceso, pero abarcando un mayor rango que en la validación definitiva, donde la curva va en aumento alcanzando valores más altos, en un rango más reducido, aunque técnicamente tuvieron la misma importancia durante las modelaciones.

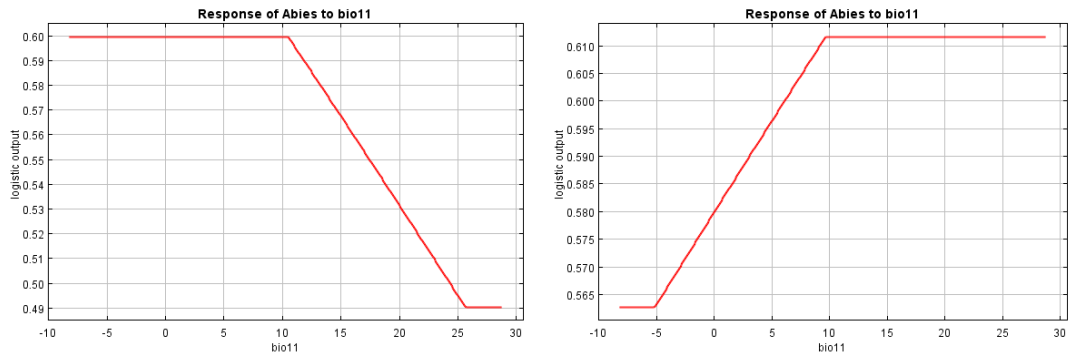


Figura 30 Comportamiento en la predicción de la variable bio11 en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.

Fuente: MaxEnt

Para la variable evapotranspiración (etpm), se obtuvieron valores más altos durante la validación, pero un mayor rango, aunque valores más bajos en la modelación definitiva, el comportamiento fue más constante en la modelación de validación cuando la diagonal alcanza los 1,100 mm/año.

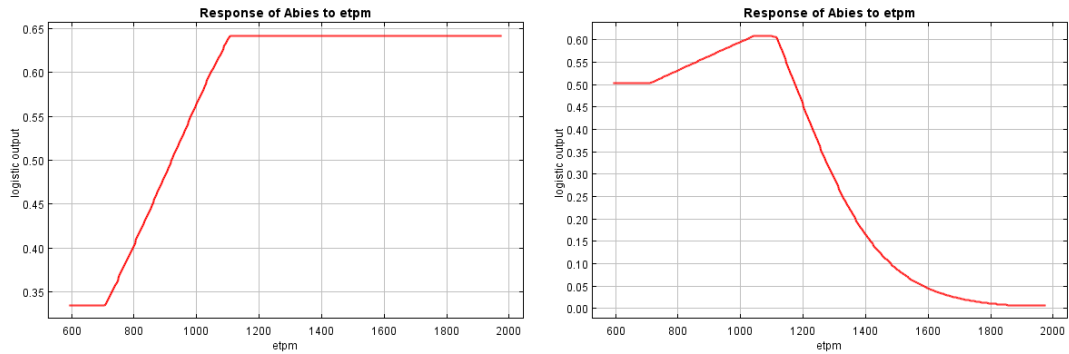


Figura 31 Comportamiento en la predicción de la variable etpm en la modelación de validación (izq) y en la definitiva (der) para el modelo HADGEM.

Fuente: MaxEnt

Las imágenes ASCII resultantes de la modelación, para HADGEM y GFDL, incluyendo la distribución potencial actual y futura, se transformaron a formato raster, posteriormente en la ventana Layer Properties \ Symbology \ Classified se asignaron dos clases, una menor o igual a 0.3 (nula idoneidad) y otra mayor a 0.3 (idoneo). Cabe señalar que los valores de la modelación resultaron más altos para las proyecciones al 2099 (HADGEM y GFDL Actuales 0.000000352-0.758; HADGEM 2099 0.000000352-0.992; GFDL 2099 0.000000064-0.993)

Empleando la herramienta ArcToolbox \ Spatial Analyst Tools \ Map Algebra \ Raster Calculator se midieron las superficies de baja y alta idoneidad para ambos modelos, las cuales se presentan en el Cuadro 7, así como la superficie que abarcan los bosques de oyamel actualmente. El valor superior corresponde a las superficies con una probabilidad de distribución ≤ 0.3 , mientras que el valor inferior corresponde a las superficies con una probabilidad > 0.3 .

El modelo HADGEM predijo una distribución futura más extendida, pero con menores valores de probabilidad, mientras que el modelo GFDL presenta mayores probabilidades de distribución potencial futura, pero en áreas más concentradas y reducidas. Contrario a esto, Gómez Díaz et al. (2011) mencionan que el MCG HADGEM es el que establece las condiciones menos favorables para la mayoría de las especies en comparación con el modelo del GFDL.

En el cuadro 3, se presentan las superficies a nivel nacional, para el centro del país y para el Estado de México, de la distribución potencial actual y las proyecciones para los modelos HADGEM y GFDL.

Cuadro 3. Superficies de distribución potencial actual y futura para los modelos HADGEM y GFDL, y distribución actual de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.

ID	Superficie Nacional ha.	Superficie Zona Centro ha.	Superficie Edo. Mex. ha.
Distribución Potencial	37,237,925	2,569,150	1,304,275
Actual	80,000	505,475	316,475
HADGEM RCP 8.5	36,308,925	2,326,750	1,390,575
2099	1,728,225	747,875	230,175
GFDL RCP 8.5	36,686,525	2,524,650	1,501,325
2099	1,350,625	549,975	119,425
<i>Abies religiosa</i>	124,603.177	97,247.222	80,327.420

Para el análisis de los resultados, se dividirá en secciones el área modelada de la zona centro del país, señalando cada sección con una letra (A, B, C y D), como se indica en la Figura 32. El modelo HADGEM presenta una reducción altitudinal de la superficie con alta idoneidad de 200 a 400, mientras que para el modelo GFDL, de 400 a 600 m s.n.m. para las zonas entre los estados de México y Michoacán y estado de México y Ciudad de México.

En la parte de Hidalgo, el modelo HADGEM presenta un incremento altitudinal inferior de 200 m s.n.m. y para el modelo GFDL una reducción de 50 a 100 m s.n.m.. En la parte occidente del estado de México se presenta, para el modelo HADGEM, una disminución de 200 m s.n.m. para la parte del Monte Tláloc e Iztaccíhuatl y de entre 300 a 600 m s.n.m. para la parte sur del volcán Popocatepetl.

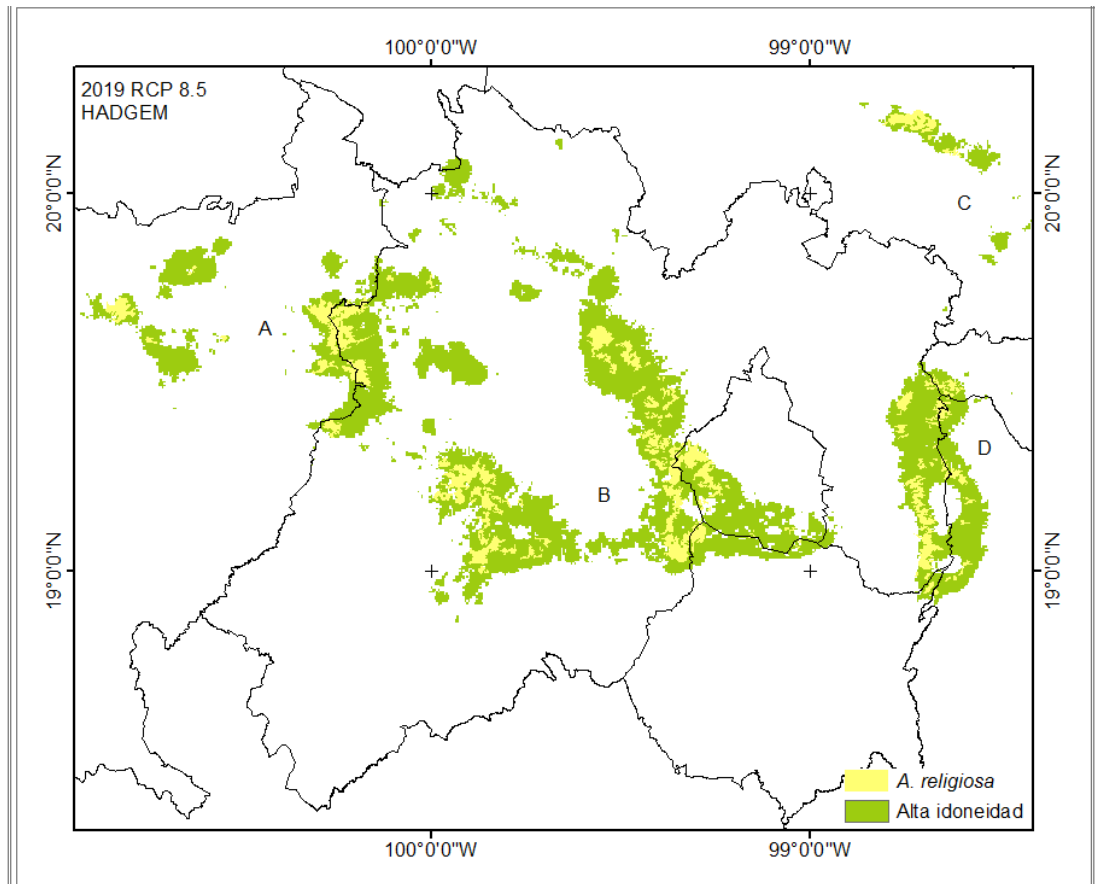


Figura 32 Distribución real y potencial actual de oyamel en la zona centro del país y secciones de análisis: (A) Michoacán, (B) Michoacán y Estado de México, (C) Estado de México, (D) Estado de México, Ciudad de México y Morelos, (E) Hidalgo, (F) Estado de México, Puebla y Morelos.

En la sección A (Figura 33), correspondiente a los estados de México y Michoacán, la superficie de distribución potencial futura se reduce de manera importante, principalmente con el modelo GFDL, donde en la parte noreste de Michoacán, disminuye la idoneidad en los municipios de Maravatío, Zinapécuaro, Queréndaro, Indaparepeo y solo queda una pequeña porción de alta idoneidad en el municipio de Hidalgo, así como la zona límite con el estado de México, en los municipios de Senguio, Zitacuaro y Angangeo, y Villa de Allende y San José del Rincón en el Estado de México.

En el estado de México disminuye la idoneidad en los municipios de Aculco, Acambay, Temascalcingo, El Oro, San Flipe del Progreso, Villa Victoria, Almoloya de Juárez Atlacomulco y Amealco de Bonfil en Querétaro. En el modelo

HADGEM se reduce en menor superficie la idoneidad, concentrándose en las partes altas de las zonas montañosas.

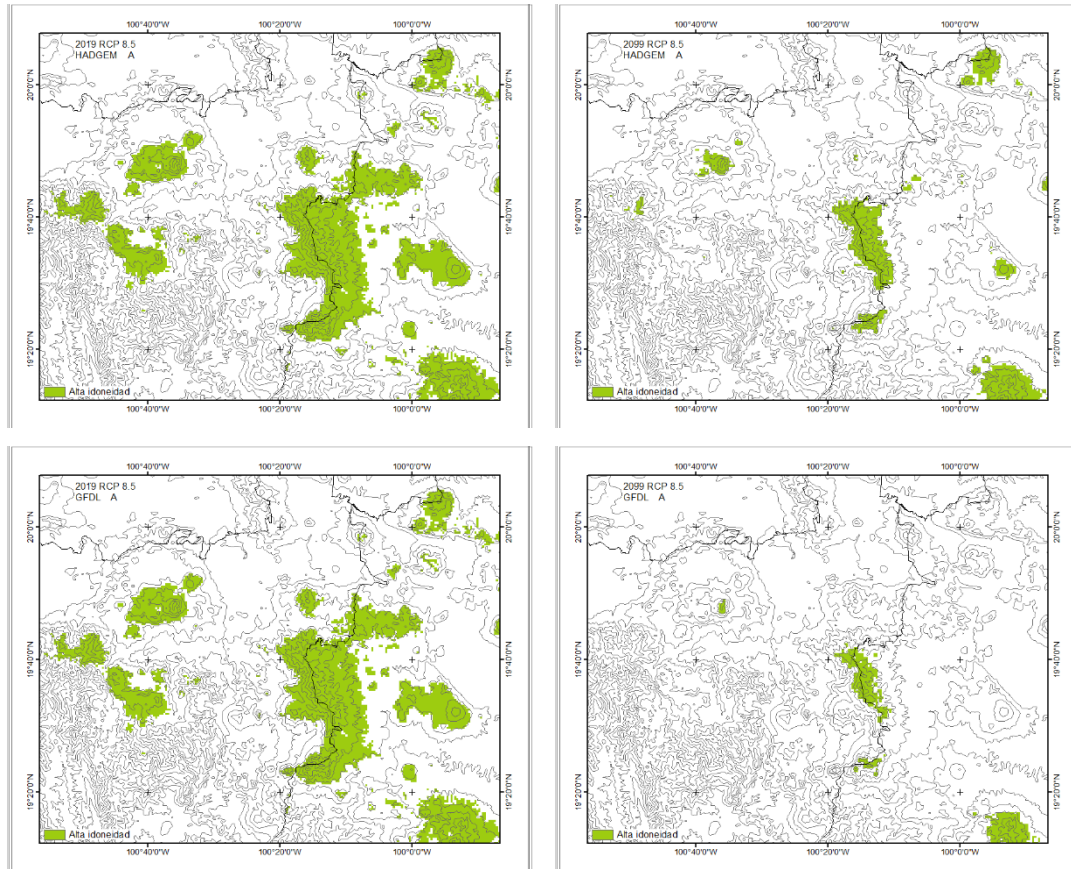


Figura 33 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección A de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.

Sáenz-Romero, Rehfeltd, Duval, & Lindig-Cisneros (2012), concluyen que el nicho ecológico para *A. religiosa* disminuirá en el transcurso del siglo, de 69.2% al 2030, 87.6 % para el 2060 y 96.5% para 2090 y que se necesitaría, para realinear los genotipos junto con las nuevas condiciones climáticas, desplazar a las masas forestales de oyamel 300 m s.n.m. hacia arriba para 2030. También concluyen que a finales de siglo, el hábitat adecuado para la mariposa monarca ya no podrá ocurrir dentro de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.

