



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas

**ECOLOGÍA E INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE
CARACTERIZAN LA PRODUCTIVIDAD DE *Euphorbia antisiphilitica* ZUCC
EN EL NORTE DE MÉXICO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS

Presenta:

GONZALO VARGAS PIEDRA

Bajo la supervisión de:

Dr. Martin Martínez Salvador

Mayo, 2020

Bermejillo, Durango, México



APROBADA



**ECOLOGÍA E INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE
CARACTERIZAN LA PRODUCTIVIDAD DE *Euphorbia antisiphilitica* ZUCC
EN EL NORTE DE MÉXICO**

Tesis realizada por **GONZALO VARGAS PIEDRA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


**DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR:



Dr. Martin Martínez Salvador

CO-DIRECTOR:



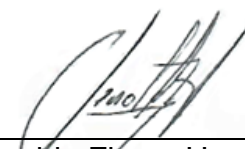
Dr. Ricardo D. Valdez Cepeda

ASESOR:



Dr. Armando López Santos

ASESOR:



Dr. Arnoldo Flores Hernández

AGRADECIMIENTOS

Un gran agradecimiento total a mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo, y en especial al A la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Agradezco al Dr. Martin Martínez Salvador su gran disposición tiempo y las palabras y consejos en mi proceso de formación.

También agradezco el apoyo brindado durante la realización de mi investigación a mi Comité Asesor: Dr. Ricardo D. Valdez Cepeda, Dr. Armando López Santos y Dr. Arnoldo Flores Hernández

Agradecimiento especial a la Dra. Nathalie Socorro Hernández Quiroz por su invaluable colaboración y conocimiento para el desarrollo de mi investigación.

Agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento y apoyo en general que nos brinda a todos los estudiantes.

Se agradece al INIFAP, Campo Experimental La Campana por su apoyo a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 148094.

Se agradece a la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua y a la SEP por su apoyo a través del Programa para el Desarrollo profesional Docente (PRODEP-SEP). Proyecto No. UACH-PTC-351.

Agradezco a los Profesores del Núcleo Académico del Posgrado de la URUZA, compañeros y colegas. En particular y muy agradecido con la colaboración y acompañamiento en el proceso de examen de grado a Mary Miranda.

Un agradecimiento especial a la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad de la Universidad Autónoma de Chihuahua por permitirme hacer una estancia de la cual se desprende parte de la investigación.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional en cada instante de mi vida; con dedicatoria especial para mi padre Amador Vargas González (Q.E.P.D.)

DATOS BIOGRÁFICOS

Información personal

Nombre: Gonzalo Vargas Piedra.

Fecha de nacimiento: 10 de enero de 1981

Lugar de nacimiento: Villa Unión, Poanas, Durango, México.

Formación académica

Ingeniero Agrónomo Especialista en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas. Autónoma Chapingo-Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango. TESIS “Respuesta del nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) a las aplicaciones foliares de nutrimentos” (2000-2005).

Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo-Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango. TESIS. “Requerimiento de frío y calor de nogal pecanero *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch de ciclo corto” (2010-2012).

Certificaciones o acreditaciones

Certificado de Competencia Laboral en el Estándar de Competencia: Diseño de cursos de capacitación presenciales, sus instrumentos de evaluación y material didáctico, con clave EC0049 conocer (2013).

Certificado de Competencia Laboral en el Estándar de Competencia: Impartición de cursos de formación del capital humano de manera presencial grupal, con clave EC0217 conocer (2013).

Diplomado en Línea Metodología PESA (Proyecto Estratégico para la Seguridad Alimentaria) para agentes de Desarrollo Rural. SAGARPA-INITE-PESA-FAO. (2012).

CONTENIDO

TEMA

PÁGINA

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos	5
3. HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO I.....	6
ECOLOGÍA E INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE CARACTERIZAN LA PRODUCTIVIDAD DE EUPHORBIA ANTISYPHILITICA ZUCC EN EL NORTE DE MÉXICO.....	6
RESUMEN.....	6
ECOLOGY AND INFLUENCE OF CLIMATE VARIABLES THAT CHARACTERIZE THE PRODUCTIVITY OF EUPHORBIA ANTISYPHILITICA ZUCC IN NORTHERN MEXICO.....	7
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN	8
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
Análisis de la Comunidad	11
Valor de Importancia Ecológica	11
Valor de la Productividad.....	12
Análisis de variables ecológicas	13
RESULTADOS	14
DISCUSION.....	22

CONCLUSIONES	25
LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO 2.....	30
DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL Y FUTURA DE LA ARBUSTIVA XEROFÍTICA CANDELILLA (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>) BAJO DOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	30
RESUMEN.....	30
CURRENT AND FUTURE POTENTIAL DISTRIBUTION OF THE XEROPHYTIC SHRUB CANDELILLA (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>) UNDER TWO CLIMATE CHANGE SCENARIOS	31
ABSTRACT.....	31
INTRODUCCIÓN	32
MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
RESULTADOS	40
Predicción actual de presencia de la candelilla	40
Futuros sitios potenciales para la distribución de Candelilla.....	43
DISCUSION.....	49
CONCLUSIONES	51
LITERATURA CITADA	52

INDICE DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 1.1 Índice de Valor de Importancia para sitios de muestreo	15
Cuadro 1.2 Prueba de análisis multivariante para diferentes niveles de productividad	19
Cuadro 1.3 Dimensiones de las funciones de discriminantes canónicas para las variables de productividad	19
Cuadro 1.4 Estructura Canónica Total (Análisis de Discriminante Canónico)	20
Cuadro 1.5 Estadísticos de la prueba multivariada para la primera función canónica.	20
Cuadro 1.6 Análisis de varianza y medias por nivel de productividad	21
Tabla 1. Variables ambientales y porcentaje de contribución	38
Tabla 2 Idoneidad del hábitat de la candelilla en México y Estados Unidos ...	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sitios de muestreo	10
Figura 1.2 Diseño de un conglomerado en campo.	11
Figura 1.3 Composición florística de los sitios de muestreo de candelilla	15
Figura 2.1 Sitios de presencia de candelilla en América del Norte, extraídos de GBIF.	37
Figura 2.2 Valor de la media para área bajo curva (AUC) para 50 réplicas proyectadas a futuro medio (2050).	41
Figura 2.4 Idoneidad actual del hábitat de candelilla en México y Estados Unidos	43
Figura 2.5 Áreas de distribución potencial de Candelilla con un RCP de 4.5, bajo tres GCM para México y USA.....	46
Figura 2.6 Áreas de distribución potencial de Candelilla con un RCP de 8.5, bajo tres GCM para México y USA.....	48

RESUMEN

Ecología e influencia de las variables climáticas que caracterizan la productividad de *Euphorbia antisyphilitica* zucc en el norte de México

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) es una especie de arbustiva distribuida a lo largo del desierto de Chihuahuense del Norte de México y el Sur de los Estados Unidos de América. Tiene una importancia económica debido a la cera natural que produce. La intensa cosecha de candelilla parece reducir gradualmente las poblaciones naturales de esta especie. El objetivo del estudio fue determinar los niveles de productividad de la candelilla, así como proyectar la distribución potencial de las poblaciones bajo dos escenarios de cambio climático en su área de distribución natural en América del Norte. Se muestrearon 27 conglomerados en tres estados de la república, en cada uno se tomaron medidas de una especie promedio y se generó una base de datos con 17 variables de clima, suelo y relieve, finalmente se generó índice de valor de importancia valores de productividad alta, media y baja. El índice de valor de importancia ecológica mayor corresponde a la *Larrea tridentata* y en cuarto lugar a *Euphorbia antisyphilitica*. Las variables que más influyen sobre una productividad alta de candelilla son textura gruesa del suelo, pendientes mayores a 17.37%, temperaturas menores a 4.87 °C en invierno, así como las precipitaciones mayores a 294.67 mm en verano. Las áreas finales de distribución previstas se clasificaron en 5 categorías de idoneidad del hábitat de candelilla posibles en el sitio: Ninguna (<19%), Baja (20-38%), Media (39-57%), Alta (58-76%) y Muy alto (> 77%). El área de distribución de la candelilla para América del Norte se pronosticó como aproximadamente 19.1 millones de hectáreas en las condiciones actuales para la alta idoneidad del hábitat; sin embargo, la proyección para los próximos cincuenta años no es prometedora porque los modelos de circulación general proyectaron una reducción de más de 6.9 millones de hectáreas utilizando escenarios conservadores (RCP 4.5) o extremos (RCP 8.5). **Palabras clave:** conglomerado, comunidad vegetal, modelos de circulación general, hábitat.

ABSTRACT

Ecology and influence of climate variables that characterize the productivity of *Euphorbia antisyphilitica* zucc in northern México

The candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) is a species of shrub distributed throughout the Chihuahuan desert of northern Mexico and the southern United States of America. It has an economic importance due to the natural wax it produces. The intense candelilla harvest seems to gradually reduce the natural populations of this species. The objective of the study was to determine the productivity levels of the candelilla, as well as to project the potential distribution of the populations under two climate change scenarios in its natural distribution area in North America. 27 conglomerates were sampled in three states of the republic, in each one measurement were taken of an average species and a database was generated with 17 variables of climate and relief, finally a value index of greatest ecological importance corresponds to *Larrea tridentate* and in fourth place to *Euphorbia antisyphilitica*. The variables that most influence high candelilla productivity are coarse soil texture, slopes greater than 17.37%, temperatures less than 4.87 ° C in winter, as well as rainfall greater than 294.67 mm in summer. The final expected distribution areas were classified into 5 possible suitability categories of candelilla on the site: None (<19%), Low (20-38%), Medium (39-57%), High (58-76 %) and Very high (> 77%). The range of candelilla for North America was predicted to be approximately 19.1 million hectares in the current conditions for the high habitat suitability; however, the projection for the next fifty years is not promising because the general circulation models projected a reduction of more than 6.9 million hectares using either conservatives (RCP 4.5) or extreme (RCP 8.5) scenerios.

Key words: conglomerate, plant community, general circulation models, habitat.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La candelilla (*Euphorbia antisiphylitica* Zucc.) es una especie nativa de Norte América que se distribuye desde el Sur de los Estados Unidos de América hasta las regiones del Altiplano Mexicano (Scora et al., 1995). Ésta especie es un recurso forestal no maderable de importancia socioeconómica en los ecosistemas áridos y semiáridos del Desierto Chihuahuense (SEMARNAT, 2008; Martínez et al., 2015). La cera de la candelilla representa uno de los productos naturales más apreciados en diferentes industrias, desde la cosmética hasta la electrónica, por sus características únicas de alta calidad como el color amarillo transparente, la mayor dureza frente otras ceras naturales (Canales et al., 2006). El aprovechamiento comercial de esta especie comenzó durante los primeros años del siglo XX y tomó mucha importancia económica en el Desierto Chihuahuense (Rojas et al., 2011). La cosecha de esta planta se intensificó en la primera y la segunda guerras mundiales para la fabricación de municiones y recubrimiento de carpas contra el agua (Martínez y Mandujano, 2013).