En la Sección B (Figura 34), correspondiente a los límites entre el estado de México, la Ciudad de México y la porción norte del estado de Morelos, la situación es similar, una dismiución de la superficie idónea para el oyamel, para ambos modelos, siendo el MCG GFDL el que presenta una mayor reducción en las superficies, restringiéndose a las partes altas del Nevado de Toluca, en los

municipios de Zinacatepec, Toluca, Temascaltepec, Coatepec Harinas, Villa Guerrero, Tenango del Valle, Calimaya Amanalco y Almoloya de Juárez, donde se desplazó hasta 200 m s.n.m., mientras que para el modelo HADGEM fue de 100 m s.n.m.

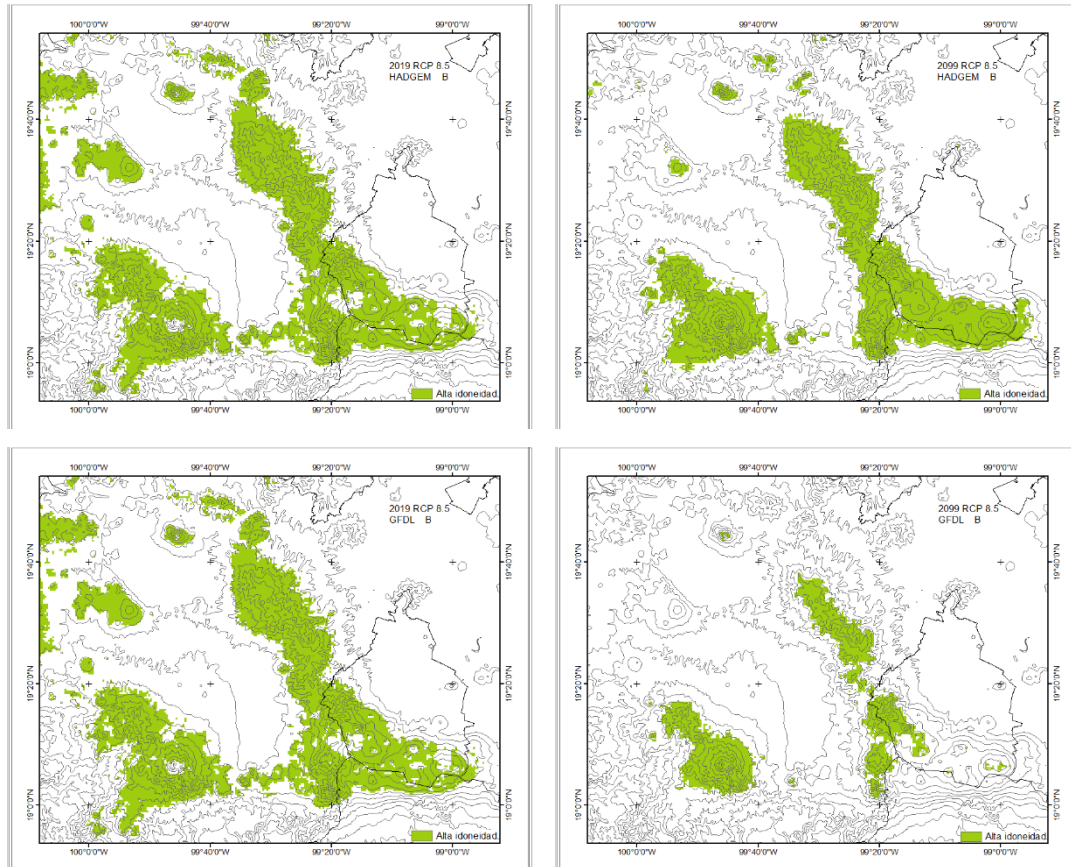


Figura 34 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección B de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.

De igual forma sucede en la zona de oyamental que abarca las alcaldías de Tlalpan, Milpa Alta, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos en la Ciudad de México, y al norte de Morelos, en los municipios de Huitzilac, Tepoztlán y Tlalnepantla, donde se presentó un desplazamiento altitudinal de entre 200 y 300 m s.n.m. desapareciendo las superficies con alta idoneidad en el estado de Morelos y limitándose a las partes altas de las alcaldías mencionadas.

Desplazamiento similar se modeló en los municipios de Chapa de Mota, Morelos, Villa del Carbón, Jiquipilco, Nicolas Romero, Temoaya, Isidro Favela, Oztolotepec, Jilotzingo, Xonacatlán, Naucalpan de Juárez, Lerma, Huixquilucan,

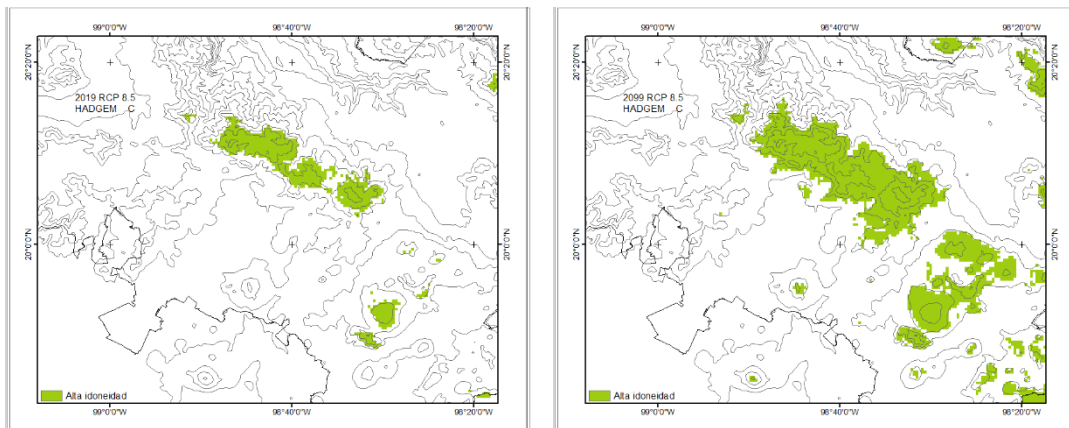
Ocoyoacac, Santiago Tianguistenco, Xalatlaco, Ocuilan y Joquicingo, donde los tres primeros pierden toda la superficie idónea para oyamel por el desplazamiento altitudinal de entre 200 y 300 m s.n.m.

La reducción de las superficies idóneas para oyamel obedece a la topografía, principalmente la altitud y su relacionado contenido de humedad, por lo que la disminución de la superficie apta se da en los contornos de las altitudes bajas.

En la cima del Nevado de Toluca, donde la superficie corresponde actualmente a una baja idoneidad, incrementa su aptitud para el establecimiento del oyamel al año 2099, debido al aumento de la temperatura y una mayor disponibilidad del agua a esas alturas.

En la Sección C (Figura 35), en el estado de Hidalgo, la superficie de alta idoneidad se reduce en el modelo GFDL, alrededor de 100 m s.n.m. limitándose a las partes altas del terreno.

En el modelo HADGEM se muestra un incremento de la superficie de alta idoneidad para la distribución potencial del oyamel, abarcando, de los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte, Singuilucan, Omitlán de Juárez, Pachuca de Soto, Tepeapulco y Tlanalapa, a los de Mineral de la Reforma, Epazoyucan, Coatepec de Hinojosa, Almoloya y Apan, por extenderse la superficie idónea 100 m s.n.m. hacia altitudes inferiores.



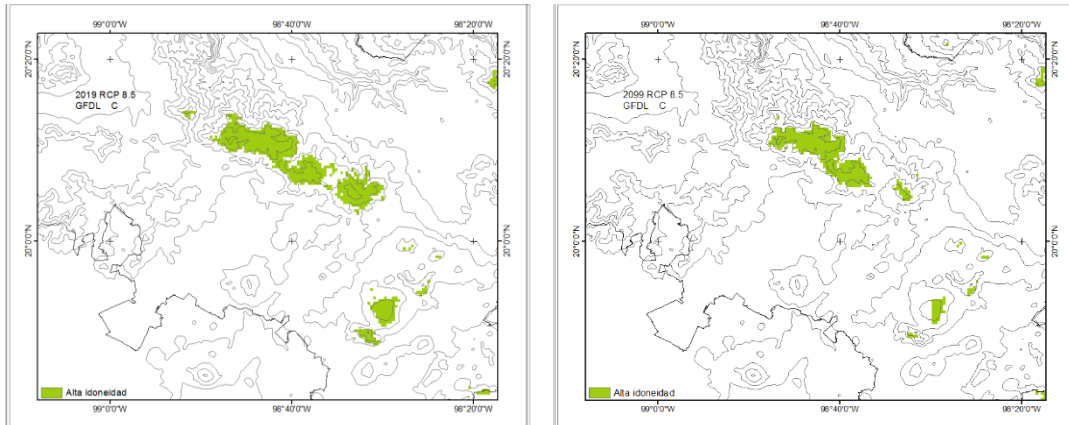


Figura 35 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección C de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.

La sección D (Figura 36), correspondiente al estado de México y Puebla, y en menor proporción los estados de Tlaxcala y Morelos, se observa, en la distribución actual, como las cimas de los volcanes no presentaron una idoneidad alta para el establecimiento del oyamel, debido a la bajas temperaturas y poca disponibilidad del agua, pero al aumentar las temperaturas se establecerán las condiciones de temperatura idóneas para el establecimiento del oyamel como se puede observar en la modelación al 2099. La mayoría de los modelos predictivos de la distribución de la vegetación pronostican un desplazamiento altitudinal y cambios más severos en las zonas montañosas (Martínez-Méndez et al., 2016; Vose et al., 2012).

También se presentó un desplazamiento altitudinal, para el modelo GFDL, de 200 m s.n.m. aproximadamente, en el eje neovolcánico, en la porción del estado de México, y un desplazamiento de 100 m s.n.m. para la porción del estado de Puebla, donde se presenta un mayor contenido de humedad. En la parte sur del Volcán Popocatepetl, en la porción ubicada entre los estado de México, Puebla y Morelos se presenta un desplazamiento de entre 300 a 600 m s.n.m.

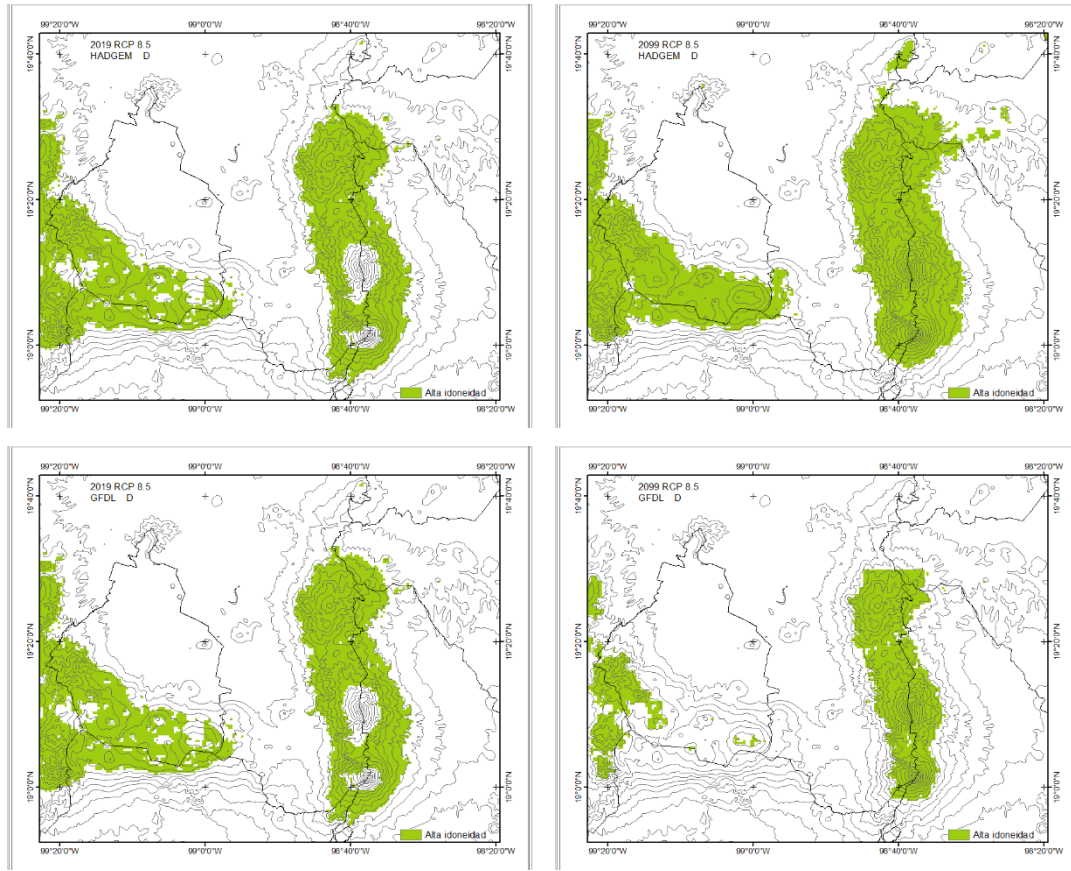


Figura 36 Distribución potencial actual y futura para oyamel en la sección D de la zona centro del país. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.

La distribución espacial de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham y *Pinus montezumae* así como la aptitud del terreno para estas especies, tendera a reducirse bajo escenarios de cambio climático (Pérez-Miranda et al., 2014). Lenoir et al. (2008) examinaron la distribución altitudinal de 171 especies de plantas en el oeste de Europa, encontrando un desplazamiento altitudinal promedio de 65 metros, mientras que Saenz Romero (2010) estima, para cuatro especies de pino en el Cinturón Volcánico Transmexicano, que se requeriría una migración ascendente de 300-400 m s.n.m. para compensar el cambio en el clima esperado para el año 2030, considerando que el rango climático del oyamel es más restringido.

Manzanilla-Quñones, Aguirre-Calderón, et al., (2019) concluyen que las variables más determinantes en la distribución potencial de *Pinus hartwegii* Lindl fueron la BIO1 y el DEM, al igual que Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte,

& Jaramillo-Correa (2016) que obtuvieron que la variable altura tuvo una alta correlación negativa con las variables bioclimáticas relacionadas a la temperatura, mientras que la pendiente y exposición no presentaron correlación alguna con otra variable ni importancia en el modelo de distribución potencial para *Abies concolor*, *A. durangensis* var. *durangensis*, *A. durangensis* var. *coahuilensis*, *A. fincki*, *A. guatemalensis*, *A. hickelii*, *A. jaliscana*, *A. religiosa* y *A. vejari*.

En esta modelación las variables con mayor peso en la distribución fueron altitud, la geología, la evapotranspiración y la temperatura mínima del mes más frío (bio06).

Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, et al. (2012) menciona que las variables con mayor importancia para la modelación de *A. religiosa* son la temperatura media del mes más cálido, la precipitación de abril-septiembre por la temperatura media del mes más frío entre 1000, la precipitación de abril-septiembre entre la precipitación media anual, la precipitación en verano, la diferencia de temperaturas entre verano e invierno y la precipitación de abril-septiembre por la diferencia de temperaturas entre verano e invierno entre 1000

Islas Báez, Pérez Miranda, González Hernández, Romero Sánchez, & Velasco Bautista (2015) establecen que las variables más importantes para modelar la distribución de *A. religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham son la precipitación anual y la altitud. Concluyen que las zonas más afectadas serían el Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba, mientras que en la parte del Parque Nacional Izta-Popo se extenderá su distribución potencial en un 37.4%; sin embargo la zona de interés del presente estudio es la parte anexa a dicho parque, con menores elevaciones, donde el oyamel se encuentra más cerca de la zona plana y expuesta a la radiación solar de la cima del Monte Tláloc.

Estos mismos autores mencionan que el modelo predijo como límite altitudinal inferior la cota de los 2000 y como cota superior los 3600 msnm para el Cinturón Volcánico Transmexicano y que la altitud es una variable determinante en la distribución del oyamel y concluyen que la distribución de oyamel debería desplazarse 300 m s.n.m. al 2030 mediante migración asistida y que se necesita

mayor investigación sobre las técnicas apropiadas para el desplazamiento de las poblaciones de *A. religiosa* a altitudes más altas. Estiman una reducción de su superficie de 69,2% para 2030, del 87,6% para 2060 y del 96,5% para 2090.

Los resultados obtenidos en esta modelación, para el Cinturón Volcánico Transmexicano, estiman, para el modelo HADGEM, un límite altitudinal inferior menor a los 2800 y superior a 5200, mientras que el modelo GFDL proyecta un límite inferior de 3000 e inclusive de 3400 en la parte sur del volcán Popocatepetl y un límite superior a 5200 m s.n.m. El modelo HADGEM muestra una expansión de la superficie de distribución con alta idoneidad, más allá de los límites superiores e inferiores, con respecto a la distribución potencial actual, mientras que el modelo GFDL presenta una reducción de la superficie con alta idoneidad en los límites altitudinales inferiores, pero una expansión en los límites superiores.

Los estudios dendrocronológicos también relacionan la interacción entre cambio climático y el crecimiento arbóreo, llegando a identificar eventos de sequias o cambios como el efecto de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), como lo mencionan Aquino-Ramírez et al., (2019), quienes consideraron que el principal límite para el crecimiento radial es la escasa precipitación, entendido como contenido de humedad, para *A. guatemalensis*, específicamente la precipitación estacional de febrero-abril y la temperatura máxima alcanzada durante los meses de marzo-mayo; además clasifican a esta especie como potencial dendrocronológico para reconstrucciones climáticas.

Referente a *A. religiosa*, estos mismos autores indican una relación positiva entre el crecimiento radial y la precipitación invierno-primavera y negativa con la temperatura invierno-primavera.

Por otra parte, Castellanos-Acuña et al. (2014) establecen que la variabilidad climática altitudinal puede representar una diferenciación morfológica, analizando ramas y conos en un gradiente altitudinal de 2,850 a 3,550 con sitios a cada 50 msnm, registrando acículas y conos más cortos en las cotas bajas, y considerando el cambio climático, sugieren utilizar semillas de cotas bajas para reforestar en cotas más elevadas.

Guitérrez y Trejo (2014), analizando el efecto del cambio climático en cinco especies arbóreas (*Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Q. ocoteifolia*) de las zonas templada de México, obtienen que *A. hickelii* tiene un intervalo más reducido en cuanto a la tolerancia a la temperatura (11.1-13.7 °C) y es la especie que se distribuye en las zonas con mayor contenido de humedad (1,332-1,591 mm), se encuentra en peligro de extinción y calculan, mediante el MCG alemán MPIECHAM5, una reducción de su distribución potencial del 79% para el 2050 y de 44% con el modelo HADGEM1 para el mismo año.

Estos mismos autores concluyen que los cambios climáticos son más rápidos que la capacidad adaptativa de algunas especies, y que su dispersión se puede ver limitada por las condiciones del terreno aledaño y que se espera que las especies más vulnerables sean las más longevas, como es el caso de las coníferas. También concluyen que en la modelación de la distribución potencial no se consideran otras alteraciones a corto plazo, como el cambio de uso de suelo o la fragmentación del hábitat, por lo que las proyecciones pueden ser optimistas contra lo real.

En el cuadro 4 se presenta el desplazamiento altitudinal por orientación en cada una de las secciones analizadas, los datos se presentan en m s.n.m y para cada uno de los modelos utilizados.

Cuadro 4. Desplazamiento altitudinal por sección y orientación. Los datos con (+) representan un incremento en la distribución hacia altitudes menores.

Sección	Orientación	Desplazamiento MCG	
		HADGEM RCP 8.5 2099 (m s.n.m.)	GFDL RCP 8.5 2099 (m s.n.m.)
A	N	200-300	300-500
	S	400	600
	E	200-300	500
	O	200-300	400-600
B	N	100-200	300-500
	S	100-200	500
	E	50-100	300-400
	O	100-200	300-600

Sección	Orientación	Desplazamiento MCG	
		HADGEM RCP 8.5 2099 (m s.n.m.)	GFDL RCP 8.5 2099 (m s.n.m.)
C	N	+200	100-200
	S	+200	100-200
	E	+200	100-200
	O	+200	100-200
D	N	+100	50
	S	200-300	400
	E	+100	200-400
	O	+100	200-300

10 CONCLUSIONES

El mejor modelo para la simulación de la distribución potencial del oyamel fue la corrida de validación, que obtuvo un mayor valor de AUC e incluía mayores variables climáticas relacionadas a la humedad, que aunque obtuvieron valores inferiores a 0.8 en la prueba de Jackknife, fueron decisivas en la modelación obteniendo una distribución potencial actual más apegada a lo real y por lo tanto una mejor simulación futura.

El conocimiento de la especie y de las características de sus sitios de distribución permitió seleccionar variables para la modelación, que en primera instancia Maxent había descartado, como la exposición, fase física del suelo, isothermalidad (bio03), precipitación Anual (bio12), precipitación del mes más húmedo (bio13), precipitación del mes más seco (bio14), estacionalidad de precipitaciones (bio15), precipitación del trimestre más seco (bio17), precipitación del trimestre más cálido (bio18), precipitación del mes de abril (pp04) y precipitación del mes de septiembre (pp09), muchas de ellas relacionadas al contenido de humedad ambiental y del suelo.

11 LITERATURA CITADA

- Aquino-Ramírez, M., Velazquéz-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25, 1–16. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521773>
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237–276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Biota, A. (2017). The Tertiary History of the Northern Temperate Element in the Northern Latin, (July 2014). <https://doi.org/10.2307/2656952>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 2–12. <https://doi.org/1607-6079>.
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., & Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la reserva de la biósfera de la mariposa monarca, Michoacán provisional. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>
- Castillo-Flores, J. D., López-López, M. A., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M., & Hernández-Tejeda, T. (2013). Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 175–184. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.06.038>
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L.

(2012). PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA MONARCA , 18(2), 143–157.

<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.074>

Critchfield, W. B. (1983). *Impact of the Pleistocene on the Genetic Structure of North American Conifers*. Retrieved from

<https://books.google.com.mx/books?id=Vx5wHAAACAAJ>

Eguiarte Fruns, L. E., & Furnier, G. R. (1997). CONABIO , Número de Referencia B138 Area de Conocimiento : Ecológico y Genético Responsables : Glenn R . Furnier y Luis E . Eguiarte Fruns Colaboradores : Erika Aguirre Planter y Andrés Keiman Freire . Instituto de Ecología , UNAM. *Planter*.

Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Castillo-Campos, G., & Rojas-Soto, O.

(2015). Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: An approach using ecological niche modelling. *Acta Botanica Mexicana*, 2015(112), 73–93.

Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, C.-Á. y T.-V. (2015).

Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.

Http://Atlasclimatico.Unam.Mx/Inecc/Atlas_2_190215_documentacion.Pdf, 1–22. Retrieved from

http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf

Flores-Nieves, P., López-López, M., Ángeles-Pérez, G., De la Isla-Serrano, M.,

& Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.*, 2(8), 9–20.

Fogel, R. B. (2012). *Cambio climático, alteraciones ambientales y pobreza en el Paraguay*. (CLACSO, Ed.) (1. ed. en). Retrieved from

http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio

climatico__Ff%3Afacetcollections%3A3%3A3%3ARecursos
electrónicos%3A%3A__Ff%3Afacetfields%3Atitle%3Atitle%3ATítulo%3A%
3A__P0%2C8__Orighresult__X6__T?lang=spi&suite=cobalt

- Fourier, J. (1827). Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires.
- Geremew, T., & Jebessa, H. (2018). Climate change and its effects on vegetation phenology across ecoregions of Ethiopia. *Global Ecology and Conservation*, 13, e00366. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.e00366>
- Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., TINOCO RUEDA, J. Á., TOLEDO MEDRANO, M. L., CONDE ALVAREZ, C., & GAY, C. (2011). Assesing current and potential paterns of 16 forest species driven by climate change in Mexico. *Atmósfera*, 21(1), 31–52.
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*, 21(1), 35–56.
- Granados-Sánchez, D. y F. L.-R. (2001). Declinación forestal. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 7(1), 5–13.
- Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Holt, R. D. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(9), 311–315. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90088-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90088-U)
- INEGI. (2014). Guia para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V, 195.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Escala 1:250,000, Serie V*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- Islas Báez, A., Pérez Miranda, R., González Hernández, A., Romero Sánchez, M. E., & Velasco Bautista, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Ra Ximhai*, 49–62. <https://doi.org/10.35197/rx.11.01.e3.2015.03.ai>
- Jennings, M. D., & Harris, G. M. (2017). Climate change and ecosystem composition across large landscapes. *Landscape Ecology*, 32(1), 195–207. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0435-1>
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). Supporting Online Material for “A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century.” *Science*, 320(5884), 1–19. Retrieved from <papers3://publication/uuid/883ACB28-097E-4331-AE5E-ACB168E17504>
- Linares, J. ., Tíscar, P. A., Camarero, J. J., Sangüesa, G., Domínguez-Clavijo, M., & Carreira, J. A. (2015). Efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra salzmannii* en el sur de la península ibérica: Tendencias pasadas, presentes y futuras. *Los Bosques y La Biodiversidad Frente Al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación En España*. 614 Pp., 255–269. Retrieved from http://origin.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap19-efectosdelcambioclimaticosobreelcrecimientodeabiespinsapoypinusnigrasalmanniiensurdela_tcm7-403997.pdf
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del*

Ambiente, 11(1), 57–71. Retrieved from
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911109>

López Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26, 479–498.

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Teviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25, 1–16.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>

Manzanilla, H. (1974). *Investigaciones epidométricas y silvícolas de bosques mexicanos de Abies religiosa*. (S. de A. y Ganadería, Ed.). México.

Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 362–371.
<https://doi.org/10.17129/botsoci.508>

Martínez, M., & Matuda, E. (1979). *Flora del Estado de México*.

Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 29–43.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.029>

Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES) – A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

National Centers for Environmental Information. (2015). *NOAA: 2015 es el año*

más caluroso globalmente por el margen más amplio en el registro.

Retrieved from

<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2015/13/supplemental/page-1>

Oros-Ortega, I., Andrade-Torres, A., Lara-Pérez, L. A., Guzmán-Olmos, R. F., Casanova-Lugo, F., Sáenz-Carbonell, L. A., & Córdova-Lara, I. (2017). Ectomycorrhizal ecology, biotechnology and taxonomy for the conservation and use of *Abies religiosa* in temperate areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 411–426.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.11.060>

Palmate, S. S., Pandey, A., Kumar, D., Pandey, R. P., & Mishra, S. K. (2017). Climate change impact on forest cover and vegetation in Betwa Basin , India. *Applied Water Science*, 103–114. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0222-6>

Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Arriola-Padilla, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 18–33.

Phillips, B. S. (2008). A Brief Tutorial on Maxent.

Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de Vegetación su Ecología Manejo e Historia, 1(November), 891. Retrieved from <http://www.liverpool.com.mx/tienda/incendios-de-vegetación-su-ecología-manejo-e-historia-vol-1/1038100650?skuld=1038100650>

Rzedowski, J. (1978a). *Vegetación de México*. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ed.) (1a Edición). México.
<https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>

Rzedowski, J. (1978b). *Vegetación de México*.

Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Altitudinal genetic

variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia*, 45(3), 399–411. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957623098&partnerID=tZOtx3y1>

Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXII(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacán state, México. Impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.03.004>

Sánchez González, A. (2004). *Análisis sinecológico florístico y biogeográfico de la vegetación del norte de la Sierra Nevada*. Universidad Autónoma Chapingo.

Santillán-Peréz, J. (1991). *Silvicultura de las coníferas de la región central*. Universidad Autónoma Chapingo.