Lo estimado es una superficie potencial de 8,526,336 hectáreas con poblaciones de candelilla. Esta especie se encuentra asociada con otras especies arbustivas de importancia económica y ecológica como lechuguilla, orégano y sotol (Martínez et al., 2015).

La importancia económica de cera natural de la candelilla y su recolección o extracción intensa han provocado que las poblaciones naturales se reduzcan paulatinamente (Ochoa et al., 2010). Por lo tanto, la generación de información sobre su distribución potencial considerando posibles escenarios espaciales donde se relacionen las actividades antropogénicas y las condiciones de variables físicas como clima, suelo y relieve es importante (Maciel et al., 2015; Cortes et al., 2013; Martínez et al., 2015).

También, el conocimiento sobre su intensa explotación en áreas degradadas de las comunidades vegetales de candelilla es importante porque provoca la colonización y dominancia de especies asociadas como *Agave lechuguilla*,

Larrea tridentata y *Opuntia* sp. (Zamora et al., 2013); como consecuencia, los candelilleros tienen que desplazarse cada vez más a distancias mayores (Villa et al., 2010), en especial a donde se encuentran mayor abundancia de plantas de candelilla (Ochoa et al., 2010). En conjunto, las especies presentes en áreas donde la candelilla habita proveen al entorno natural servicios ecológicos que resultan en una relación simbiótica (Limonés et al., 2015) y, por lo tanto, a la conservación.; así, el manejo adecuado de las poblaciones silvestres de la candelilla es primordial ante el aprovechamiento intensivo del que es objeto (Zamora et al., 2013).

El primer capítulo de la tesis está enfocado a identificar qué variables climáticas, de topografía y de suelo son las que intervienen en la productividad de la planta de candelilla. El valor de productividad de la candelilla está en función del promedio de la suma de tres variables relativas como son abundancia, altura y cobertura en tres estados del norte de México que son representativos de la producción de cera de candelilla.

En el segundo capítulo se pretende modelar las distribuciones actual y potencial de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) en Norte América con el propósito de identificar sitios adecuados de presencia a través de sus requerimientos climáticos, así como definir las distribuciones potencial actual y futura con base en dos escenarios climáticos y tres modelos de circulación global. Las variables climáticas son tomadas del Worldclim y la modelación para la predicción de la distribución se realizó con el software Maxent.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Generar los elementos necesarios para desarrollar planes de manejo y de aprovechamiento de la candelilla a través de los requerimientos climáticos que intervienen tanto en la productividad como en su distribución en el norte de México.

Modelar los posibles cambios a mediano plazo ante el cambio climático en todo Norte América con distintos escenarios y modelos de circulación general o global.

2.2 Objetivos específicos

i) Identificar el potencial productivo de la candelilla en el norte de México por medio de las variables físico ambientales como de la estructura de la planta que intervienen de su desarrollo.

ii) Identificar y modelar la distribución actual y futura a mediano plazo con dos escenarios y tres modelos de circulación general, a partir de variables bioclimáticas con el modelo de máxima entropía.

3. HIPÓTESIS

***Ho1.-** La productividad y distribución natural de la candelilla, es explicado por la interacción que existe entre las variables físico ambientales, así como las topográficas y de relieve.*

***Ho2.-** La proyección de la idoneidad de hábitat de la candelilla a mediano plazo, es explicado por los modelos de circulación global y por, las proyecciones de concentración de gases de efecto invernadero llamadas trayectorias de concentración representativas, así como las variables bioclimáticas que determinan su distribución natural.*

CAPÍTULO I

ECOLOGÍA E INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE CARACTERIZAN LA PRODUCTIVIDAD DE *Euphorbia antisiphilitica* ZUCC EN EL NORTE DE MÉXICO

RESUMEN

La candelilla es un recurso forestal no maderable de mucha importancia económica, porque representa parte del sustento familiar de más de 3500 núcleos familiares. México es el único productor de cera, pero dada su explotación y las características adversa del clima, lo importante es caracterizar la influencia de variables de suelo y las variables climáticas que son determinantes en la productividad de la planta. Por ello, 27 conglomerados distribuidos en los tres estados (6 conglomerados en el estado de Durango, 8 en el de Chihuahua y 13 en el de Coahuila) se muestrearon. Cada conglomerado consta de 16 sitios circulares con un área de 250 m² por círculo. Cada círculo fue dividido en cuatro cuadrantes; posteriormente, la planta moda o promedio de cada especie fue seleccionada para medir las variables altura total de la planta, diámetro de copa mayor y menor, y diámetro de la base de la planta. También, otras 14 variables que tienen que ver con fisiografía, suelo, clima y tipo de relieve fueron registradas. Posteriormente, un análisis de la comunidad vegetal de los sitios con índice de valor de importancia fue realizado; también, el valor de productividad fue determinado para generar tres tratamientos: valores de productividad alta, media y baja. Finalmente, un análisis de varianza y un análisis de discriminante canónico se hicieron para estimar diferencias entre tratamientos de productividad al considerar las variables medidas. La candelilla se desarrolla mejor en la comunidad vegetal de matorral desértico rosetófilo y micrófilo. El índice de valor de importancia ecológica mayor corresponde a la *Larrea tridentata* y en cuarto lugar a *Euphorbia antisiphilitica*. El análisis de discriminante canónico indicó que existe diferencia significativa ($P < 0.01$) entre las medias de productividad de los niveles productivos alto, medio y bajo. Las variables que más

influyen sobre una productividad alta de candelilla son textura gruesa del suelo, pendientes mayores a 17.37%, temperaturas menores a 4.87 °C en invierno, así como las precipitaciones mayores a 294.67 mm en verano.

Palabras clave: análisis canónico, conglomerado, comunidad vegetal

ECOLOGY AND INFLUENCE OF CLIMATE VARIABLES THAT CHARACTERIZE THE PRODUCTIVITY OF *Euphorbia antisiphilitica* ZUCC IN NORTHERN MEXICO

ABSTRACT

Candelilla is a non-timber forest resource of great economic importance, which is part of the family livelihood of more than 3,500 family nuclei. Mexico is the only wax producer, but given its exploitation and the adverse characteristics of the climate, it is important to characterize the influence of soil and climatic variables that determine productivity of the plant. Then, 27 conglomerates distributed in the three states were sampled (6 conglomerates in the state of Durango, 8 in Chihuahua and 13 in Coahuila). Each conglomerate consisted of 16 circular sites with an area of 250 m² per circle, which was divided into four quadrants, then the fashion plant or the average of each species was chosen to measure the variables total height of the plant, diameters of the major and minor crown, and diameter of the base of the plant. Fourteen other variables related to physiography, soil, climate and type of relief were also measured. Subsequently, an analysis of the plant community of the sites with value index of importance was carried out and the value of productivity was determined to generate three treatments of productivity value: high, medium and low. Finally, an analysis of variance and a canonical discriminant analysis were performed to find differences between productivity levels and treatments. Candelilla thrives best in the desert scrub plant communities roseto-filo y micro-filo. The index of value of greater ecological importance was presented by *Larrea tridentata*, and in fourth place by the *Euphorbia antisiphilitica*. The canonical discriminant analysis indicated that there is a significant difference ($P < 0.01$ among means of high, medium and low

productive levels. The variables that most influence a high productivity of the candelilla are the coarse texture of the soil and slopes higher than 17.37%, temperatures lower than 4.87 ° C in winter, as well as precipitation higher than 294.67 mm in summer.

Key words: canonical analysis, cluster, plant community

INTRODUCCIÓN

La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) es una planta nativa de Norte América que se distribuye desde el Sur de los Estados Unidos hasta las regiones del Altiplano Mexicano (Scora et al., 1995). Esta especie es un recurso forestal no maderable de importancia socioeconómica de los ecosistemas áridos y semiáridos del Desierto Chihuahuense (SEMARNAT, 2008 y Martínez et al., 2015). Existen más de 3,500 núcleos familiares en 33 municipios del norte de México que dependen económicamente sea parcial o totalmente de la explotación de candelilla (Muñoz et al., 2016 y Rojas et al., 2011), sobresaliendo los estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Durango, Chihuahua y San Luis Potosí (Torres et al., 2015) como principales productores de cera.

México es el único país productor mundial de cera de *Euphorbia antisiphilitica* (Martínez y Mandujano, 2013; Muñoz et al., 2016), se estima que existe una superficie potencial de esta especie de 8,526, 336 hectáreas con potencial en el desierto Chihuahuense donde es posible encontrar candelilla (Martínez et al., 2015) para su aprovechamiento. La candelilla es una planta herbácea arbustiva que se caracteriza por tener fotosíntesis especializada y estar adaptada evolutivamente al déficit hídrico (Torres et al., 2018), las condiciones adversas de clima y otras los factores de suelo hacen que los tallos de la candelilla segreguen una cera de forma epicuticular, la cual proporciona una barrera contra la pérdida de agua (Scora et al., 1995). Esta cera es una sustancia natural que tiene como componentes principales hidrocarburos (Torres et al., 2015). Martínez y colaboradores (2015) comentan que esta planta se desarrolla mejor en suelos de tipo litosol, regosol y xerosol, con una textura media, con poca profundidad de

suelo, pero con buen drenaje. Se le puede apreciar en montañas con una exposición dominante de este a sur, y alturas menores a los 2,000 metros sobre el nivel del mar en climas muy áridos y áridos (Bw y Bs).

Estas condiciones de clima representan una gran proporción del desierto Chihuahuense que es el más grande del Continente Americano (Granados et al., 2011). La extracción de la cera en esta extensa región, se inició desde la época de la colonia (Martinez y Mandujano, 2013), llegando a ser una de las actividades más importantes de subsistencia.

Dada su intensa explotación se han incrementado las áreas degradadas de las comunidades vegetales de candelilla, provocando así la colonización y dominancia de especies asociadas como *Agave lechuguilla*, *Larrea tridentata*, *Opuntia* sp. (Zamora et al., 2013), y como consecuencia los candelilleros tienen que desplazarse cada vez más a distancias mayores (Villa et al., 2010) donde se encuentren las plantas en mayor abundancia (Ochoa et al., 2010). En conjunto estas especies proveen al entorno natural servicios ecológicos que resulta en una relación simbiótica (Limonés et al., 2015) con otros organismos o especies vegetales y por tanto la conservación y el buen manejo de las poblaciones silvestres de la candelilla es primordial ante el aprovechamiento intensivo del que es objeto (Zamora et al., 2013).

El estudio de las variables de suelo y las variables climáticas, permite de determinar la influencia de factores sobre productividad de la planta de candelilla en norte de México. El objetivo de este trabajo fue identificar las principales variables físicas de suelo clima y relieve que influyen sobre la productividad de la especie. Los resultados son de importancia para la conservación y buen manejo de la candelilla en el norte de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la parte central del Desierto Chihuahuense de (Figura 1.1) México en los años 2011-2013 a través del proyecto “Patrones de distribución e indicadores de productividad para el aprovechamiento y conservación de especies forestales de zonas áridas”, desarrollado por el INIFAP con financiamiento del Fondo sectorial CONACYT-CONAFOR No. 148094. Los datos se colectaron en comunidades vegetales arbustivas de matorral xerófilo (Rzedowski, 2006) en la zona de distribución natural de la especie la candelilla. La región se localiza en los estados de Coahuila, Durango y Chihuahua. El clima de esta región es seco con lluvias en verano, con una precipitación promedio de 250 mm y temperaturas extremas que van desde los -5° grados en invierno hasta los 40° C en verano (García, 2004).

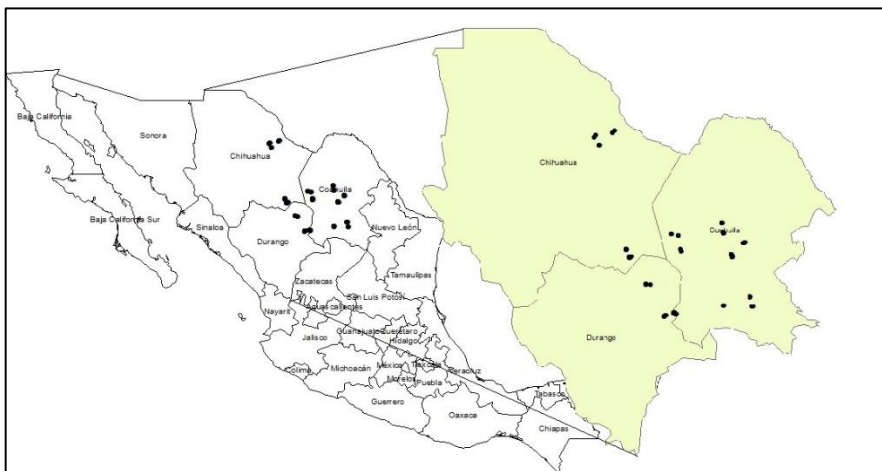


Figura 1.1 Sitios de muestreo

Se muestrearon 27 conglomerados distribuidos en los tres estados (6 conglomerados para el estado de Durango, 8 para Chihuahua y 13 en Coahuila). Cada conglomerado consta de 16 sitios circulares con un área de 250 m² por círculo. La disposición de sitio o círculo dentro del conglomerado consta de 4 círculos separados a una distancia de 100 metros entre ellos y una separación de 200 metros entre transecto, para así tener cuatro transectos con 4 círculos cada uno (Figura 1.2), para cubrir un área de aproximadamente de 20 hectáreas.

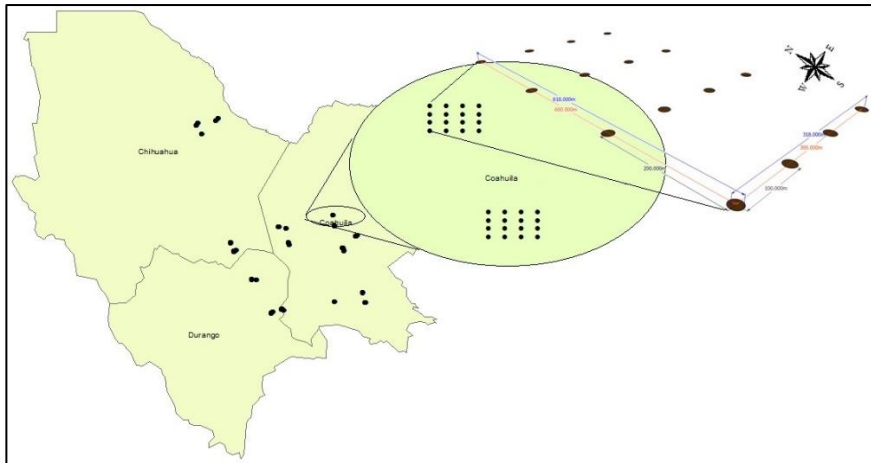


Figura 1.2 Diseño de un conglomerado en campo.

El sitio o círculo fue dividido en cuatro cuadrantes y enumerado de Norte a Este. En cada cuadrante se contó el número de individuos para cada especie arbustiva, posteriormente se eligió la planta moda de cada especie para medir las variables; altura total de la planta, diámetro de copa mayor y menor, y diámetro de la base de la planta. Adicionalmente, se colectó información de variables ecológicas (suelo, clima y relieve) para cada sitio. Para la variable Suelo se tomaron en cuenta las variables: profundidad de suelo, textura de suelo, % de suelo desnudo, % de hojarasca en un metro cuadrado de suelo, % de pedregosidad y cobertura basal en un metro cuadrado de suelo.

Análisis de la Comunidad

Valor de Importancia Ecológica

Se utilizó la ecuación Cottam y Curtis (1956), para estimar el índice de valor de importancia de donde se encuentra la candelilla. Dicho valor proporciona el peso ecológico de cada especie presente dentro la estructura de ecosistema o comunidad vegetal.

$$IVI = AR + FR + CR$$

IVI= Índice de valor de importancia

AR = Abundancia Relativa (Número de individuos promedio por sitio de la especie i / Suma de los promedios de individuos por sitio de todas las especies X 100).

FR = Frecuencia Relativa (Número de sitios con presencia de la especie i / Total de los sitios muestreados X 100).

CR = Cobertura Relativa (Cobertura de copa promedio (m^2) por sitio de la especie i / Suma de los promedios de cobertura de todas las especies X 100).

Valor de la Productividad

Los 27 conglomerados con sus sitios de muestreo fueron clasificados en tres niveles de productividad (alta, media y baja). Este valor de productividad fue asignado con base en el número de individuos (abundancia) y al porte (altura y diámetro de copa) de las plantas de la especie *Euphorbia antisiphilitica* para en cada sitio. Con estas dos variables se generó un valor de productividad con base en la siguiente formula:

$$VP = (VRA + VRH + VRC) / 3$$

Donde VP= Valor de productividad, VRA (Valor relativo de abundancia) = (Numero de candelillas en el sitio i / Sumatoria de plantas de candelilla de todos los sitios), VRH (Valor relativo de altura) = (Altura promedio de la planta de candelilla en el sitio i / Sumatoria de los promedios de altura de candelilla de todos los sitios), VRC (Valor relativo de cobertura) = (Cobertura de copa (m^2) de candelillas en el sitio i / Sumatoria de cobertura de copa de candelillas de todos los sitios).

El valor de VP fue ordenado de mayor a menor para generar tres grupos (o tratamientos) categorizando primero el tercio con mayor valor como el grupo de alta productividad, el tercio medio el grupo de media productividad y el tercio bajo el grupo de baja productividad.

Análisis de variables ecológicas

Con la finalidad de diferenciar las variables ecológicas (suelo, clima, topográficas) sobre cada nivel de productividad de la especie de *Euphorbia antisiphilitica*, se realizó un análisis de discriminante canónico (ADC). Esta técnica estadística de análisis multivariado permite encontrar la combinación lineal de las variables independientes que permiten discriminar mejor a los grupos definidos a priori (Hair et al., 2014). El ADC genera funciones lineales llamadas funciones discriminantes canónicas (FDC), las cuales no se encuentran correlacionadas y están formadas por combinaciones lineales de las variables originales que mejor separan los promedios de observaciones entre grupos en relación a la variación dentro de grupos. En este caso suponemos que existen tres grupos presumiblemente diferentes entre sí en una matriz de datos que corresponde a la productividad alta, media y bajas, y que las variables que se midieron fueron corresponden a: X_1, X_2, \dots, X_p (suelo, clima y relieve).

Si consideramos una sola combinación lineal de las variables originales, la función canónica será $FDC_1 = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_pX_p$, donde a_1, a_2, \dots, a_p son los coeficientes canónicos estandarizados o “pesos canónicos” y $X_1 + X_2 + \dots + X_p$, son las variables originales. El máximo número de FDC será igual al número de variables de respuesta o no menor al número de grupos involucrados. La primera FDC (FDC1) indicará la máxima variación posible entre grupos con respecto a la variación dentro de grupos, reflejándose en el mayor grado de diferencias entre grupos. Mientras que FDC2, reflejara las diferencias no explicadas por FDC1, y así sucesivamente.

Se consideró el método de la distancia cuadrada Mahalanobis y la prueba de Lambda Wilks como estadísticos de prueba para la toma de decisiones sobre las funciones de discriminante canónico (FDC) (Hair et al., 2014).

Una vez identificadas diferencias multivariadas entre niveles de productividad y posterior a una estandarización de la base de datos, se realizó un análisis de varianza (GLM) para identificar diferencias a nivel de variables individuales en los

diferentes niveles de productividad. Este análisis se realizó con especial atención en las variables que definieron las funciones de discriminante canónico (FDC). Finalmente, se realizó una comparación de medias usando el procedimiento de Tukey con un valor de significancia de 0.05 para identificar los valores medios y las diferencias mínimas significativas de las variables que presumiblemente tienen mayor influencia sobre la productividad (abundancia y tamaño) de las plantas de *Euphorbia antisyphilitica* en su área de distribución.

RESULTADOS

Respecto al análisis de la comunidad vegetal de los 27 conglomerados que cubren una superficie representativa del área de estudio. Se encontraron 8,970 individuos entre árboles, arbustos y herbáceas, de los cuales se identificaron 83 especies de 29 familias para los sitios de muestreo de la *Euphorbia antisyphilitica*. Las familias que tuvieron mayor diversidad de especies fueron: Cactaceae con 14 especies, Fabaceae con 13, Poaceae y Asteraceae con 10 especies cada uno y la familia Asparagaceae con 7 (Figura 1.3).