SIRE. (2012). *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.). *Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*, 200(4), 1–7. Retrieved from [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies religiosa.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf)

- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0), 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Starker Leopold, A. (1950). Vegetation Zones of Mexico. *Ecology*, 31(4), 507–518. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1931569>
- Steven J., P., Miroslav, D., & Schapire, R. E. (n.d.). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Retrieved from http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2019-9-26..
- Valenzuela Pablo, L., & Jose, L. G. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geograficas*, 2017(92), 1–2. <https://doi.org/10.14350/rig.52339>
- Velazquez, A., V.M.Toledo, I.Luna, Barbour, M. G., & W.D.Billings. (2000). Mexican Temperate Vegetation. *North American Terrestrial Vegetation*, 2(January), 573.
- Venegas-González, A., Roig, F., & Gutiérrez, A. G. (2018). Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central Effects of climate variability on growth and establishment patterns of *Nothofagus macrocarpa* in central Chile. *Bosque*, 39(1), 81–93. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100008>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio Camacho, E. A., Chávez Durán, A. A., Zavala Aguirre, J. L., Cerano Paredes, J., & Martínez Sifuentes, A. R. (2017). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>

Vose, J., Peterson, D., & Patel-Weynand, T. (2012). Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems : A Comprehensive Science Synthesis for the U . S . Forest Sector. *U.S. Department of Agriculture*, 265.

CAPITULO 4

Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel

Altitudinal range: factor of forest vigor and determinant for the natural regeneration of the sacred true fir

RESUMEN

Objetivo: Evaluar el vigor del arbolado y la regeneración natural de oyamel al oriente del Estado de México, considerando variables topográficas y forestales.

Método: Se usó muestreo sistemático, con sitios a cada 100 m s.n.m. entre 2900 y 3600 m. Con el programa SAS se hicieron pruebas de normalidad, tablas de frecuencia y análisis de varianza para analizar la relación entre altitud y vigor y regeneración de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham.

Resultados: Hay relación entre la altitud y el vigor y la densidad arbórea. La regeneración es nula en las cotas más bajas e incrementa con la altitud hasta los 3400 m s.n.m. y no muestra reducción más arriba. La densidad de los estratos A (DAP ≥ 12.5 cm) y B (DAP < 12.5 cm y > 1 m de altura) incrementa conforme a la altitud; las densidades más altas se registran en la cota 3400 m.

Limitaciones: Se requiere investigación de otros factores que intervienen en la distribución de la especie.

Principales hallazgos: La regeneración tiene más éxito en zonas medias y altas y la condición del arbolado tiende a ser mejor ahí también. Se evidencia que el oyamel migra a zonas más elevadas, debido al cambio climático global.

Palabras clave: *Abies religiosa*, calentamiento global, declinación forestal, rango altitudinal, regeneración natural.

ABSTRACT

Objective: To evaluate tree-vigor and natural regeneration of sacred true fir in the eastern Estado de México, México, considering topographic and forest variables.

Methods: Was employed systematic sampling, with sites at each 100 m a.s.l. between 2900 and 3600 m. With the SAS program were applied statistical tests of normality, frequency tables and analysis of variance tests to study the relationship between altitude and the vigor and regeneration of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.

Results: There is relationship among altitude and vigor and tree-density. Regeneration is null in low altitudes and increases with altitude peaking by 2400 m a.s.l., without reduction higher. The tree-density in stratum A (DBH ≥ 12.5 cm) and B (DBH < 12.5 cm and > 1 m height) increases with altitude; the higher tree-densities were recorded at 3400 m.

Limitations: Research is required on other factors involved in the distribution of the studied species.

Main findings: Regeneration is more successful in middle and higher areas, and the tree vigor is better there also. It is evidenced that the sacred true fir migrates to higher areas, because of global warming.

Key words: *Abies religiosa*, global warming, forest decline, altitudinal range, natural regeneration.

INTRODUCCIÓN

La altitud influye en la temperatura y en la humedad ambiental y del suelo, lo que puede manifestarse como una reducción de los crecimientos anuales típicos de cada especie, reducir la supervivencia del renuevo, afectar la viabilidad de la semilla y menguar el vigor de la vegetación. Si los cambios son muy extremos o la capacidad adaptativa o de desplazamiento de la especie son muy bajas, incluso puede haber pérdida de la vegetación (Champo-Jiménez, Valderrama-Landeros, & España-Boquera, 2012; Guitérrez & Trejo, 2014; Islas Báez, Pérez Miranda, González Hernández, Romero Sánchez, & Velasco Bautista, 2015; Villanueva-Díaz *et al.*, 2017).

El desfase climático entre los rangos altitudinales y las diversas coberturas vegetales ocasionado por el calentamiento global, puede traer repercusiones en la dinámica, distribución, salud, adaptabilidad y sostenibilidad de los diversos organismos y ecosistemas del planeta (Estrada-Contreras, Equihua, Castillo-Campos, & Rojas-Soto, 2015; Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Tinoco-Rueda, 2013; Pérez-Miranda, Moreno-Sánchez, González-Hernández, & Arriola-Padilla, 2014; Sáenz-Romero *et al.*, 2016; Vose, Peterson, & Patel-Weynand, 2012).

La temperatura disminuye en promedio alrededor de los 0.4 a 0.7°C cada 100 metros de incremento en la altitud dependiendo de la humedad relativa del aire (Lamprecht, 1990; Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval, & Beaulieu, 2012), lo que puede generar cambios dentro de una misma masa forestal a lo largo de su distribución vertical en el terreno. Aunado a esto, Sáenz-Romero *et al.* (2012) concluyen, para el centro de México, que el aumento de la temperatura promedio será de 1.5°C para el 2030, 2.3°C para el 2060 y hasta 3.7°C al 2090, así como una reducción de la precipitación para los mismos periodos de 6.7, 9.0 y 18.2%, respectivamente, intensificando estos cambios altitudinales.

La importancia de estudiar las consecuencias del cambio climático en los ecosistemas forestales, como son el estrés hídrico, mayor incidencia de plagas y enfermedades, declinación forestal, frecuencia e intensidad de incendios, erosión del suelo, reducción del crecimiento forestal y la regeneración natural, es que en su conjunto son consecuencias de afectaciones ecosistémicas anteriores, pero que también intensifican las tasas de degradación y deforestación actuales, lo que las transforma de ser efectos a ser una parte

causal y dinámica de la problemática ambiental (CONAFOR, 2013a; Granados-Sánchez, & López-Ríos, 2001; Pardos, 2010).

Una especie que resulta frecuentemente afectada por los fenómenos causados por el incremento de la temperatura en el planeta es el *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. Cham, pues es parte de una comunidad vegetal que se asienta en zonas húmedas y con temperaturas bajas. Las afectaciones causadas por la modificación de las variables climáticas óptimas para este, o cualquier tipo de vegetación, se pueden manifestar a nivel molecular, morfológico y fisiológico, así como reducir su vigor y regeneración natural (Castellanos-Acuña *et al.*, 2014; Flores-Nieves, López-López, Ángeles-Pérez, De la Isla-Serrano, & Calva-Vásquez, 2011; Granados-Sánchez, & López Ríos, 2001; Vose *et al.*, 2012).

Starker Leopold (1950) clasifica a las comunidades de oyamel dentro de los bosques boreales por su similitud con los de coníferas de las partes septentrionales de Norteamérica, norte de Europa y Asia. De igual forma, Rzedowski (1978) menciona que las poblaciones de oyameles que actualmente se localizan en México se desplazaron desde el hemisferio norte. Critchfield (1983) propone que durante los periodos glaciares, comunidades de este tipo de vegetación se trasladaron a los actuales desiertos del norte de México; finalmente se establecieron en las zonas altas, como sierras y formaciones volcánicas, donde las temperaturas tienden a disminuir por efecto de la altitud.

Se han presentado casos de pérdida de arbolado por declinación forestal prácticamente en bosques de todo el mundo, como lo mencionan Sáenz-Romero *et al.* (2016); particularmente, para la especie *A. religiosa*, se reporta el caso de El Desierto de los Leones (Granados-Sánchez, & López-Ríos, 2001; Castillo-Flores, López-López, López-Upton, Cetina-Alcalá, & Hernández-Tejeda, 2013; Rodríguez-Trejo, 2014), y más específicamente, aunque menos severa, en las masas forestales de oyamel en el monte Tláloc en el Estado de México (Flores-Nieves *et al.*, 2011).

Los cambios en el clima pueden representar una reducción de la superficie que cuente con las condiciones apropiadas para ciertos tipos de vegetación (Sáenz-Romero *et al.* 2012); estos autores proyectan la posible variabilidad (la alza o a la baja) de la superficie de nichos ecológicos, entre ellos la del oyamel. Sus estudios realizados en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca concluyen que la superficie de distribución de esta

especie, disminuirá para el 2030 y el 2090 alrededor de 69.2 y 96.5%, respectivamente; así como prevén un desfase altitudinal de su nicho ecológico respecto al clima prevaleciente de hasta 300 m para el 2030.

El oyamel, con un rango altitudinal de distribución entre las cotas 2900 y 3600 m s.n.m. en la zona oriente del Estado de México, por su cercanía a las zonas de la cumbre, donde incide más la radiación solar, no cuenta con superficies óptimas para desplazarse a alturas mayores, esto aunado a que tiene un rango climático de distribución limitado y, por tratarse de un ecosistema fragmentado, suma las condiciones para que en un panorama futuro (70-80 años) de incremento en el calentamiento global esta especie podría sufrir reducciones en su vigor y una menor regeneración natural, lo que podría, incluso, repercutir hasta en su prevalencia (Castellanos-Acuña *et al.*, 2014; Pérez-Miranda *et al.*, 2014; Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, *et al.*, 2012). La hipótesis de la que se partió plantea que la regeneración natural y el vigor de *A. religiosa*, disminuyen en los rangos de distribución altitudinal más bajos, debido al incremento de la temperatura y a la disminución de la humedad ambiental y del suelo. Asimismo, se plantea que la regeneración natural incrementa conforme aumenta el rango altitudinal, hasta que los factores de la cumbre (exposición a mayor radiación solar, suelos someros, bajas temperaturas) limitan el establecimiento del oyamel.

Lo anterior lo afirman diversos estudios realizados en torno al cambio del clima, desde el Holoceno medio hasta la actualidad (Manzanilla-Quiñones, Martínez-Adriano, & Aguirre-Calderón, 2019), y sus efectos potenciales en la distribución de la vegetación, creando desfases entre los nichos ecológicos y las variables climáticas, obligando a las especies de climas templados a desplazarse a zonas altas y con menores temperaturas (Castellanos-Acuña *et al.*, 2014; Pérez-Miranda *et al.*, 2014; Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, *et al.*, 2012).

Cabe mencionar que, en la zona de estudio, el patrón de distribución de las distintas comunidades de vegetación está determinado, principalmente, por el gradiente altitudinal y sus respectivos rangos de temperatura y precipitación (Sánchez-González & López-Mata, 2003).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el vigor, la mortalidad y regeneración natural del oyamel, mediante variables dasométricas, sobre un gradiente altitudinal en la zona oriente del Estado de México.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se realizó en el Monte Tláloc, el cual cuenta con una altitud máxima de 4125 m s.n.m., se localiza en la sierra de Río Frío junto con otras cimas como el Telapón (Sánchez-González & López-Mata, 2003). La sierra de Río Frío se ubica en el extremo septentrional de la Sierra Nevada, cuyo parteaguas es la línea divisoria entre las cuencas hidrográficas del Pacífico (cuena del Balsas) y del Golfo (cuena del Pánuco). Cuenta con lomeríos y sierras con bosques de coníferas, encino y mixtos del centro de México, se encuentra cubierto por bosque templado de coníferas con predominancia de pinos (*Pinus montezumae* Lamb., *Pinus hartwegii* Lindl), encinos (*Quercus rugosa* Neé, *Q. laurina* Humb et Bonpl.), ailes (*Alnus jorullensis* Humboldt, Bonpland & Kunth, *A. acuminata* Humboldt, Bonpland & Kunth), cedro blanco (*Cupressus lusitanica* Mill.) y oyamel (*A. religiosa*) (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez, & Tchikoué Maga, 2005).

Estas cimas son producto de actividad volcánica y crearon extensos abanicos volcánicos. La zona de estudio, también abarca parte del área natural protegida con la categoría de Reserva Estatal Sistema Tetzcotzingo y se encuentra en las coordenadas extremas UTM Zona 14 522568.43 latitud N, 2146384.596 longitud O y 528805.759 latitud N y 2153486.335 longitud O. En la figura 37, se presenta la macrolocalización de la poligonal del bosque de oyamel reportada en la Serie V, INEGI (2015), misma que se halla en la región occidente del Monte Tláloc en Texcoco, Estado de México.

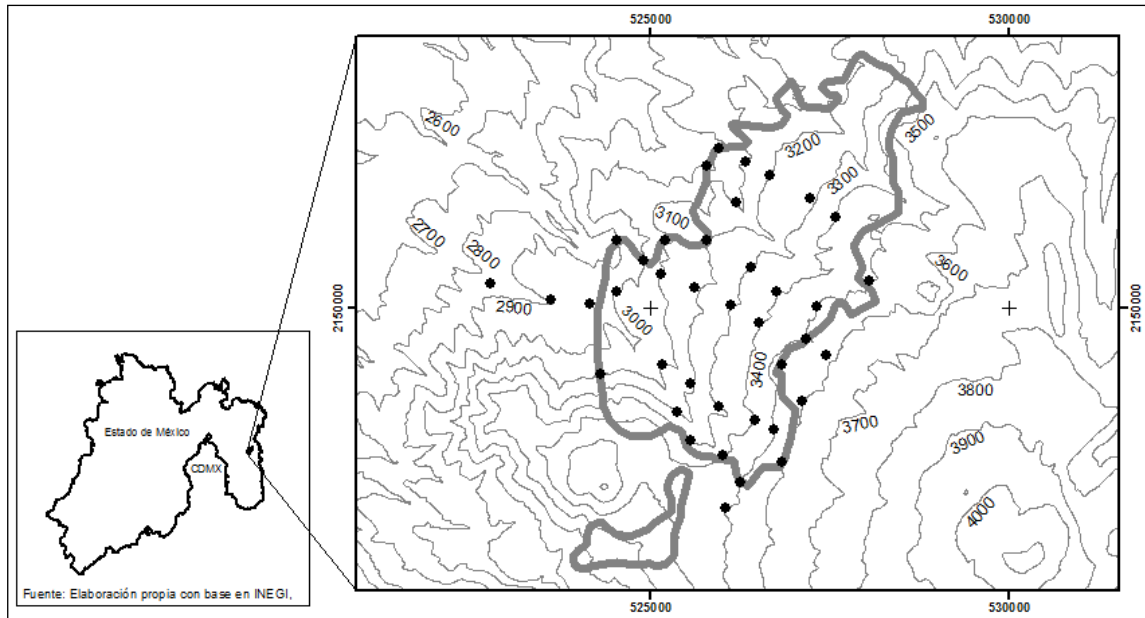


Figura 37. Macrolocalización de la poligonal de *A. religiosa* reportada en la Serie V, Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, INEGI (2015) y sitios de muestreo, los cuales se numeraron con la cota altitudinal y número consecutivo de SO a NE (ej. 3000-1). Fuente: elaboración propia.