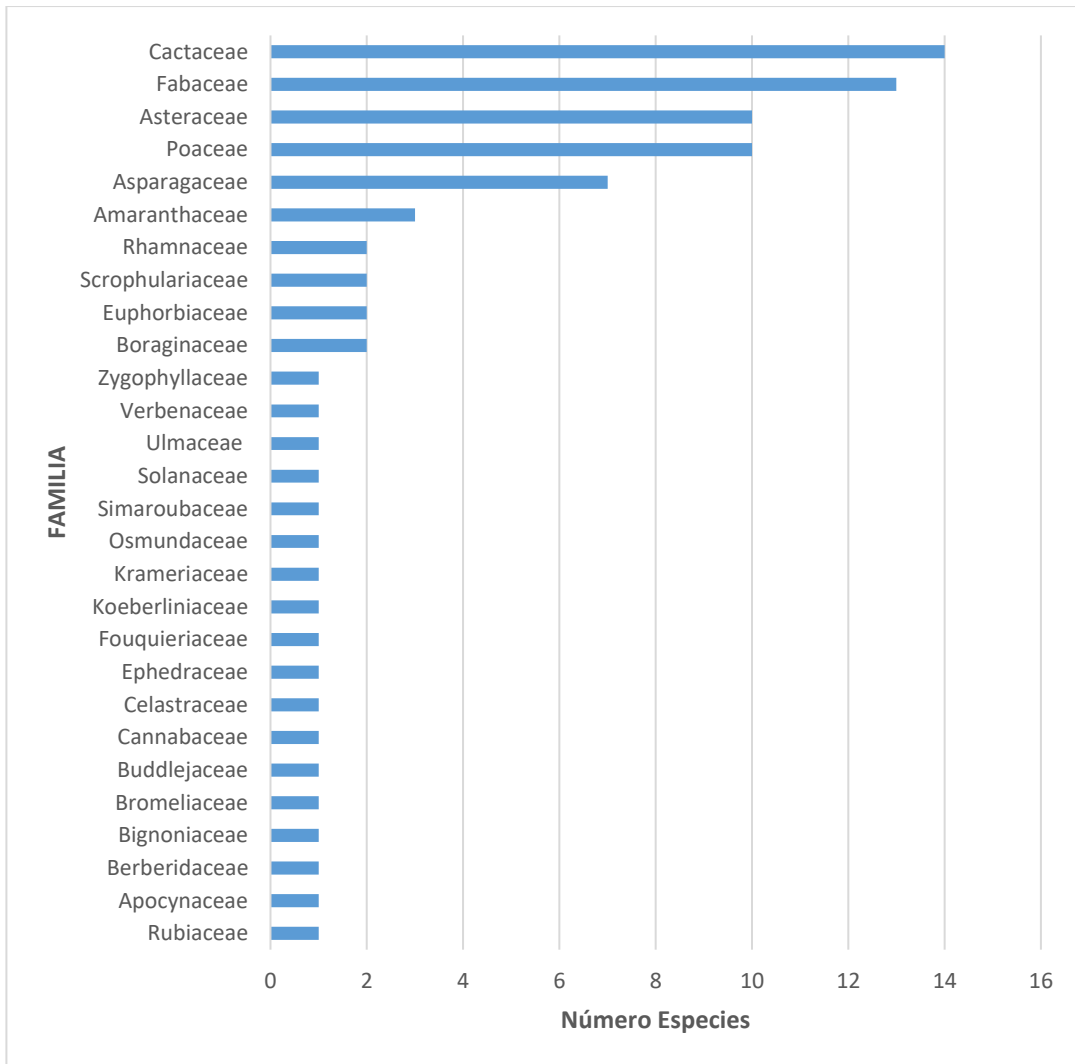


Figura 1.3 Composición florística de los sitios de muestreo de candelilla

El IVI (Cuadro 1.1) resultante para los 27 conglomerados, permitió identificar que las especies que mostraron mayor valor de importancia fueron *Larrea tridentata*, *Agave lechuguilla*, *Jatropha dioica*, *Euphorbia antisyphilitica*, y *Fouquieria splendens*. En conjunto estas 5 especies suman 30.58% de la estructura de la comunidad vegetal presente en la extensa zona de muestreo.

Cuadro 1.1 Índice de Valor de Importancia para sitios de muestreo

Especie	FR	AR	CR	IVI	IVI %
<i>Larrea tridentata</i>	9.766	13.545	2.424	25.736	8.579
<i>Agave lechuguilla</i>	7.721	11.070	2.165	20.957	6.986
<i>Jatropha dioica</i>	7.694	8.551	1.032	17.277	5.759
<i>Euphorbia antisyphilitica</i>	6.322	7.614	1.202	15.138	5.046
<i>Fouquieria splendens</i>	5.434	5.028	2.178	12.640	4.213
<i>Viguiera stenoloba</i>	3.955	4.404	1.305	9.663	3.221
<i>Opuntia rastrera</i>	4.843	3.835	0.905	9.583	3.194
<i>Acacia constricta</i>	2.556	2.430	3.089	8.075	2.692
<i>Opuntia imbricata</i>	3.874	3.311	0.507	7.692	2.564
<i>Coldenia canescens</i>	2.341	3.144	1.446	6.930	2.310
<i>Opuntia leptocaulis</i>	3.067	2.754	0.404	6.225	2.075
<i>Lippia berlandieri</i>	2.314	2.397	1.327	6.038	2.013
<i>Flourensia cernua</i>	1.910	1.851	1.787	5.547	1.849
<i>Echinocereus rigidissimus</i>	2.421	1.761	1.315	5.497	1.832
<i>Parthenium incanum</i>	1.991	1.929	1.493	5.412	1.804
<i>Prosopis glandulosa</i>	1.695	1.137	2.318	5.150	1.717
<i>Mortonia scabrella</i>	0.538	0.725	3.801	5.064	1.688
<i>Hilaria mutica</i>	0.081	0.100	4.574	4.755	1.585
<i>Tithonia tubaeformis</i>	0.054	0.067	4.525	4.646	1.549
<i>Castela tortuosa</i>	0.619	0.780	2.815	4.214	1.405
<i>Dasyllirion spp</i>	1.776	1.460	0.803	4.039	1.346
<i>Acacia rigidula</i>	1.291	0.992	1.629	3.913	1.304
<i>Mimosa biuncifera</i>	1.184	1.048	1.587	3.819	1.273
<i>Agave salmiana</i>	0.430	0.401	2.754	3.586	1.195
<i>Opuntia microdasys</i>	1.668	1.115	0.629	3.412	1.137
<i>Koeberlinia spinosa</i>	0.861	0.535	2.007	3.403	1.134
<i>Acacia vernicosa</i>	0.404	0.245	2.721	3.370	1.123
<i>Acacia neovernicosa</i>	0.834	0.870	1.351	3.055	1.018
<i>Bouteloua Gracilis</i>	0.592	0.870	1.580	3.042	1.014
<i>Lycium berlandieri</i>	1.264	1.003	0.753	3.021	1.007
<i>Ephedra trifurca</i>	1.264	1.126	0.524	2.915	0.972
<i>Echinocereus longisetus</i>	1.076	0.792	0.963	2.831	0.944
<i>Leucophyllum frutescens</i>	0.942	0.680	0.991	2.612	0.871
<i>Yucca carnerosana</i>	1.103	0.702	0.800	2.606	0.869
<i>Dalea spp</i>	1.022	0.992	0.570	2.585	0.862
<i>Randia thurberi</i>	0.188	0.134	2.242	2.564	0.855
<i>Yucca filifera</i>	0.565	0.346	1.623	2.533	0.844
<i>Buddleja marrubilifolia</i>	0.350	0.245	1.882	2.477	0.826
<i>Yucca elata</i>	0.861	0.825	0.775	2.461	0.820

Especie	FR	AR	CR	IVI	IVI %
<i>Acacia berlandieri</i>	0.242	0.190	2.010	2.441	0.814
<i>Hechtia glomerata</i>	0.323	0.268	1.828	2.418	0.806
<i>Senna pallida</i>	0.350	0.245	1.787	2.382	0.794
<i>Ziziphus spp</i>	0.296	0.234	1.841	2.371	0.790
<i>Rhus microphylla</i>	0.188	0.123	2.056	2.367	0.789
<i>Mamillaria spp</i>	1.399	0.836	0.127	2.362	0.787
<i>Bouteloua barbata</i>	0.350	0.290	1.720	2.359	0.786
<i>Celtis pallida</i>	0.457	0.301	1.558	2.316	0.772
<i>Echinocactus spp</i>	1.426	0.803	0.046	2.274	0.758
<i>Atriplex canescens</i>	0.699	0.502	1.070	2.271	0.757
<i>Condalia ericoides</i>	0.995	0.602	0.560	2.157	0.719
<i>Cordia parvifolia</i>	0.296	0.279	1.506	2.081	0.694
<i>Zinnia acerosa</i>	0.888	0.903	0.118	1.908	0.636
<i>Acacia greggii</i>	0.404	0.290	1.148	1.842	0.614
<i>Viguiera cordifolia</i>	0.161	0.167	1.331	1.660	0.553
<i>Chilopsis linearis</i>	0.161	0.190	1.199	1.550	0.517
<i>Berberis trifoliolata</i>	0.242	0.111	1.133	1.486	0.495
<i>Cenchrus ciliaris</i>	0.081	0.078	1.312	1.471	0.490
<i>Opuntia violacea</i>	0.726	0.468	0.199	1.394	0.465
<i>Amaranthus hybridus</i>	0.027	0.022	1.197	1.247	0.416
<i>Calliandra eriophylla</i>	0.054	0.045	1.139	1.238	0.413
<i>Barkleyanthus salicifolius</i>	0.027	0.011	1.191	1.229	0.410
<i>Krameria lanceolata</i>	0.511	0.312	0.368	1.191	0.397
<i>Cassia wislizeni</i>	0.323	0.190	0.628	1.140	0.380
<i>Pectis incisifolia</i>	0.027	0.011	1.075	1.113	0.371
<i>Parthenium argentatum</i>	0.430	0.290	0.387	1.107	0.369
<i>Ulmus spp</i>	0.215	0.156	0.697	1.068	0.356
<i>Thevetia peruviana</i>	0.054	0.033	0.816	0.903	0.301
<i>Ferocactus spp</i>	0.457	0.234	0.104	0.795	0.265
<i>Buddleja scordioides</i>	0.027	0.033	0.710	0.771	0.257
<i>Cymbopogon citratus</i>	0.135	0.167	0.382	0.683	0.228
<i>Bouteloua curtipendula</i>	0.108	0.067	0.483	0.657	0.219
<i>Alopecurus pratensis</i>	0.135	0.190	0.240	0.564	0.188
<i>Yucca thompsoniana</i>	0.081	0.045	0.370	0.496	0.165
<i>Cephalocereus senilis</i>	0.215	0.134	0.125	0.474	0.158
<i>Setaria adhaerens</i>	0.188	0.134	0.131	0.453	0.151
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	0.135	0.067	0.099	0.301	0.100
<i>Osmunda Spp</i>	0.027	0.022	0.150	0.199	0.066
<i>Coryphantha ramillosa</i>	0.027	0.011	0.142	0.180	0.060

<i>Especie</i>	<i>FR</i>	<i>AR</i>	<i>CR</i>	<i>IVI</i>	<i>IVI %</i>
<i>Lophophora williamsii</i>	0.108	0.067	0.004	0.179	0.060
<i>Taraxacum Spp</i>	0.054	0.033	0.043	0.130	0.043
<i>Cynodon dactylon</i>	0.027	0.011	0.068	0.106	0.035
<i>Bauhinia divaricata</i>	0.027	0.011	0.056	0.094	0.031
<i>Sorghum halepense</i>	0.027	0.011	0.049	0.088	0.029
TOTAL	100	100	100	300	100

FR=Frecuencia Relativa, AR=Abundancia Relativa, Cobertura Relativa, IVI=Índice de Valor de Importancia.

Las especies que presentan menor IVI indican un menor dominio florístico de la especie para la comunidad vegetal donde están presentes (Soler et al., 2012). Estas especies tienen menor probabilidad de presencia dentro del área de estudio. La gobernadora (*Larrea tridentata*), Ocotillo (*Fouquieria splendens*) y sangre de drago (*Jatropha dioica*) fueron dominantes en el área de estudio, y concuerdan en parte con los encontrados con Sosa et al., (2006) y Marroquín et al., (1981) donde las especies más distribuidas ampliamente en el desierto Chihuahuense fueron estas especies. En base a la caracterización de las asociaciones vegetales para el desierto chihuahuense realizada por Granados et al. (2011), la especie con mayor IVI pertenece a la comunidad arbustiva matorral desértico micrófilo (*Larrea tridentata*) y las 4 siguientes en términos descendentes de valor de importancia pertenecen al matorral desértico rosetófilo. Estas dos comunidades forman una estrecha asociación.

El valor de la productividad (VP) de la *Euphorbia antisyphilitica* nos permitió generar los tratamientos, para posteriormente realizar el análisis de discriminante canónico y la comparación de medias de las variables. Los valores de productividad fueron ordenados de menor a mayor y dividiéndolos en tres tercios, para obtener tres tratamientos.

EL valor de la productividad resultante en conjunto con las variables ecológicas (clima, suelo, relieve) derivadas del análisis multivariante de los datos aplicados al ADC, permitió observar un efecto altamente significativo (Cuadro 1.2) en los tratamientos o niveles de la productividad de la candelilla ($P < 0.01$). En otras

palabras, el VP demostró ser una herramienta para categorizar las el nivel de productividad de la candelilla para nuestra área de estudio.

Cuadro 1.2 Prueba de análisis multivariante para diferentes niveles de productividad

Estadístico	Valor	F-Valor	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.8366357	3.19	36	1230	<.0001
Pillai's Trace	0.16650288	3.11	36	1232	<.0001
Hotelling-Lawley Trace	0.19151194	3.27	36	1108.2	<.0001
Roy's Greatest Root	0.16936153	5.8	18	616	<.0001

La relación entre los niveles de productividad es altamente significativa considerando las dieciocho variables simultáneamente. La productividad de la especie estudiada necesita de dos dimensiones para ser representada. De estas dimensiones o también llamadas funciones de discriminantes canónicos, solamente la primera es significativa ($P < 0.01$); es decir, la dimensionalidad de la interacción es unidimensional y está representada por la proporción del autovalor de 0.1694 (Cuadro 1.3), indicando que la primera función canónica representa un 88.43% de la variación total en la interacción.

Cuadro 1.3 Dimensiones de las funciones de discriminantes canónicas para las variables de productividad

Can	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulada	Valor de F	Num DF	Den DF	Pr > F
1	0.1694	0.1472	0.8843	0.8843	3.19	36	1230	<.0001
2	0.0222		0.1157	1	0.8	17	616	0.6911

Los coeficientes de la estructura canónica (Can) o pesos discriminantes canónicos, para la productividad de *Euphorbia antisyphilitica* muestran la contribución de cada variable a la función discriminante canónica total, pudiendo observarse que Can 1 (Cuadro 1.4) está dominada por las variables con mayor peso discriminante como son la pendiente con un valor de 0.5131, textura con un valor de 0.5087, la precipitación en verano con un valor 0.4029 con valores positivos, y temperatura mínima invernal con un valor negativo de -0.5247. El

segundo (Can 2) está dominada claramente por las variables precipitación en verano y la exposición con valores de -0.4776 y 0.4077 respectivamente. Las 3 variables con mayor peso discriminante en Can 1 representan los factores ecológicos que determinan mayormente la productividad de la candelilla debido a que el Can 2 tiene un autovalor de 0.0222 que es no significativo, con un valor de P de 0.6911.

Cuadro 1.4 Estructura Canónica Total (Análisis de Discriminante Canónico)

Variable	Can 1	Can 2
Pendiente	0.513188	-0.032501
Textura	0.508775	-0.033665
Precipitación en verano	0.402977	-0.477629
Precipitación anual	0.257789	-0.29718
Pedregosidad	0.223042	0.129377
ASNM	0.159007	0.328021
Temperatura máxima en verano	0.133682	-0.133915
Exposición	0.047887	0.407749
Temperatura mínima en verano	0.010498	-0.201315
Hojarasca	-0.040264	-0.152425
Temperatura máxima anual	-0.091524	0.314543
Temperatura máxima invernal	-0.131061	0.177114
Precipitación Invernal	-0.203239	0.323476
Suelo desnudo	-0.233136	-0.007047
Temperatura mínima anual	-0.271447	0.243887
Profundidad de suelo	-0.284963	-0.366205
Cobertura basal	-0.301427	-0.254931
Temperatura mínima Invernal	-0.524758	0.293858

El análisis de discriminante canónico también nos indica una diferencia significativa ($P < 0.01$) entre las medias de productividad revelando que las calidades de los niveles productivos alto, medio y bajo son multivariadamente distintas (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5 Estadísticos de la prueba multivariada para la primera función canónica.

ESTADISTICOS	MEDIAS DE PRODUCTIVIDAD
--------------	-------------------------

CME	F_Val	Pr > F	DMS	BAJA	MEDIA	ALTA
1	44.83	0.0001	0.2284	-0.4939c	-0.02825b	0.5075a

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey \leq 0.05).

El análisis de la varianza y la comparación de medias de las variables para los niveles de productividad mostraron una diferencia significativa (Tukey \leq 0.05) muy evidente para 8 de las 18 variables (Cuadro 1.6). Las variables que expresaron mayores diferencias en lo que respecta a las propiedades físicas del suelo y el relieve fueron textura, pendiente, profundidad de suelo y cobertura basal. Así las variables climáticas con mayor diferencia resultaron ser temperatura mínima invernal, temperatura mínima anual, precipitación media en verano, y precipitación media anual.

Cuadro 1.6 Análisis de varianza y medias por nivel de productividad

VARIABLE	CME	F-Valor	Pr > F	DMS	Baja	Media	Alta
ASNM (m)	40069.930	1.91	0.1496	45.716	1168.82a	1203.71a	1199.53a
Profsuel (cm)	84.277	4.70	0.0094	2.097	21.63a	19.41b	19.13b
Textura (Fina, Media, Gruesa)	0.278	12.32	0.0001	0.120	Media (b)	Media (b)	Gruesa (a)
Sueldes (%)	675.634	2.51	0.0823	5.936	27.11a	24.43a	21.47a
Hojarasca (%)	89.101	0.23	0.7919	2.156	8.23a	7.61a	7.86a
Pedregosidad (%)	920.113	2.41	0.0907	6.928	52.46a	56.65a	58.81a
Cobbas (%)	144.126	4.67	0.0097	2.742	15.11a	12.56ab	11.69b
Tminver (°C)	7.817	0.28	0.7537	0.639	13.87a	13.70a	13.88a
Tmininv (°C)	5.026	13.77	0.0001	0.512	5.98a	5.67a	4.87b
Tminanual (°C)	32.506	3.83	0.0223	1.302	12.70a	12.48ab	11.28b
Tmaxver (°C)	8.496	0.94	0.3898	0.666	30.90a	30.94a	31.25a
Tmaxinv (°C)	6.108	1.00	0.3669	0.564	23.21a	23.20a	22.91a
Tmaxanual (°C)	5498.295	1.06	0.3455	16.935	52.83a	48.26a	42.37a
PPver (mm)	7166.247	9.26	0.0001	19.333	263.33b	265.07b	294.67a
PPinv (mm)	7024.999	2.63	0.0730	19.142	138.03a	136.66a	121.29a
PPanual (mm)	15986.590	3.69	0.0255	28.876	353.02b	355.01ba	382.73a
Exposicion (E,W,N,S, NE,SE,NW,SW)	6.259	1.25	0.2877	0.571	NE (a)	NE (a)	NE (a)
Pendiente (%)	188.294	12.54	0.0001	3.134	10.72b	13.67b	17.37a

Tminver=Temperatura mínima en verano, Tmaxver=Temperatura máxima en verano, Profsuel=Profundidad de suelo, Tmaxinv= Temperatura máxima invernal, Tmaxanual=Temperatura máxima anual, ASNM=Altura sobre el nivel medio del mar, Sueldes=Suelo desnudo, Cobbas=Cobertura basal, PPinv=Precipitación Invernal, Tminanual=Temperatura mínima anual, PPanual=Precipitación anual, Tmininv=Temperatura mínima Invernal, PPver=Precipitación en verano. Medias con la misma literal en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey \leq 0.05).

Para la variable textura como para la variable pendiente la media de productividad alta resulto ser mayor y tener una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) con los niveles de productividad baja y media. Sin embargo, no ocurrió lo mismo con la variable de cobertura basal donde solo existe una diferencia clara entre el nivel de productividad baja y alta. Con lo que respecta a media de la variable profundidad de suelo podemos observar que la productividad baja presentó mayor valor de profundidad que los otros dos niveles, indicando una mayor productividad en suelos menos profundos.