La zona de estudio presenta un clima de montaña según la clasificación de Köppen, modificado por García, C(E)(w2)(w)b(i)g, clima semifrío, subhúmedo, con porcentaje de precipitación invernal menor a 5 %. El verano es largo, isotermal y la temperatura más elevada se presenta durante abril, mayo y junio, antes del solsticio de verano; la temperatura media anual se encuentra por debajo de los 8 °C, con una precipitación anual entre 1000 y 1200 mm.

El área cuenta con un tipo de suelo Luvisol umbrihúmico (LVhhu) con textura media, poroso y permeable. Pertenece a la unidad hidrogeológica del cenozoico superior volcánico (mioceno a reciente), con rocas volcánicas (lavas, brechas y tobas), principalmente basálticas y andesíticas con una permeabilidad media a alta; un régimen de humedad del suelo ústico, con 180 a 270 días de humedad, a údico, con 270 a 330 días de humedad (INEGI, 2015).

En la zona de estudio los rangos altitudinales donde esté establecido el bosque de oyamel van de los 3100 a los 3500 m s.n.m. (Sánchez González, 2004), y cubre una superficie de aproximadamente 3709 ha (INEGI, 2015). El estudio se centró en una

poligonal de una masa forestal de *A. religiosa* que abarca una superficie de 1 360.870 ha, de los 2900 a los 3600 m s.n.m.

Diseño del muestreo

La evaluación de las condiciones del vigor forestal y regeneración natural del oyamel en la zona de estudio, se realizó mediante muestreo forestal enfocado al arbolado adulto, joven y renuevo, considerando las cotas altitudinales entre los 2900 a los 3600 m s.n.m. para la ubicación de los sitios de muestreo. Se empleó una modificación del método utilizado para bosques y selvas, especificado en el “Manual y procedimientos para el muestreo de campo” Re-muestreo 2011, del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2011) y la “Metodología para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales” (CONAFOR, 2013b). Se instrumentó un muestreo dasonómico aleatorio y estratificado, enfocado al oyamel, realizado entre noviembre de 2018 y abril de 2019.

En la figura 38 se presenta la forma, dimensión y orientación de los sitios de muestreo empleados para bosques y zonas áridas (CONAFOR, 2011), el cual contempla el registro y medición de arbustivas y herbáceas, mientras que en esta investigación el muestreo se concentra solo en individuos de oyamel y se registran las asociaciones vegetales. La forma en “Y” invertida de los sitios y subsitios se mantuvo, a excepción de los sitios cuadrados de 1 m²; también cambia la dimensión y distancia entre ellos, estableciéndolos como se indica en la figura 3, así como las variables consideradas para la medición de los individuos, las cuales se establecen más adelante.

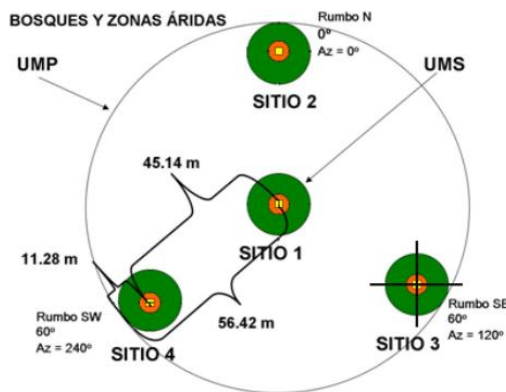


Figura 38. Forma de la unidad de muestreo utilizada. En los círculos verdes (400 m²) se mide el arbolado con DAP mayor a 7.5 cm. En los círculos naranjas (12.56 m²) se miden las plantas y árboles que tengan como mínimo 25 cm de altura y DAP menor a 7.5 cm. En los cuadros amarillos (1 m²) se registran hierbas, helechos, musgos y líquenes. Fuente: CONAFOR (2011).

De la “Metodología para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales” (CONAFOR, 2013b), se tomaron los sitios circulares de 100 m² para medir la regeneración natural de oyamel. De igual forma, se emplea una retícula de puntos para la distribución sistemática y aleatoria de los sitios. En dicha fuente se recomienda una intensidad de muestreo de 0.5% para superficies mayores a 50 ha, pero debido a que la poligonal objeto de estudio comprende 1360.870 ha, la intensidad de muestreo aplicada fue mayor a 0.1%.

Distribución de muestras

Para la ubicación de los sitios de muestreo se empleó la herramienta digital ArcMap™ versión 10.0 (ESRI, 2010). De las capas de uso de suelo y vegetación serie V (INEGI, 2013) se seleccionaron y recortaron las poligonales de oyamel ubicadas en la zona de estudio. La capa de curvas de nivel con cotas a cada 20 m de altitud, se extrajo del conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000, serie III, de la carta E14B31 (INEGI, 1982).

Con la herramienta Create Fishnet de ArcMap, se distribuyó sobre la poligonal de oyamel una red de puntos equidistantes 600 m uno de otro. Esta red se alineó perpendicularmente a la pendiente, lo que dio lugar al establecimiento final de 39 sitios de muestreo (figura 1). Cada punto de la red se alineó a la cota más cercana en el rango altitudinal de 2900 a 3600 m s.n.m. a cada 100 m de altitud, obteniendo ocho cotas; cabe mencionar que se establecieron menos sitios en las cotas de los 2900 y 3600 m, debido a que el área de distribución del oyamel a estas alturas es más reducida, restringiéndose sólo a aquellos sitios con características particulares como son los fondos de cañadas, sitios con mayor contenido de humedad o menor exposición a la radiación solar.

Durante el muestreo se reubicaron algunos puntos buscando la cota y que no fueran sitios con condiciones particularmente húmedas favorecidas por la topografía, dando

preferencia a laderas menos pronunciadas y más expuestas. Cinco se desplazaron hacia un rango altitudinal mayor fuera de la poligonal, lo que amplía y ajusta el registro de su distribución, y cuatro más, hacia un rango inferior fuera de la poligonal, uno de los cuales se situó por debajo de la cota 2900 m s.n.m., hasta el límite inferior donde se observaron oyameles. En total se muestrearon 1.56 de las 1360.870 ha del polígono de oyamel seleccionado para el presente estudio, que corresponden a una intensidad de muestreo de 0.1146%.

Muestreo en campo

Para el muestreo forestal se clasificó al oyamel en tres estratos, el primer nivel corresponde a arbolado adulto (Estrato A), que contiene a los individuos mayores o iguales a 12.5 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP). Para el arbolado joven (Estrato B) se consideró a los individuos menores a 12.5 cm. de DAP y que fueran mayores a 1 m de altura, y el nivel renuevo (Estrato C) se integró por los individuos menores o iguales a 1 m de altura, cuyo diámetro se midió en la base del tallo.

Unidades muestrales

El estrato A se muestreó en sitios circulares de 11.28 m de radio y 400 m² de área, donde a partir del punto central y en dirección al norte (0°) se midieron siete metros para establecer el primero de los tres subsitios de muestreo del estrato B, el segundo 7 m al Sureste (120°) y el tercero 7 m hacia el Suroeste (240°), todos parten del centro del sitio de 400 m². Los centros de los subsitios circulares de 5.64 m de radio y 100 m² de área del estrato B, también fueron los centros de los subsitios de muestreo del estrato C, siendo estas circulares de 1.78 m de radio y 10 m² de área como se muestra en la figura 39. Para los sitios de 11.28 m de radio se usaron cuerdas para compensar la pendiente del terreno.

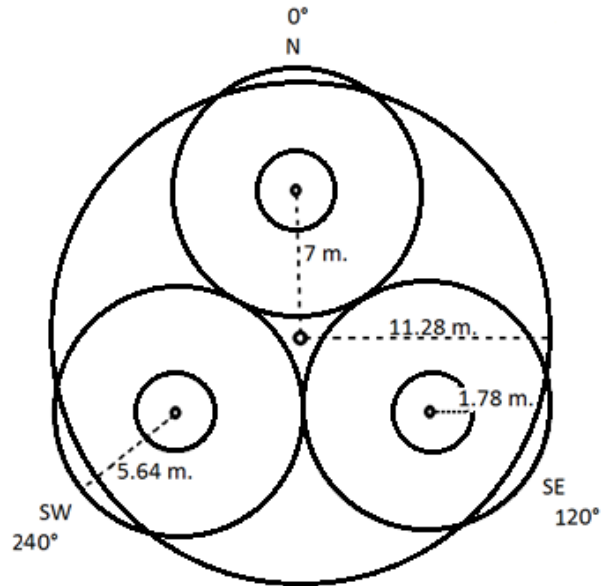


Figura 39. Forma de los sitios de muestreo, el círculo mayor para arbolado adulto, medianos para arbolado joven y los menores para renuevo de *A. religiosa*. Fuente: CONAFOR (2011).

Variables medidas

Los datos registrados para la descripción de los sitios fueron: número de sitio, coordenadas UTM y altitud con geoposicionador satelital Garmin, modelo etrex Venture Cx, pendiente con clinómetro, profundidad del suelo con una varilla enterrada en el suelo, pedregosidad, exposición con brújula, paraje y fecha del levantamiento.

Un relascopio Spiegel Relaskop Dr. W Bitterlich Pat NR. 172305, fabricado en Austria por Feinmechanische Optische Betriebsgesellschaft m.b.H., se usó para determinar la altura de los árboles; un calibrador vernier para medir los diámetros del estrato C, cinta métrica de 30 m marca Truper, la aplicación View Ranger (apoyo cartográfico), cámara fotográfica e instrumentos de manufactura propia como cinta diamétrica para medir el DAP, cuerdas compensadas y estacas.

Aparte de las variables medibles ya mencionadas, se estimó de forma visual la pedregosidad del terreno (%), la densidad de la copa (%), el vigor (rango entre 3 y 1, valor 3 lo más vigoroso), el estado sanitario de los árboles de los estratos A y B (rango entre 3

y 1, valor 3 lo más sano), el color del follaje (3 verde oscuro, 2 verde claro-amarillento, 1 café), la sobrevivencia, para los mismos estratos, y la asociación vegetal.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos del muestreo se procesaron en el programa de análisis estadístico SAS v. 9.4 (SAS Institute Inc. Cary, N.C., 2013). Inicialmente se realizó una prueba de normalidad de los datos mediante Proc Univariate. Se realizaron tablas de frecuencia mediante Proc Freq, para observar las densidades de cada estrato y se empleó Proc GLM para establecer si había correlación entre las variables diámetro, altitud y densidad forestal para los diferentes estratos, con la altitud.

Se usó la cota como la variable clase y como variables dependientes la altura y diámetro de los individuos, los valores anteriores en escala logarítmica (AltLOG y DiamLOG), así como la densidad forestal, y se buscaron interacciones con la caracterización del vigor forestal y la mortalidad para los tres estratos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontró oyamel fuera de las altitudes reportadas para el Valle de México por Rzedowski & Calderón de Rzedowski (1971) (2700 a 3500), desde los 2850, en los fondos de las cañadas, y hasta los 3612 m s.n.m., en una agrupación rodeada de pastos, establecida en un afloramiento rocoso (Sitio 3600-1).

La densidad de árboles de los tres estratos tiende a reducirse en las cotas inferiores e incrementa con la altitud, y muestra una ligera disminución hacia las cotas más altas. Es nula la cantidad de oyamel registrada para el estrato C, en la cota inferior, en la cual se realizaron tres sitios ubicados a 2850, 2900 y 2918 m s.n.m. (figura 40), mientras que en la siguiente elevación (3000 m s.n.m.), solo se registró un renuevo. En contraste, la cota 3400 tuvo una densidad promedio de 186 800/ha, es la altitud que presentó la mayor cantidad de oyameles del Estrato C.

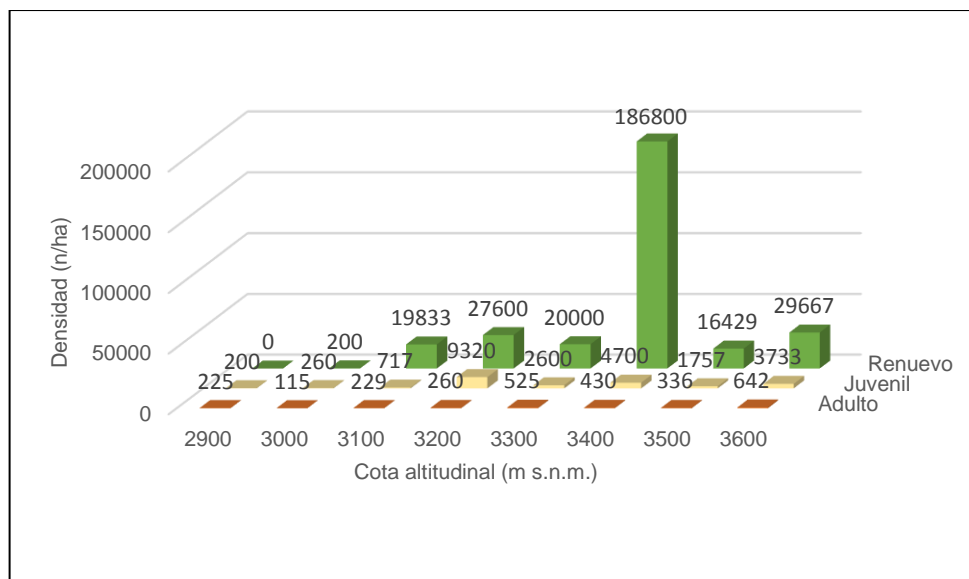


Figura 40. Densidad de individuos por estrato y por cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.