En cuanto a las medias para las variables climáticas se observa claramente que el valor de la temperatura mínima invernal fue mayor en la productividad baja y media que en el alta, mientras que contrariamente el comportamiento de la media de precipitación en verano para productividad alta y media resulto presentar un mayor valor que para la media y baja. En otras palabras, la mayor productividad se presentó cuando existe menor temperatura invernal y mayor precipitación en verano.

Con lo que respecta a las medias para las variables temperatura mínima anual y precipitación anual solo existe una diferencia notable en la productividad baja y alta, mas no así entre la productividad media que es estadísticamente es similar ambas.

DISCUSION

Aunque análisis de la comunidad vegetal pone de manifiesto a la familia de las cactáceas con un mayor número de taxones (14) por familia, el índice de valor de importancia ecológica, por el contrario, nos muestra que cinco especies (*Larrea tridentata*, *Agave lechuguilla*, *Jatropha dioica*, *Euphorbia antisyphilitica* y

Fouquieria splendens) que presentan mayor abundancia, frecuencia y cobertura relativa, no suelen estar dentro de esta familia. La especie con el mayor índice de valor de importancia es la gobernadora (*Larrea tridentata*) con 25.736, este resultado es similar a los reportados por Sosa et al. (2006), quienes reportan a la gobernadora como una especie dominante y de gran importancia en comunidades vegetales en la región árida del estado de Chihuahua. Por su parte la candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) tuvo un valor de importancia ecológica de 15.138 en los sitios muestreados en nuestro estudio, catalogándola entonces como una especie co-dominante en el matorral desértico micrófilo (Granados et al., 2011). Entonces podemos asumir que las familias con mayor importancia ecológica y no con mayor diversidad son (en orden de mayor a menor): Zygophyllaceae, Asparagaceae, Euphorbiaceae y Fouquieriaceae. Es importante resaltar que, tanto *Jatropha dioica* como *Euphorbia antisyphilitica* pertenecen a la familia Euphorbiaceae.

El área de estudio comprende parte de los estados de Durango Chihuahua y Coahuila, que a su vez están dentro de los 5 estados con la mayor cantidad de producción de cera de candelilla (Torres et al., 2015). En nuestro estudio corroboramos que la distribución de esta especie que se encuentra enclavada en el Desierto Chihuahuense y la comunidad vegetal a la que pertenece la candelilla es el matorral desértico rosetófilo (Granados et al., 2011) junto con lechuguilla, y también está asociada a la comunidad de matorral desértico micrófilo, principalmente a especies como la gobernadora y el ocotillo. En estudios efectuados por Bañuelos et al. (2019) en la parte norte del estado de Zacatecas también concuerdan en que esta especie tiene mayor presencia o afinidad en el matorral desértico rosetófilo.

La distribución de las especies, así como la relación de las comunidades vegetales dependen de las relaciones existentes entre características edáficas y climáticas (Sosa et al., 2006), la candelilla en cuanto a sus características de suelo, mostró una productividad media y alta cuando la profundidad de suelo fue menor a 19.41 cm y se presentó una productividad alta en lugares cuando el

suelo presento una textura gruesa(arenosa) y una pendiente mayor al 17.37 %. Estos resultados concuerdan con lo descritos por Zamora et al. (2009) donde hacen hincapié que esta especie se desarrolla mejor en laderas con buen drenaje y crece sobre suelos arenosos pobres, con profundidades menores a 25 cm (Zamora et al., 2013).

En cuanto a las características climáticas de la candelilla se hace mención a la fuerte relación de las condiciones climáticas que imperan Desierto Chihuahuense (García, 2004: Hernández et al., 2018), refiriéndose a la especie que prefiere Climas tipo Bw donde las precipitaciones van de 120 a 600mm como promedio anual, y la temperatura media anual es de 18 a 22 °C, tolerando temperaturas muy frías de hasta -14°C y llegando a soportar máximas de 47°C (Zamora et al., 2009). En nuestra área de estudio para los 27 conglomerados distribuidos en Durango, Chihuahua y Coahuila, encontramos que la especie tiene un alto índice de productividad cuando las temperaturas medias invernales están por debajo de 4.87 °C, así mismo si la temperatura media anual menores a 11.28 °C. Respecto a las precipitaciones o al régimen pluvial donde la candelilla mostro una alta productividad, fue cuando la media de los tratamientos o sitios supero 294.67 mm en la precipitación promedio en la estación de verano es decir en la época más lluviosa. Es importante destacar que los parámetros que se han asociado con la productividad son la abundancia y el tamaño de las plantas (variables de estructura). En este estudio no se analizó la producción de cera de candelilla como una variable productiva.

Las variables con mayor significancia obtenidas con el análisis de varianza fueron 8 (textura, pendiente, profundidad de suelo, cobertura basa, temperatura mínima invernal, temperatura mínima anual, precipitación media en verano y precipitación media anual), sin embargo, en nuestro estudio, el uso del análisis de discriminante canónico (ADC) fue con el propósito de identificar las variables (atributos) más sensibles (Silva et al., 2001) en la productividad de la candelilla que el análisis de varianza no logro identificar. El ADC permitió entonces un mejor entendimiento de las relaciones entre las variables (Medina et al., 2015),

identificando así solo 4 variables con mayor peso en las funciones discriminantes (Can1) en la productividad de la candelilla las cuales son: la pendiente, textura, la precipitación en verano, temperatura mínima invernal. Existen estudios como el de Silva et al. (2001) y Martínez et al. (2013), que concuerdan con la importancia el ADC como complemento para el análisis de varianza, en la selección de atributos o variables los grupos de los modelos o funciones.

CONCLUSIONES

La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) fue una especie co-dominante en las comunidades vegetales de matorral desértico rosetófilo y micrófilo. A esta especie corresponde el cuarto lugar según el índice de valor de importancia ecológica. Por otra parte, la gobernadora (*Larrea tridentata*) fue la especie más dominante, presentando el valor más alto importancia en los sitios muestreados. El análisis de discriminante canónico en conjunto con el análisis de varianza nos permitió identificar las variables que intervienen en la productividad alta de la candelilla.

Este potencial de productividad (abundancia y tamaño de las plantas) está fuertemente relacionado con la textura gruesa que presenta el suelo y con pendientes muy pronunciadas, en cuanto al clima podemos decir que las temperaturas menores en invierno, así como las mayores precipitaciones en verano, son factores que promueven de forma positiva la alta productividad de esta especie, y por tanto el aprovechamiento, la propagación y plan de manejo de la candelilla debe considerar estas variables para futuras investigaciones.

Agradecimientos: Se agradece al INIFAP, Campo Experimental La Campana por su apoyo a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 148094

LITERATURA CITADA

Bañuelos, R. J., Palacio. N.J., Juan Felipe Martínez, M.J, Olmos, O. G, y Jorge Alberto Flores, C.J. 2019. Distribución potencial y abundancia de candelilla

(*Euphorbia antisyphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. Madera y bosques; Vol 25, num. 1

Cabello, A.C., Sáenz, G.A., Barajas B.L., Pérez, B.C., Orta, C.A., Valdés G.J. 2013. Cera de Candelilla y sus aplicaciones. Avances en Química, 8 (2), 105-110.

Cottom, G. and Curtis, J.T. 1956. The Use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. Ecology: 37 (3). 451-460.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, Para adaptarlo a los climas de la República Mexicana. Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México. Series Libro Num.6. Cuarta edición. 90p.

Granados, S.D., Sánchez, G.A, Granados, V.R., Borja, R.A. 2011. Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente: Vol. 17, edición especial: 111-130.

Hair, F.J., Black, C.W., Babin, J.B., Anderson, E.R. 2014. Multivariate Data Analysis. Seventh Edition, Pearson New International Edition. 734 pp.

Hernández, C. F., López, P. H. y Rojas, R. 2018. Candelilla (*Euphorbia Antisyphilitica* Zucc): Geographical Distribution Climate And Edaphology. Food Process Engineering and Quality Assurance: (Chapter 16) 473-492

Limonés, R.D., Aguirre, Fonseca, E.J., Muro, G., Sánchez, J. 2015. Ejes: Aprovechamiento de los recursos maderables y no maderables de la zona semiárida de Durango. CIENCIA UANL / AÑO 18, No. 74: 73-77

Marroquín, S.J., Borja G.L., Velásquez, R.C. y de la Cruz, J.A. 1981. Estudio Ecológico Dasonómico de las Zonas Áridas del Norte de México. Publicación especial No. 2. 2a ed.

Martínez, B. A. and Mandujano, C. M. 2013. The Consequences of Harvesting on Regeneration of a Non-timber Wax Producing Species (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) of the Chihuahuan Desert. *Economic Botany* 67: 121–136

Martínez, S.M., Hermosillo R.D., Mojica G.A., Prieto A.J. 2015. Potencial productivo y zonificación para el uso y manejo de especies forestales de zonas áridas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Primera Edición. Pp. 119

Martínez, S. M., Valdez, C. R., y Pompa, G. M. 2013. Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera Bosques*, 19(3): 35-49.

Medina, J. L., Orellana, Y. G., Pino, M. M., & Diaz, L. (2014). Análisis discriminante canónico con técnicas gráficas multivariadas aplicado a un diseño con dos factores. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(2), 38-47. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.227>

Multiceras, 2019. <http://multiceras.com/candelilla-real/>. Fecha de consulta 10 de febrero del 2019

Muñoz C.R., López S.L., Covarrubias F.V., Villar E.L., Medina J. M., Barriada L.B. 2016. Effect of abiotic stress conditions on the wax production in Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) *Revista Latinoamericana de Química*. 44/1(2016).26-33.

https://www.researchgate.net/publication/311705358_Effect_of_abiotic_stress_conditions_on_the_wax_production_in_candelilla_Euphorbia_antisyphilitica_zucc

Ochoa, R.E., Saucedo, P.S., De la Garza, H., Martínez D.G., Raúl Rodríguez, R., y Aguilar, G.C. 2010. Extracción Tradicional de Cera de *Euphorbia antisyphilitica*. *Acta Química Mexicana*. Vol 2. Núm 3: 1-13.

Rojas, M.R., Saucedo, P.S., De León, Z.M., Jasso, C. D., y Aguilar, C.N. 2011. Pasado, presente y futuro de la candelilla. *Revista mexicana de ciencias forestales* 2, 7-18.

Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 pp.

Saucedo, P.S. and Martínez, A.G., 2018. National and International Candelilla Wax Market. *Food Process Engineering and Quality Assurance: (Chapter 22)* 561-582

Scora, G. A., Ahmed, M. and Scora., R. W. 1995. Epicuticular hydrocarbons of candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) from three different geographical areas. *Industrial Crops and Products*. 4: 179-184.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008. Manual que establece los criterios técnicos para el aprovechamiento sustentable de recursos forestales no maderables de clima árido y semiárido. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental, Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables. México. D.F. México. 107 p. http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/publicaciones/Publicaciones/Manual_Clima%20%C3%81rido.pdf. (14 de marzo de 2009).