Los valores fuera de los rangos comunes observados para el arbolado juvenil y el renuevo corresponden a sitios alterados por el hombre; en el caso del estrato B, en la cota altitudinal de los 3200 m s.n.m., se trata de un sitio (3200-5) donde ocurrió un incendio forestal hace algunos años, lo que permitió el establecimiento del renuevo y su posterior desarrollo a juveniles, favorecido por las características del lugar: área bajo influencia de la sombra de un cerro aledaño, consecuentemente mayor humedad del suelo, los cuales dieron lugar a juveniles dispersos de pino y oyamel que alcanzaron densidades de 41 000/ha. Abundante regeneración post incendios catastróficos de la especie bajo estudio fue referida por Ángeles-Cervantes & López-Mata (2009) luego del incendio de 1998 en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Referente al estrato C, en la cota altitudinal de los 3400 m s.n.m., el sitio 3400-5 presentó actividades de extracción maderable, lo que ocasionó que se abrieran algunos claros y se escarificara el suelo, lo que facilitó el establecimiento del renuevo, se registró una densidad de 823 000/ha para ese sitio lo que elevó la densidad promedio para la cota 3400, 186 000/ha. El renuevo de oyamel se puede establecer bajo claros (principalmente de 44 a 88 m² y 66 m² en promedio) o bajo dosel (983 y 4 239/ha respectivamente), como

establecieron Lara-González, Sánchez-Velásquez, & Corral-Aguirre (2009) para el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.

El cuadro 5 presenta los porcentajes de vigor por estrato y rango altitudinal. En el estrato A, se puede observar que la densidad se incrementa conforme aumenta la elevación y la cota que presenta una mayor proporción de individuos muertos es la 2900, con 18.52%, mientras que las que presentan una menor mortalidad en el arbolado adulto son las tres de mayor altitud, con 5.81, 6.38 y 5.19% respectivamente. De igual forma, el vigor del estrato A incrementa conforme aumenta el rango altitudinal.

Este mayor porcentaje de individuos muertos en las cotas bajas, así como la disminución del vigor forestal, se atribuyen a las condiciones de fragmentación y efecto borde, una mayor intensidad de vientos, caída de rayos, actividades antropogénicas, pero también en gran medida por el cambio climático que supone un incremento de las temperaturas y una reducción de la precipitación (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston *et al.*, 2012), presentando escenarios de mayor sequía y teniendo repercusiones sobre el vigor y distribución de la vegetación debido a un desfase de las variables climáticas y las variables requeridas para cada organismo.

En el estrato B el mayor porcentaje de individuos muertos y con menor vigor se registró para las cotas altas, esto se relaciona a actividades de extracción de recursos y también a las condiciones de los sitios, donde si la densidad del estrato A es alta, evita el paso de la luz, lo que dificulta el desarrollo de los individuos del estrato B, y se favorece el desarrollo de hongos y líquenes. Lo anterior también limita el establecimiento del sotobosque y del estrato C (Aunós, Martínez, & Blanco, 2007; Manzanilla, 1974; Santillán-Peréz, 1991). Otra causa son sitios con suelos someros, pendientes pronunciadas y fuertes vientos que derriban a los individuos del estrato B.

Cuadro 5. Porcentajes de vigor por estrato y por cota altitudinal.

Cota (m s.n.m.)	Densidad de árboles (n/ha)	Vigor 3 (%)	Vigor 2 (%)	Vigor 1 (%)	Mortalidad (%)
Estrato A					
2900	225	77.8	3.7	0.0	18.5
3000	115	52.2	34.8	4.3	8.7
3100	229	67.3	21.8	0.0	10.9
3200	260	88.5	1.9	0.0	9.6
3300	525	77.1	9.5	1.0	12.4
3400	430	82.6	11.6	0.0	5.8
3500	336	85.1	8.5	0.0	6.4
3600	642	92.2	2.6	0.0	5.2
Estrato B					
2900	200	33.3	50.0	0.0	16.7
3000	260	84.6	15.4	0.0	0.0
3100	717	90.7	9.3	0.0	0.0
3200	9,320	95.9	2.8	0.0	1.3
3300	2,600	50.0	33.1	6.9	10.0
3400	4,700	73.6	20.0	1.7	4.7
3500	1,757	40.7	27.6	13.0	18.7
3600	3,733	42.0	31.3	12.5	14.3
Estrato C					
2900	-	-	-	-	-
3000	200	100.0	0.0	0.0	0.0
3100	19,833	95.8	3.4	0.8	0.0
3200	27,600	95.7	4.3	0.0	0.0
3300	20,000	96.0	4.0	0.0	0.0
3400	186,800	87.3	10.4	1.3	1.1
3500	16,429	89.6	10.4	0.0	0.0
3600	29,667	92.1	6.7	0.0	1.1

Fuente: elaboración propia.

Referente al estrato C, cabe destacar que el vigor disminuye hacia las cotas altas, siendo la cota 3400 m la que presenta los porcentajes más bajos de vigor, posiblemente debido a la alta densidad del estrato A y a la competencia, pues también es una de las cotas con mayor cantidad de renuevo.

En la figura 41 se observa la correlación entre la altura logarítmica del estrato A y la cota altitudinal, hay una estrecha correlación entre dichas variables, resultando que los individuos con mayor altura, en promedio, se presentaron en las cotas inferiores, en parte debido a que se trata de árboles dispersos con menor competencia, aunque las mayores alturas registradas por individuo se localizaron en la cota 3400 m. Esta tendencia de reducción de altura al incrementar altitud, también puede relacionarse con las menores temperaturas, profundidad del suelo y disponibilidad de humedad a mayores elevaciones, como Klinka, Wang, Carter, & Chen (1996) hallaron para *Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt. en un ambiente subalpino de la Columbia Británica, EE.UU.

La altura se reduce en las cotas superiores debido a diversos factores como el gradiente adiabático, una mayor densidad forestal y una menor profundidad del suelo; a manera de comparación, en la cota 3300 m se registra una densidad promedio entre sitios de 525/ha, la cota 3400 m con 430/ha y la cota 3600 con 642/ha, mientras que en las cotas inferiores se registran densidades forestales de 225/ha en promedio para los sitios de la cota 2900 m, de 115/ha en promedio para la cota 3000 m y de 229 para la cota 3100 m.

En la figura 41 (superior) se muestra el efecto de la cota altitudinal sobre el DAP en escala logarítmica para el estrato A; como lo establece Colohua-Citlaha (2015), en las masas forestales del Parque Nacional Pico de Orizaba, con la proyección de modelos de densidad, encontró que a medida que disminuye en número de árboles, aumenta la categoría diamétrica.

Para el estrato B, en la figura 41 (en medio) se muestra el efecto de la variable cota sobre las variables log altura y log diámetro, respectivamente. Se observa una menor correlación en comparación con el estrato A; para el caso de la altura se obtuvieron valores mas bajos que para el DAP y, de manera similar, disminuyen los valores conforme se incrementa la cota altitudinal, con una correlación negativa más marcada para el DAP que para la altura; se limita su crecimiento por el dosel superior, la competencia con su propio

estrato, el gradiente adiabático y contenido de humedad, así como el contenido de materia orgánica y pedregosidad en el suelo, denotando que es la Cota 3400 m la que presenta mayor cantidad de individuos en el estrato B, con un promedio de 4700/ha.

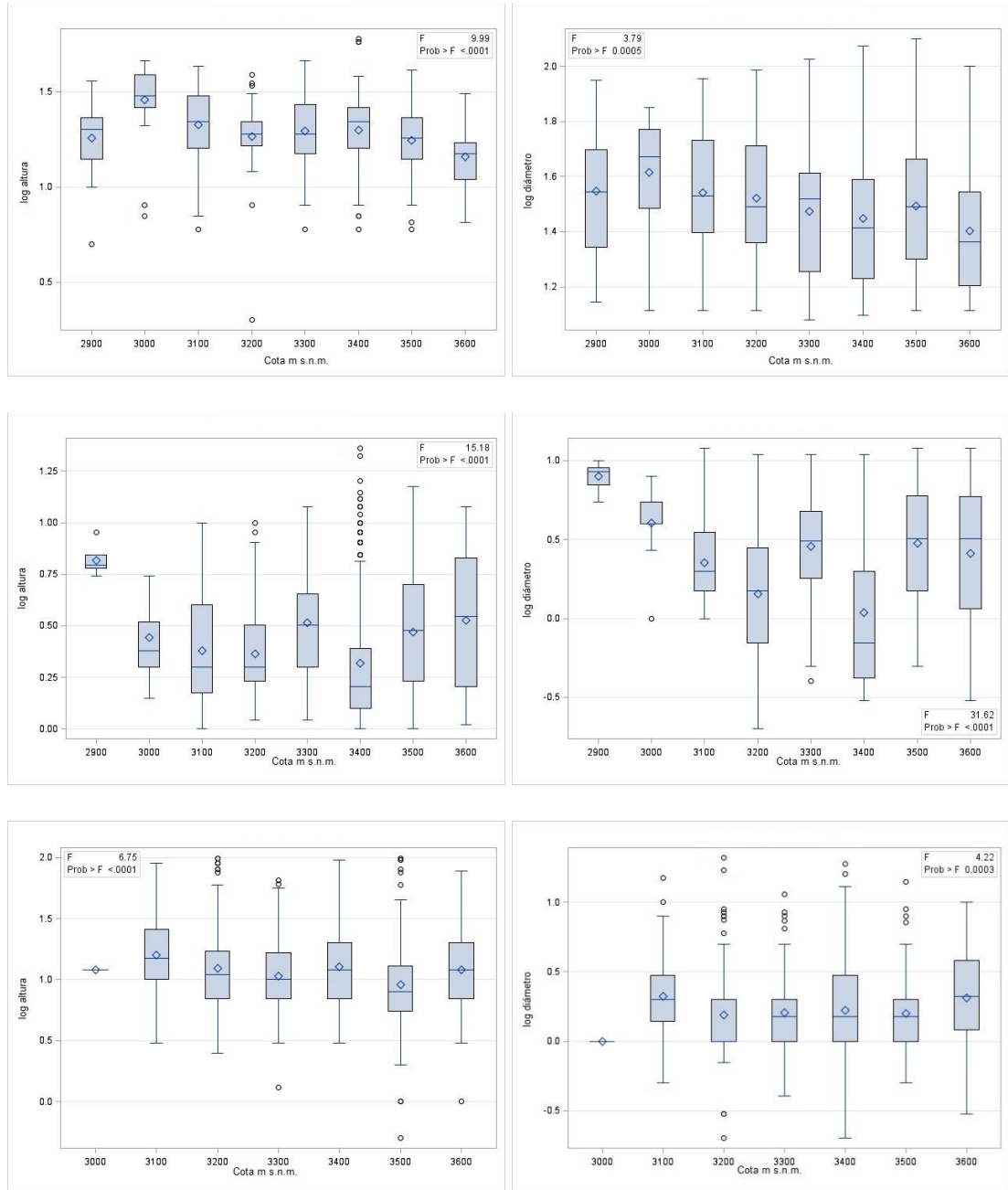


Figura 41 Correlación entre la altura y diámetro logarítmicos de los estratos A (superior), B (en medio) y C (inferior) y la cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.

Esta disminución en los diámetros y alturas de los árboles, con relación al aumento del rango altitudinal, se observó de manera similar por Linares *et al.* (2015) en España, donde estudiaron los efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *A. pinsapo* en el sur de la península ibérica y notaron que los individuos con diámetros mayores se localizan en los gradientes altitudinales inferiores, mientras que en el rango superior se encuentran individuos con diámetros menores a 10 cm, demostrando dendrocronológicamente que se han establecido más recientemente. También reportan una mayor área basal de individuos muertos en el rango inferior y que decrece conforme se incrementa la altitud.

En la figura 41 (inferior) se muestran el efecto sobre las variables log altura y log diámetro para el estrato C, presentándose una disminución de los valores de estas variables conforme se incrementa la altitud, salvo en las cotas 3400 y 3600 m, donde aumenta el diámetro, lo que demuestra que se tiene una regeneración natural un poco más vieja o vigorosa hacia las partes altas. Desde luego, puede haber influencia de la edad de la regeneración en sus dimensiones.

En las figura 41 (inferior), la cota 3600 m tiene uno de los valores más altos de logaritmo de altura, y el más alto para logaritmo de diámetro para el estrato C, la regeneración. Se trata de la segunda cota más elevada con mayor densidad de renuevo, como se verá más adelante. Las altas dimensiones de la regeneración a la mayor altitud, dejan ver un ambiente favorable para establecerse donde debería haber limitaciones.

Estos resultados contrastan con los reportado por Sáenz-Romero, Beaulieu, & Rehfeldt (2011), quienes recolectaron 14 poblaciones de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca, México, a lo largo del rango altitudinal de 2400 a 3050 m s.n.m. a cada 50 m de diferencia de altitud. Las poblaciones de altitudes menores registraron en promedio plántulas más altas y de mayor peso que aquellas originadas a mayor altitud, con condiciones más extremas para este pino.

Si se considera la densidad del arbolado para el estrato A en relación a la elevación, se puede observar (figura 42, izq.) que la densidad tiene una relación directa con la altitud hasta la cota 3300 m, donde alcanzó la media más alta, se estabiliza para las siguientes dos cotas, y repunta en el límite superior con la densidad promedio por cota más alta con

642/ha, aunque los sitios con una mayor densidad son el 3400-1 con 950/ha, el 3500-7 con 900/ha y dos sitios de la cota 3600 con 875/ha y 850/ha.

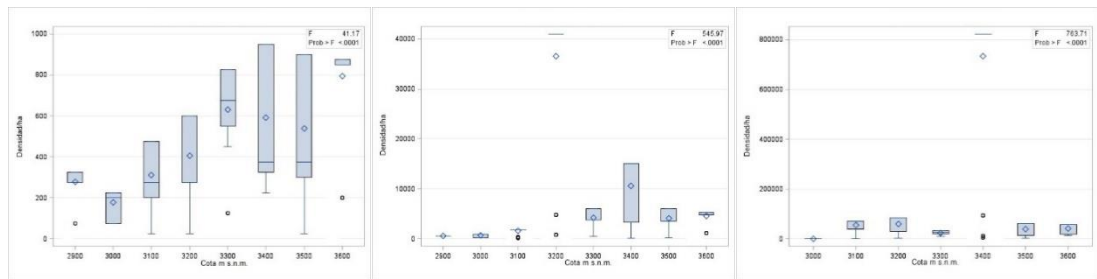


Figura 42 Gráfico de cajas con la interacción entre la densidad forestal del estrato A (izq.), B (centro) y C (der.) con la cota altitudinal. Fuente: elaboración propia.

La densidad del estrato B, que se presenta la figura 42 (centro), se comportó de manera similar que el estrato A, es mayor conforme se aumenta la altitud, alcanza su valor más alto en promedio en la cota 3400 m y después disminuye para volver a incrementar en la mayor elevación estudiada. Se destaca el valor extremo del sitio 3200-5 en la cota 3300 m, con una densidad de 41 000/ha; si se excluye, los que presentan una mayor densidad son el 3400-5 con 15 000/ha, 3300-4 y 3500-7 con 6000/ha cada uno y el 3600-3L (límite superior) con 5200/ha; las densidades más bajas se registran en las cotas inferiores.

Para el estrato C (figura 42, der.), no se registraron individuos en el límite inferior y sólo un individuo en la cota 3000 m. Los valores de densidad de renuevo forestal más altos están en la cota 3400 m en los sitios 3400-5 y 3400-3, con 823 000 y 94 000/ha, pero los valores de la cota 3100 m son importantes, debido a que es la menor elevación que presenta abundancia de renuevo, a una densidad de 71 000/ha, mientras que en el límite altitudinal superior, particularmente el sitio 3600-1, registra una densidad de 57 000/ha.

El renuevo se puede establecer en las cotas inferiores pero requiere de condiciones específicas para su establecimiento y desarrollo, como mayor concentración de humedad, menor exposición a la luz solar y fuera de zonas fácilmente accesibles para el ser humano.

En el cuadro 6 se presentan los valores de F, p y r^2 de las correlaciones entre la altura y diámetro logarítmicos y la densidad de los tres estratos con la cota altitudinal.

Cuadro 6. Valores de F , p y r^2 para la altura y diámetro logarítmicos y la densidad por estrato.

	Valor	Estrato A	Estrato B	Estrato C
	F	9.99	15.18	6.75
log altura	p	0.0001	0.0001	0.0001
	r^2	0.119	0.086	0.026
	F	3.79	31.62	4.22
log diámetro	p	0.0005	0.0001	0.0003
	r^2	0.049	0.164	0.016
	F	41.17	545.97	763.71
densidad	p	0.0001	0.0001	0.0001
	r^2	0.36	0.773	0.754

Fuente: elaboración propia.

En las cotas inferiores (2900 y 3000 m s.n.m.) prácticamente no se encontró regeneración natural en los sitios muestreados, esto debido a la mayor presencia de actividades antropogénicas, pero también se muestrearon sitios de difícil acceso y poco perturbados donde tampoco se presentó regeneración natural, lo que se podría explicar por el desfase adaptativo del oyamel con las condiciones climáticas propicias, como sucede también con otras coníferas (Castellanos-Acuña *et al.*, 2014).

El individuo más joven del estrato B registrado en la cota inferior tiene una altura de 5.5 m y un DAP de 8 cm, mientras que la altura promedio para este mismo estrato es de 6.6 m de altura y un DAP de 8.1 cm, por lo que no se ha registrado el establecimiento de regeneración natural desde que se establecieron los árboles del estrato B presentes en la cota 2900 m. Los individuos del estrato B alcanzan en promedio una altura de 3 m y un DAP de 4.4 cm para la cota 3000 m.

En la cota 3400 m, donde el estrato A tiene una mayor densidad, las cantidades de renuevo se reducen, debido a lo expresado por Manzanilla (1974), quien menciona la importancia de una correcta dosificación de luz a través de podas por lo alto, para esta especie considerada tolerante a la sombra. Los rodales muy densos no presentan regeneración, y en rodales muy iluminados, la densidad del sotobosque compite con las

plántulas de oyamel, siendo el óptimo de cobertura de sotobosque, para una mayor regeneración natural, de entre 41-81%, según este último autor.

CONCLUSIONES

La cota altitudinal superior de la zona de estudio donde se registró al oyamel, es más alta que la referida por la literatura de hace algunas décadas, para dicha especie en el valle de México, lo que constituye una primera evidencia de que está migrando a sitios más altos a causa del cambio climático global.

La menor densidad en las cotas bajas, y la mayor densidad en las cotas media y alta, para los tres estratos de arbolado de oyamel (adultos, juveniles, y regeneración) estudiados, así como la relativamente elevada mortalidad para el estrato de arbolado maduro en la cota altitudinal más baja, constituyen otro indicio de que el oyamel se está desplazando a mayores altitudes, como respuesta al cambio climático. Otra evidencia que apunta a la misma conclusión, es el menor vigor que se observó en el arbolado maduro y juvenil, en la(s) cota(s) más baja(s).

Por otra parte, la altura y diámetro de los árboles maduros tienden a reducirse a mayores altitudes, pues a causa del gradiente adiabático se encuentran temperaturas más frescas en ellas, así como menor disponibilidad de agua por tender a congelarse. Asimismo, la competencia intraespecífica tiende a incrementar debido a la relación directa observada entre densidad de oyameles adultos y altitud.

La escarificación del piso forestal y la presencia de claros pequeños, producto de aprovechamiento forestal, han favorecido la regeneración de la especie bajo estudio. Las zonas no aprovechadas retienen más humedad y en ellas son más comunes musgos, helechos y hongos, que también son parte de la biodiversidad.

Es conveniente estudiar si otras especies relevantes de este ecosistema, y otros bosques de oyamel, también están migrando a mayores altitudes, así como el efecto de otros procesos ecológicos, como un diferente régimen de fuego y áreas con poco o mínima alteración antropógena.

Los resultados del presente trabajo, y observaciones en campo, permiten considerar algunas actividades que facilitarían tanto la migración como la migración asistida del

oyamel a mayores altitudes. Se puede utilizar *P. hartwegii* para que actúe como especie nodriza, proporcionando sombra al oyamel en las localidades más altas. El apilamiento de rocas, materiales leñosos e incluso de residuos de aprovechamiento, generarían micrositios con mayor humedad en el piso forestal, para propiciar el establecimiento del oyamel. Asimismo, en varias zonas, en especial las de mayor altitud, puede pensarse en un control temporal del zacatón (*Muhlenbergia* spp.) para que tenga más éxito la regeneración natural del oyamel.

También para favorecer el establecimiento de la regeneración natural se propone, en los límites altitudinales superiores, realizar franjas limpias de pastos y hierbas, con un ancho de 15 cm. y largo deseado, a contrapendiente y con una mayor profundidad hacia el costado que da al sol, ubicarlas estratégicamente considerando la pendiente del terreno y los vientos dominantes para repoblar con la dispersión natural de la semilla de oyamel y favorecer la retención de humedad mediante desechos de residuos vegetales o rocas cuesta arriba de las franjas y con árboles nodriza como pinos para propiciar sombra (Figura 43).

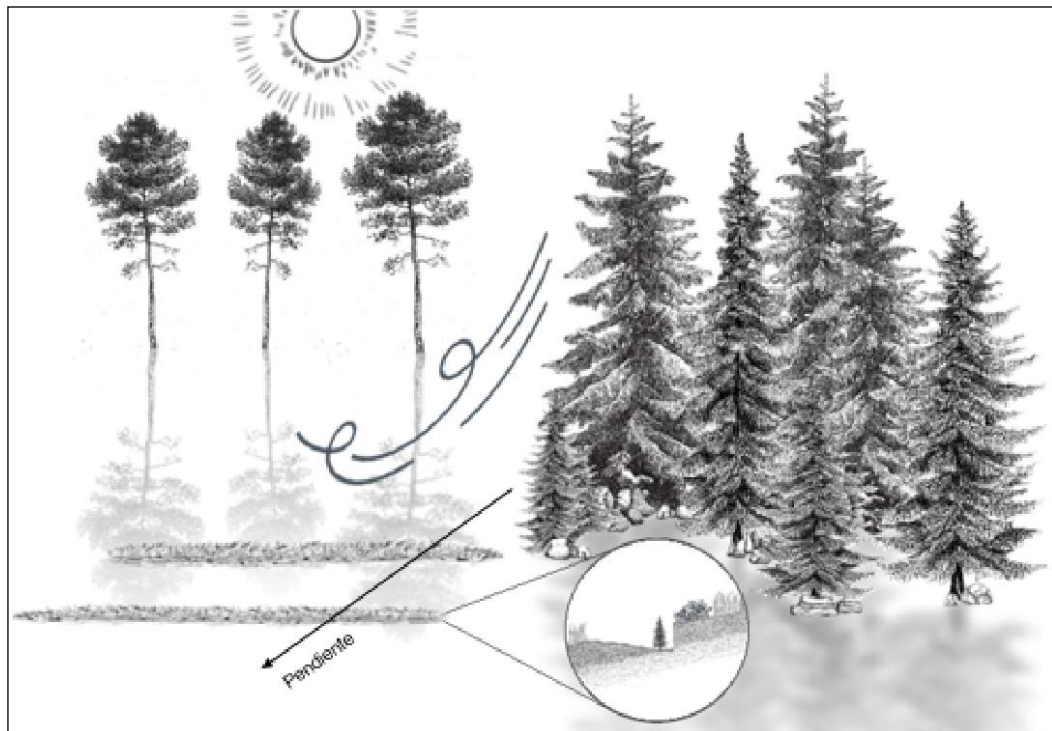


Figura 43. Diagrama de la técnica para favorecer la regeneración de oyamel. Fuente: elaboración propia.

Esta investigación ayudará en la toma de decisiones al momento de realizar reforestaciones, migración asistida, aprovechamiento forestal, sustitución de la vegetación, reforestaciones bajo dosel, reforestación con plantas nodrizas, uso de germoplasma de zonas bajas para usarla en reforestaciones a mayor altura debido a su adaptación a mayores temperaturas y como estrategia para favorecer el establecimiento de la regeneración natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángeles-Cervantes, E., & López-Mata, L. (2009). Supervivencia de una cohorte de plántulas de *Abies religiosa* bajo diferentes condiciones postincendio. Boletín de La Sociedad Botánica de México, 84, 25–33. <https://doi.org/10.17129/botsoci.2289>
- Aunós, A., Martínez, E., & Blanco, R. (2007). Tipología selvícola para los abetales españoles de *Abies alba* Mill., 16(1), 52–64.
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., & Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la reserva de la biósfera de la mariposa monarca, Michoacán provisional. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>
- Castillo-Flores, J. D., López-López, M. A., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M., & Hernández-Tejeda, T. (2013). Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 19(1), 175–184. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.06.038>
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L. (2012). Pérdida de cobertura forestal en la reserva de la biósfera mariposa monarca. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 18(2), 143–157. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.074>
- Colohua-Citlaha, B. (2015). Modelos de densidad, incrementos y comportamiento de las masas forestales del Parque Nacional Pico de Orizaba. (CONANP, Ed.).

Retrieved from <https://es.slideshare.net/bernabecolohuacitlahua/modelos-de-densidad-incrementos-y-comportamiento-de-las-masas-forestales-en-el-parque-nacional-pico-de-orizaba>

CONAFOR. (2011). Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo 2011. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx>

CONAFOR. (2013a). Bosques, cambio climático y REDD+ en México - Guía básica. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/REDD-2014.pdf>

CONAFOR. (2013b). Metodología para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales (aspectos técnicos). Comisión Nacional Forestal.

Critchfield, W. B. (1983). Impact of the Pleistocene on the Genetic Structure of North American Conifers. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=Vx5wHAAACAAJ>

ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2010). Redlands, USA.

Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Castillo-Campos, G., & Rojas-Soto, O. (2015). Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: An approach using ecological niche modelling. *Acta Botanica Mexicana*, 2015(112), 73–93.

Flores-Nieves, P., López-López, M., Ángeles-Pérez, G., De la Isla-Serrano, M., & Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9–20.

Granados-Sánchez, D., & López-Ríos, G. F. (2001). Declinación forestal. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(1), 5–13.

Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>

- INEGI. (1982). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica, Escala 1:50,000, Serie III. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie V.
- INEGI. (2015). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Escala 1:250,000, Serie V. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- Islas Báez, A., Pérez Miranda, R., González Hernández, A., Romero Sánchez, M. E., & Velasco Bautista, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Ra Ximhai*, 49–62. <https://doi.org/10.35197/rx.11.01.e3.2015.03.ai>
- Klinka, K., Wang, Q., Carter, R. E., & Chen, H. Y. H. (1996). Height growth-elevation relationships in subalpine forests of interior British Columbia. *Forestry Chronicle*, 72(2), 193–198. <https://doi.org/10.5558/tfc72193-2>
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos : los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido / por Hans Lamprecht. SERBIULA (Sistema Librum 2.0).*
- Lara-González, R., Sánchez-Velásquez, L. R., & Corral-Aguirre, J. (2009). Regeneration of *Abies religiosa* in canopy gaps versus understory, Cofre de Perote National Park, México. *Agrociencia*, 43, 739–747. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-319520090007000008&nrm=iso
- Linares, J., Tíscar, P. A., Camarero, J. J., Sangüesa, G., Domínguez-Clavijo, M., & Carreira, J. A. (2015). Efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra salzmannii* en el sur de la península ibérica: Tendencias pasadas, presentes y futuras. *Los Bosques y La Biodiversidad Frente Al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación En España*. 614 Pp., 255–269. Retrieved from <http://origin.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap19->

efectosdelcambioclimaticosobreelcrecimientodeabiespinsapoypinusnigrasalmannii
enelsurdela_tcm7-403997.pdf

- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11(1), 57–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911109>
- Manzanilla-Quiñones, U., Martínez-Adriano, C. A., & Aguirre-Calderón, Ó. A. (2019). Historical and current spatial modeling of the sacred fir (*Abies religiosa* [Kunth] Schlt. & Cham.) in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 201–217. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.10.076>
- Manzanilla B., H. (1974). Investigaciones epidométricas y silvícolas de bosques mexicanos de *Abies religiosa*. (S. de A. y Ganadería, Ed.). México.
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 29–43. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.029>
- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid: Ministerio de Ciencias e Innovación. 2453 p.
- Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Arriola-Padilla, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schlt. et. Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 18–33.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de Vegetación su Ecología Manejo e Historia, 1(November), 891. Retrieved from <http://www.liverpool.com.mx/tienda/incendios-de-vegetación-su-ecología-manejo-e-historia-vol-1/1038100650?skuId=1038100650>

- Rzedowski, J. (1971). Principales comunidades vegetales. (J. Rzedowski & G. Calderón de Rzedowski, Eds.), Flora fanerogámica del Valle de México. CECSA: México, pp 47-54.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ed.) (1a Edición). México.
<https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia*, 45(3), 399–411. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957623098&partnerID=tZOtx3y1>
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XXII(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mchoacán state, México. Impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.03.004>
- Sánchez-González, A., & López-Mata, L. (2003). Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 74(1), 47–71. <https://doi.org/10.1093/nar/gkl935>
- Sánchez González, A. (2004). Análisis sinecológico florístico y biogeográfico de la vegetación del norte de la Sierra Nevada. Tesis Doctoral en Ciencias. Montecillo,

- México. Colegio de Postgraduados. 305 p.
- Santillán-Peréz, J. (1991). Silvicultura de las coníferas de la región central. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 305 p.
- SAS Institute Inc. Cary, N.C. (2013). Help and documentation.
- Starker Leopold, A. (1950). Vegetation Zones of Mexico. *Ecology*, 31(4), 507–518. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1931569>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio Camacho, E. A., Chávez Durán, A. A., Zavala Aguirre, J. L., Cerano Paredes, J., & Martínez Sifuentes, A. R. (2017). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetl en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>
- Vose, J., Peterson, D., & Patel-Weynand, T. (2012). Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems : A Comprehensive Science Synthesis for the U . S . Forest Sector. U.S. Department of Agriculture, 265.