Silva, A. P., Imhoff, S., Giarola, N. F. & CA Tormena, C. A. 2001. Análisis multivariado y univariado en la discriminación de sistemas de uso de suelos del Centro de Santa Fe. *Edafología* 8(1): 21-34.

Soler, E. P., Berroterán, L. J., Gil, L. J. y Acosta, A. R. 2012. Índice valor de importancia, diversidad y similaridad florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 62(1 - 4): 25-37. 2012

Sosa, M., Galarza, J. L., Lebgue, T., Soto, R. y Puga, S., 2006. Clasificación de las comunidades vegetales en la región del estado de Chihuahua México. *Ecología Aplicada*. 5: 53-59.

Torres, C.A., Garza, N.M., Ortiz, M.U., González, G.V., 2015. Candelilla del semidesierto mexicano como fuente de combustible. *Ingenierias* Vol. 18: No.9. 22-29. Enlace <http://ingenierias.uanl.mx/69/index.html>

Torres, C.A., Gutiérrez, D.A, De la Rosa, M.E., y Mora, O.A., 2018. Morphoanatomic, taxonomic, and physiological aspects of *Euphorbia Antisyphilitica* Zucc. *Food Process Engineering and Quality Assurance: (Chapter 17)* 493-503

Villa, S.A., 1981. Investigación sobre la candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) en el área del CIFNE. *Ciencia Forestal-Revista del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales*. Vol. 6, No. 32: 3-18

Zamora, M.M., Méndez, E.C., Pérez, M.R., Cortés, B.E., 2013. *Euphorbia antisyphilitica* Zucc.: recurso forestal no maderable de alto valor económico. Folleto Técnico Número 12. CENID-COMEF, INIFAP. México, D.F. México. 64 p.

Zamora, M.M., Velasco, B.E., Cano, P.A., Arellanos R.A., 2009. Manual que establece los Criterios Técnicos para el Aprovechamiento Sustentable de Recursos Forestales no Maderables de Clima Árido y Semiárido. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: 51-56.

CAPÍTULO 2

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL Y FUTURA DE LA ARBUSTIVA XEROFÍTICA CANDELILLA (*Euphorbia antisiphilitica*) BAJO DOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

RESUMEN

La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) es una especie de arbustiva distribuida a lo largo del desierto de Chihuahuense del Norte de México y el Sur de los Estados Unidos de América. Tiene una importancia económica debido a la cera natural que produce. La intensa cosecha de candelilla parece reducir gradualmente las poblaciones naturales de esta especie. La esencia de esta investigación fue proyectar la distribución potencial de las poblaciones de candelilla bajo diferentes escenarios de cambio climático en su área de distribución natural en América del Norte. Creamos una base de datos espacial con puntos de presencia de candelilla, de acuerdo con el Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Realizando un análisis espacial para predecir la distribución potencial de las especies utilizando el software Maxent. Trece de las 19 variables de la base de datos Worldclim se usaron para dos escenarios de vías de concentración representativas (RCPs) (4.5 como conservador y 8.5 como extremo). Utilizamos proyecciones climáticas de tres modelos climáticos globales (GCMs) (el instituto Max-Planck, el laboratorio de dinámica de fluidos geofísicos y la oficina de Met Hadley), cada uno simulando los dos escenarios. Las áreas finales de distribución previstas se clasificaron en 5 categorías de idoneidad del hábitat de candelilla posibles en el sitio: Ninguna (<19%), Baja (20-38%), Media (39-57%), Alta (58-76%) y Muy alto (> 77%). Según el área bajo la curva (0.970), los modelos y escenarios utilizados mostraron un ajuste adecuado para proyectar la distribución actual y futura de candelilla. La variable que más contribuyó en los tres GCMs y los dos RCPs fue la temperatura media del trimestre más frío con una influencia del 45,7% (prueba de Jackknife). El área de distribución de la

candelilla para América del Norte se pronosticó como aproximadamente 19.1 millones de hectáreas en las condiciones actuales para la alta idoneidad del hábitat; sin embargo, la proyección para los próximos cincuenta años no es prometedora porque los GCM proyectaron una reducción de más de 6.9 millones de hectáreas utilizando escenarios conservadores o extremos. Los resultados son útiles para la conservación de las especies en el área con poblaciones silvestres vulnerables, así como para la selección de nuevos sitios adecuados para el crecimiento y cultivo de especies mientras se enfrenta al cambio climático.

Palabras clave: Distribución de especies, escenarios de cambio ambiental, análisis espacial de Candelilla

CURRENT AND FUTURE POTENTIAL DISTRIBUTION OF THE XEROPHYTIC SHRUB CANDELILLA (*Euphorbia antisiphilitica*) UNDER TWO CLIMATE CHANGE SCENARIOS

ABSTRACT

Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) is a shrub species distributed along the Chihuahuan Desert in northern Mexico and southern of The United States of America. Candelilla has an economic importance due to natural wax it produces. The economic importance and the intense harvest of the wax from candelilla seems to gradually reduce the natural populations of this species. The essence of this research was to project the potential distribution of candelilla populations under different climate change scenarios in its natural distribution area in North America. We created a spatial database with points of candelilla presence, according to the Global Biodiversity Information Facility (GBIF). A spatial analysis to predict the potential distribution of the species using Maxent software was performed. Thirteen out of 19 variables from the Worldclim database were used for two scenarios of Representative Concentration Pathways (RCPs) (4.5 as a conservative and 8.5 as extreme). We used climate projections from three Global Climate Models (GCMs) (The Max-Planck institute, the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, and the Met Office Hadley), each simulating the two

scenarios. The final predicted distribution areas were classified in 5 on-site possible candelilla habitat suitability categories: None (< 19%), Low (20-38%), Medium (39-57%), High (58-76%), and Very High (> 77%). According to the area under the curve (0.970), the models and scenarios used showed an adequate fit to project the current and future distribution of candelilla. The variable that contributed the most in the three GCMs and the Two RCPs was the mean temperature of the coldest quarter with an influence of 45.7% (Jackknife test). The candelilla's distribution area for North America was predicted as approximately 19.1 million hectares under the current conditions for the high habitat suitability; however, the projection for the next fifty years is not promising because the GCMs projected a reduction of more than 6.9 million hectares using either the conservative or extreme scenarios. The results are useful for conservation of the species in the area with vulnerable wild populations, as well as for the selection of new sites suitable for the species growth and cultivation while facing climate change.

Keywords: Species distribution, Environmental change scenarios, Candelilla spatial analysis

INTRODUCCIÓN

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) es una planta arbustiva que se distribuye desde el Sur de los Estados Unidos hasta el centro México [1,2]. La familia vegetal a la que pertenece esta especie es la Euphorbiaceae, la cual está constituida por 317 géneros asociados a 49 tribus y 5 subfamilias [3]. El género *Euphorbia* comprende aproximadamente 2,000 especies, [4]. Es un arbusto perenne que crece en grupos de tallos que se reproducen principalmente por rizomas [5]. El crecimiento vegetativo de la candelilla ocurre principalmente en verano, la producción de semillas en otoño y la producción de cera en invierno [5,6]. Los resultados de estudios en la reproducción y cosecha de candelilla descubrieron que las plantas de alrededor de 30 cm de altura producen más tallos nuevos, mientras que en las plantas más altas el auto-sombreado aparentemente

afecta su capacidad fisiológica para producir nuevos brotes, por lo que recomiendan cosechar tallos largos y dejarlos más cortos en el campo para promueve la regeneración [5]. Por otro lado, la producción de semillas es más común en los tallos más grandes, es abundante y ocurre durante el otoño, al final de la temporada de lluvias [5,6]; sin embargo, la tasa de germinación es muy baja, probablemente debido a las condiciones adversas de los lugares donde crece la candelilla (pendientes de piedra caliza o asociadas con rocas ígneas, suelos poco profundos y desnudos, bajo contenido de materia orgánica, lluvia de menos de 250 mm y temperaturas extremas) [5,7,8]. Varios autores sugieren producir plantas en viveros y establecer plantaciones de candelilla para evitar la disminución de las poblaciones silvestres [2,5,9,10]). Mientras tanto, las políticas mexicanas actuales recomiendan solo cosechar plantas que midan al menos 30 cm de altura y 20 cm o más de diámetro, y dejar al menos el 20% de los tallos después del evento de cosecha [5,9,10].

E. antisiphilitica se caracteriza por producir una cera solida que alcanza su máxima viscosidad a 80 °C, es insoluble en agua, pero altamente soluble en acetona, cloroformo y algunos solventes orgánicos [11,12]. La cera de candelilla es considerada como un producto forestal no maderable, de alta importancia económica [13]. El aprovechamiento comercial de esta planta comenzó durante los primeros años del siglo veinte, y después de esto, tomó mucha importancia económica en el Desierto Chihuahuense [8]. El uso intensificado de esta planta durante la primera y la segunda guerra mundial fue para la fabricación de municiones y recubrimiento de carpas contra el agua [5]). Hoy en día, la cera de candelilla se utiliza en más de 20 industrias diferentes en todo el mundo [8]. Debido a estas características puede interaccionar con diferentes compuestos o materiales, ya sean de origen natural o sintéticos [11].

La cera de la candelilla se produce debido a la creación de metabolitos secundarios, como parte de un proceso evolutivo, conocido como un mecanismo adaptativo de déficit hídrico [14]Este mecanismo permite que esta especie sobreviva en las condiciones climáticas típicas del desierto de Chihuahuense,

donde el invierno es seco y frío, mientras que el verano es extremadamente caluroso [15]. El clima predominante en esta región es el tipo de desierto BS y BW, que es un clima con precipitaciones inferiores a 250 mm y temperaturas inferiores a 0 ° C como las más frías y superiores a 40 ° C como las más cálidas [16]. Para esta región, las asociaciones de arbustos crecen formando matorrales desérticos microfilo y rosetófilos, que prevalecen en áreas extensas de este desierto [9]. Se estima que existe un área potencial aproximada de 8,526,336 hectáreas, que representan la principal área de distribución de candelilla en el Norte de México [9, 17].

La importancia económica de cera natural de la candelilla y su recolección o extracción intensa han provocado que las poblaciones naturales se reduzcan gradualmente [7]. Además, las especies enfrentan una posible vulnerabilidad debido al cambio climático, en base a los escenarios definidos para el futuro cercano [9,18,19].

Los modelos de distribución de especies (SDMs por sus siglas en ingles) y los modelos de circulación global o general (GCMs) son metodologías ampliamente utilizadas en estudios ecológicos y geográficos de distribución y abundancia de especies actuales y futuras [20]. Los SDMs proporcionan predicciones detalladas de las distribuciones al relacionar la presencia o abundancia de las especies con predictores ambientales [21]. La precisión de los SDM se basa principalmente en la fiabilidad de las especies de presencia y la escala de los datos ambientales [22,23]. Mientras tanto, los Modelos de Circulación Global (GCMs) son métodos que permiten estimar cambios en la idoneidad del hábitat a lo largo del tiempo dado un escenario específico para el cambio ambiental [24].

Los GCM utilizan comúnmente los escenarios de concentración de gases de efecto invernadero llamadas Trayectorias de Concentración Representativas (por sus siglas en ingles RCPs) que sirven para pronosticar el posible cambio climático en el planeta [25]. Los RCPs incluyen emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y uso de la tierra / cobertura de la tierra

[25,26].El aumento promedio del calentamiento global y la precipitación durante los últimos 20 años del siglo XXI en relación con el período 1986-2005 es de + 1.1°C / + 2.1% para RCP2.6, + 2.4°C / + 4.0% para RCP4.5, + 2.5°C / + 3.3% para RCP6.0 y + 4.1°C / + 4.6% para RCP8.5, respectivamente [25].

Basado en el uso de GCMs y RCPs, es posible estimar los SDM de candelilla en América del Norte utilizando puntos de presencia de la especie. En este sentido, la Global Biodiversity Information Facility (GBIF) es una de las bases de datos que permite el acceso a un gran conjunto de especies en el planeta, sin embargo; de estos datos consisten en registros de presencia proporcionados por colecciones de museos o herbarios [27]. En este sentido, varios autores consideran que los métodos de recopilación de información de campo rara vez se conocen, por lo que las ausencias no pueden inferirse con certeza [28,29,30,23], sin embargo, existen algunos métodos que pueden ayudar a reducir el sesgo de datos que hacen ruido, como imágenes satelitales de alta resolución, el uso de información de otros miembros de la comunidad o la verificación de campo [31]. A pesar de este problema, el GBIF también incluye una gran cantidad de sitios que provienen de inventarios bien documentados y esquemas de monitoreo, como en el caso del inventario nacional de candelilla en México. Este inventario se realizó para el norte de México en 2016 [32]. Como resultado, se incluyeron a 348 sitios de presencia de candelilla en el GBIF. Además, el GBIF también incluye 248 sitios de observación de investigación de candelilla de 2016 a 2019 reportados para investigación científica [27]. Estos datos aumentan la certeza de la presencia de candelilla en América del Norte y proporcionan una base confiable para el desarrollo de modelos eco-geográficos de distribución de las especies para esta región.

Los modelos de distribución son conocidos de acuerdo a sus objetivos como modelos bioclimáticos, modelos de nicho ecológico o modelos de hábitat [33,34,35], los cuales se consideran como algoritmos matemáticos alimentados por variables ambientales que evalúan la distribución geográfica potencial de una especie [36]. Estos algoritmos se crean entre otros en función de los datos de

presencia o ausencia de hábitat y su relación con las condiciones actuales y las probabilidades futuras en el comportamiento de algunos factores, como las variables climáticas [36,37].

Existen muchos métodos que podrían usarse para modelar la distribución de especies, como los campos aleatorios de Markov, los modelos de mezcla o la regresión logística [38,39]. Uno de los métodos más utilizados y confiables es el enfoque de máxima entropía [21,40,41]. Los modelos generados por Maxent tienen una interpretación probabilística natural, que proporciona una gradación suave de la mayoría a las condiciones menos adecuadas, y puede interpretarse fácilmente [21,41].

La presente investigación tiene el objetivo principal de modelar la distribución potencial actual y futura de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc) en América del Norte, basada en dos RCPs y tres GCMs [42,43]. Estos SDM serían útiles para conservar poblaciones silvestres vulnerables o cultivar la especie en áreas con mayor adaptabilidad al cambio climático [33,35].

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende desde el centro de México hasta el sureste de los Estados Unidos de América, en la región conocida como el Desierto Chihuahuense (Figura 2.1).

Se descargaron un total de 406 registros de presencia de *E. antisyphilitica* del GBIF, 348 pertenecen a México y 58 corresponden a los Estados Unidos de América (Figura 2.1) [27]. Además, se usaron 27 sitios de verificación de campo, ubicados en los estados mexicanos de Durango, Chihuahua y Coahuila, para validar los puntos de ocurrencia del GBIF.

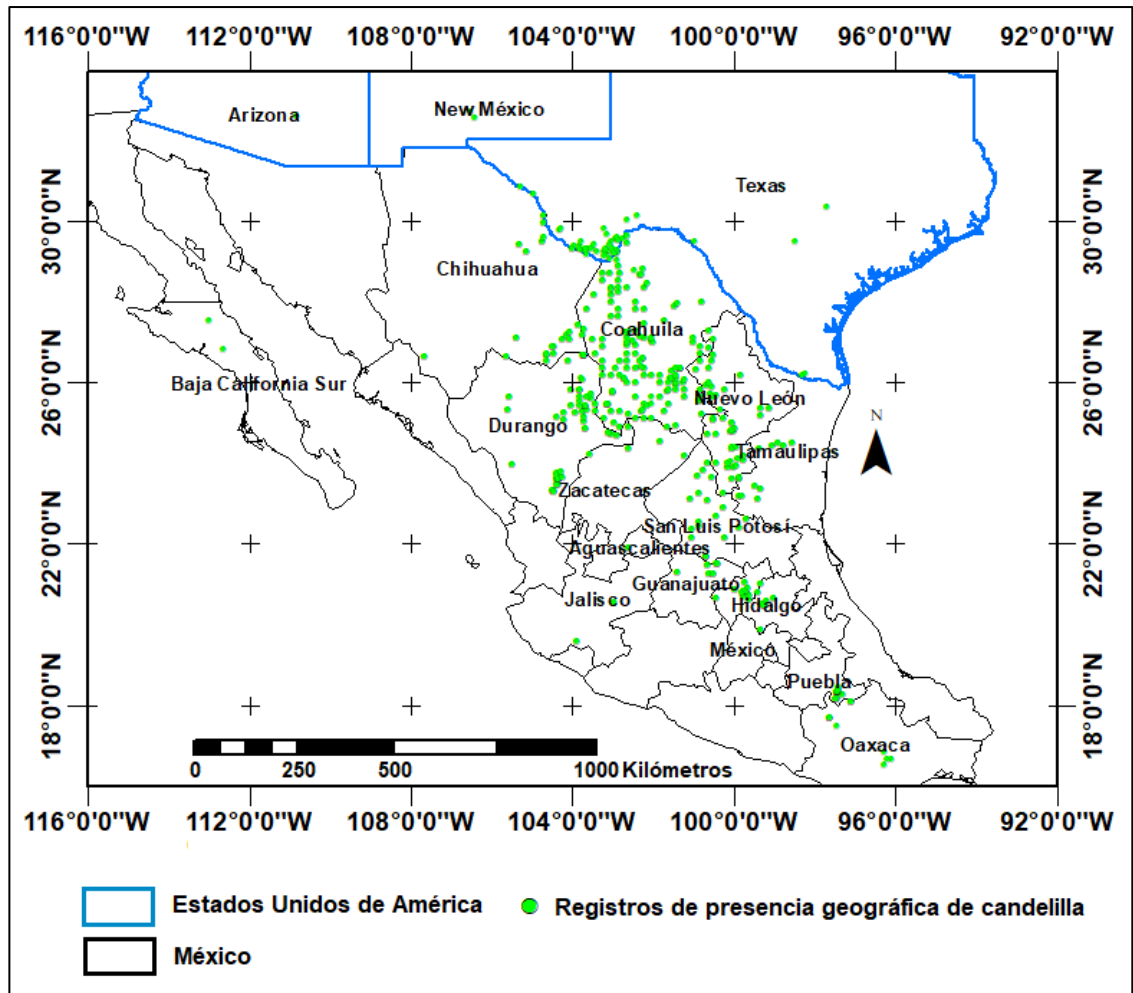


Figura 2.1 Sitios de presencia de candelilla en América del Norte, extraídos de GBIF.

Los puntos cercanos se eliminaron utilizando un búfer de 1,5 km para evitar el sesgo de distribución y los puntos superpuestos dentro de cada celda.

Para determinar la influencia de las variables ambientales en la distribución de *E. antispyhillitica*, incluimos en el modelo 19 variables bioclimáticas del período 1950–2000. Estas variables tenían una resolución espacial de 30 segundos (aproximadamente 1 km) y se descargaron del conjunto de datos de WorldClim [44].

Para reducir la multicolinealidad entre las 19 variables bioclimáticas, se eliminaron las variables altamente correlacionadas ($r \geq 0.85$ Correlación de Pearson). La reducción de las variables predictoras resultó en la inclusión de 13 variables (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Variables ambientales y porcentaje de contribución

Código	Variable ambiental	Unidad	Porcentaje de contribución
Bio1	Temperatura media anual	°C	
Bio2	Rango diurno medio (promedio mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	°C	1.9
Bio3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)		1.4
Bio4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar × 100)	C of V	1.0
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C	
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	°C	
Bio7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	°C	1.7
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	°C	
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco	°C	8.7
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C	
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío	°C	45.7
Bio12	Precipitación anual	mm	4.5
Bio13	Precipitación del mes más húmedo	mm	0.9
Bio14	Precipitación del mes más seco	mm	4.7
Bio15	Estacionalidad de precipitación (coeficiente de variación)	mm	13.3
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo	mm	3.0
Bio17	Precipitación del trimestre más seco	mm	
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	mm	1.5
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	mm	11.6

Los tres GCMs utilizados fueron el MPI-ESM-LR (Instituto Max-Planck) [45], el GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) [46] y el HADGEM2-ES (Met Office Hadley) [47]. También se incluyeron los datos climáticos futuros de dos RCPs para una proyección a mediano plazo (1945-1969) [41,48]. Estos fueron el RCP de 4.5 W / m² de bajas emisiones (CO₂) con una tendencia estable, y el RCP de 8.5 W / m² de altas emisiones (CO₂) con una tendencia creciente [49]. Los dos RCPs y los tres GCM fueron seleccionados en base a la experiencia en el uso de los modelos por el " Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales " durante la generación del Atlas Climático para México [50].

Se utilizó un modelo de entropía máxima (software Maxent-