CONCLUSIONES GENERALES

Ambos MCG, del Capítulo 3, predicen que la distribución potencial actual abarca hasta la cima del monte Tláloc (Figura 36), situación que no se observó en el muestreo del Capítulo 4; pero cimas mayores como los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, las cuales, para el 2099, si presentarán las condiciones idóneas para el establecimiento del oyamel, evidencia un desplazamiento altitudinal de las masas forestales de oyamel, como se pudo observar en los comportamientos de las gráficas del Capítulo 4, situación que se hace más probable en cimas de menor altitud.

La modelación de distribución potencial actual para ambos MCG coincide con lo encontrado en campo en el Capítulo 3, como puede observarse en la figura 44, donde los sitios de muestreo se alinean a las superficies para el 2019. Lo proyectado para el 2099 difiere entre cada MCG, la superficie idónea para

oyamel, en el modelo HADGEM, se incrementa ligeramente, ladera abajo, obedeciendo a un patrón de forma similar, mientras que para el modelo GFDL, la superficie con alta idoneidad se desplaza altitudinalmente entre 50 a 100 m s.n.m. hacia arriba.

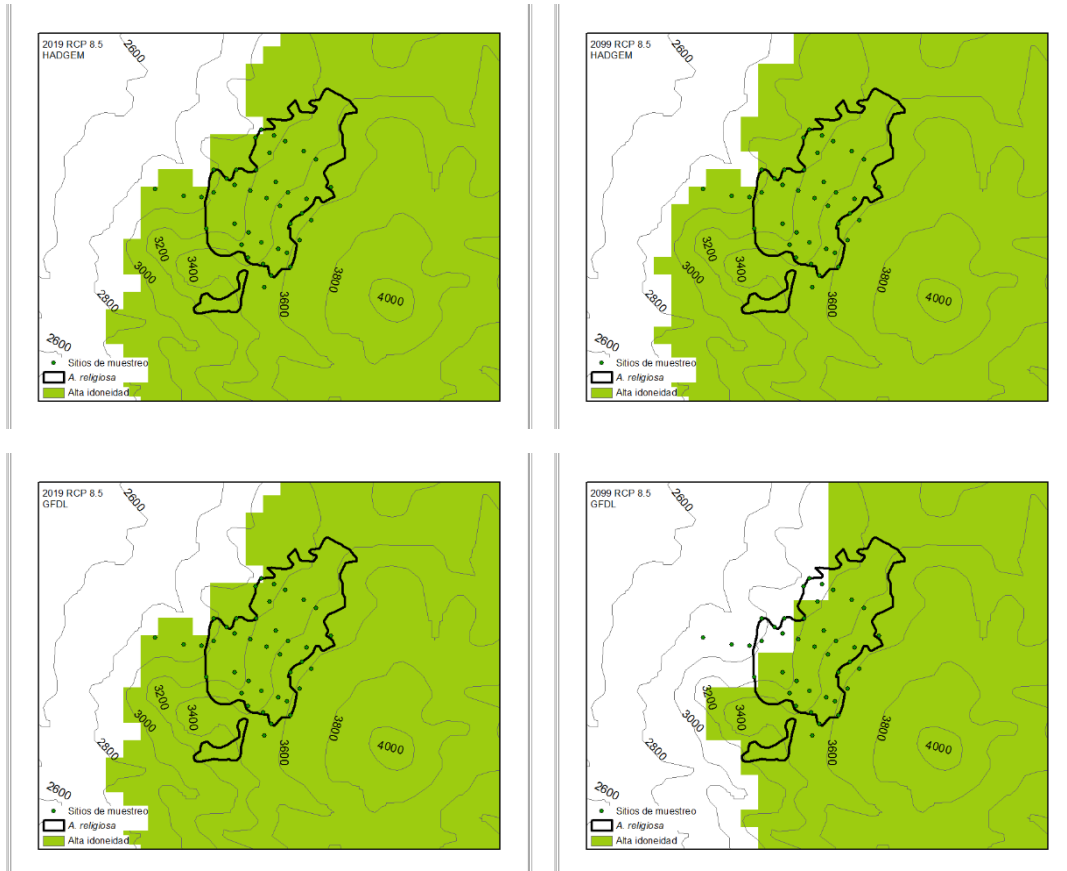


Figura 44. Distribución potencial actual y futura para oyamel en el polígono muestreado en la zona del monte Tlálóc. (Arriba) Modelo HADGEM, (Abajo) Modelo GFDL.

Durante el muestreo forestal no se encontró regeneración natural abundante hasta la cota 3100 y los modelos HADGEM y GFDL presentan una distribución potencial actual a partir de los 3000 m s.n.m.

12 LITERATURA CITADA

Aquino-Ramírez, M., Velazquéz-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder

- en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25, 1–16.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521773>
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237–276.
<https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Biota, A. (2017). The Tertiary History of the Northern Temperate Element in the Northern Latin, (July 2014). <https://doi.org/10.2307/2656952>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 2–12.
<https://doi.org/1607-6079>.
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., & Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la reserva de la biósfera de la mariposa monarca, Michoacán provisional. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>
- Castillo-Flores, J. D., López-López, M. A., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M., & Hernández-Tejeda, T. (2013). Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 175–184.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.06.038>
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L. (2012). PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA MONARCA , 18(2), 143–157.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.074>
- Critchfield, W. B. (1983). *Impact of the Pleistocene on the Genetic Structure of North American Conifers*. Retrieved from
<https://books.google.com.mx/books?id=Vx5wHAAACAAJ>

- Eguiarte Fruns, L. E., & Furnier, G. R. (1997). CONABIO , Número de Referencia B138 Area de Conocimiento : Ecológico y Genético Responsables : Glenn R . Furnier y Luis E . Eguiarte Fruns Colaboradores : Erika Aguirre Planter y Andrés Keiman Freire . Instituto de Ecología , UNAM. *Planter*.
- Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Castillo-Campos, G., & Rojas-Soto, O. (2015). Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: An approach using ecological niche modelling. *Acta Botanica Mexicana*, 2015(112), 73–93.
- Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, C.-Á. y T.-V. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. [Http://Atlasclimatico.Unam.Mx/Inecc/Atlas_2_190215_documentacion.Pdf](http://Atlasclimatico.Unam.Mx/Inecc/Atlas_2_190215_documentacion.Pdf), 1–22. Retrieved from http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf
- Flores-Nieves, P., López-López, M., Ángeles-Pérez, G., De la Isla-Serrano, M., & Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.*, 2(8), 9–20.
- Fogel, R. B. (2012). *Cambio climático, alteraciones ambientales y pobreza en el Paraguay*. (CLACSO, Ed.) (1. ed. en). Retrieved from http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb2466742__Scambio climatico__Ff%3Afacetcollections%3A3%3A3%3ARecursos electrónicos%3A%3A__Ff%3Afacetfields%3Atitle%3Atitle%3ATítulo%3A%3A__P0%2C8__Orighresult__X6__T?lang=spi&suite=cobalt
- Fourier, J. (1827). Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires.
- Geremew, T., & Jebessa, H. (2018). Climate change and its effects on vegetation phenology across ecoregions of Ethiopia. *Global Ecology and*

- Conservation*, 13, e00366. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.e00366>
- Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., TINOCO RUEDA, J. Á., TOLEDO MEDRANO, M. L., CONDE ALVAREZ, C., & GAY, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change in Mexico. *Atmósfera*, 21(1), 31–52.
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*, 21(1), 35–56.
- Granados-Sánchez, D. y F. L.-R. (2001). Declinación forestal. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 7(1), 5–13.
- Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Holt, R. D. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(9), 311–315. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90088-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90088-U)
- INEGI. (2014). Guía para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V, 195. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Escala 1:250,000, Serie V*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- Islas Báez, A., Pérez Miranda, R., González Hernández, A., Romero Sánchez, M. E., & Velasco Bautista, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Ra Ximhai*, 49–62. <https://doi.org/10.35197/rx.11.01.e3.2015.03.ai>
- Jennings, M. D., & Harris, G. M. (2017). Climate change and ecosystem

composition across large landscapes. *Landscape Ecology*, 32(1), 195–207.
<https://doi.org/10.1007/s10980-016-0435-1>

Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). Supporting Online Material for “A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century.” *Science*, 320(5884), 1–19. Retrieved from papers3://publication/uuid/883ACB28-097E-4331-AE5E-ACB168E17504

Linares, J. ., Tíscar, P. A., Camarero, J. J., Sangüesa, G., Domínguez-Clavijo, M., & Carreira, J. A. (2015). Efectos del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra salzmannii* en el sur de la península ibérica: Tendencias pasadas, presentes y futuras. *Los Bosques y La Biodiversidad Frente Al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación En España*. 614 Pp., 255–269. Retrieved from http://origin.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap19-efectosdelcambioclimaticosobreelcrecimientodeabiespinsapoypinusnigrasalmanniiensurdela_tcm7-403997.pdf

Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué Maga, H. (2005). Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 11(1), 57–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911109>

López Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M., & Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26, 479–498.

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Teviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25, 1–16.

<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>

- Manzanilla, H. (1974). *Investigaciones epidométricas y silvícolas de bosques mexicanos de Abies religiosa*. (S. de A. y Ganadería, Ed.). México.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, *94*(1), 362–371.
<https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez, M., & Matuda, E. (1979). *Flora del Estado de México*.
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *19*(1), 29–43.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.029>
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES) – A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- National Centers for Environmental Information. (2015). *NOAA: 2015 es el año más caluroso globalmente por el margen más amplio en el registro*. Retrieved from
<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2015/13/supplemental/page-1>
- Oros-Ortega, I., Andrade-Torres, A., Lara-Pérez, L. A., Guzmán-Olmos, R. F., Casanova-Lugo, F., Sáenz-Carbonell, L. A., & Córdova-Lara, I. (2017). Ectomycorrhizal ecology, biotechnology and taxonomy for the conservation and use of *Abies religiosa* in temperate areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *23*(3), 411–426.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.11.060>
- Palmate, S. S., Pandey, A., Kumar, D., Pandey, R. P., & Mishra, S. K. (2017).

Climate change impact on forest cover and vegetation in Betwa Basin ,
India. *Applied Water Science*, 103–114. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0222-6>

Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Arriola-Padilla, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 18–33.

Phillips, B. S. (2008). A Brief Tutorial on Maxent.

Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de Vegetación su Ecología Manejo e Historia, 1(November), 891. Retrieved from <http://www.liverpool.com.mx/tienda/incendios-de-vegetación-su-ecología-manejo-e-historia-vol-1/1038100650?skuld=1038100650>

Rzedowski, J. (1978a). *Vegetación de México*. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ed.) (1a Edición). México. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>

Rzedowski, J. (1978b). *Vegetación de México*.

Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia*, 45(3), 399–411. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957623098&partnerID=tZOtx3y1>

Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXII(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for

- michoacán state, México. Impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.03.004>
- Sánchez González, A. (2004). *Análisis sinecológico florístico y biogeográfico de la vegetación del norte de la Sierra Nevada*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Santillán-Peréz, J. (1991). *Silvicultura de las coníferas de la región central*. Universidad Autónoma Chapingo.
- SIRE. (2012). *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.). *Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*, 200(4), 1–7. Retrieved from [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies religiosa.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf)
- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0), 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Starker Leopold, A. (1950). Vegetation Zones of Mexico. *Ecology*, 31(4), 507–518. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1931569>
- Steven J., P., Miroslav, D., & Schapire, R. E. (n.d.). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Retrieved from http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2019-9-26..
- Valenzuela Pablo, L., & Jose, L. G. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones*

Geograficas, 2017(92), 1–2. <https://doi.org/10.14350/rig.52339>

- Velazquez, A., V.M.Toledo, I.Luna, Barbour, M. G., & W.D.Billings. (2000). Mexican Temperate Vegetation. *North American Terrestrial Vegetation*, 2(January), 573.
- Venegas-González, A., Roig, F., & Gutiérrez, A. G. (2018). Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central Effects of climate variability on growth and establishment patterns of *Nothofagus macrocarpa* in central Chile. *Bosque*, 39(1), 81–93. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100008>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio Camacho, E. A., Chávez Durán, A. A., Zavala Aguirre, J. L., Cerano Paredes, J., & Martínez Sifuentes, A. R. (2017). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>
- Vose, J., Peterson, D., & Patel-Weynand, T. (2012). Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems : A Comprehensive Science Synthesis for the U . S . Forest Sector. *U.S. Department of Agriculture*, 265.

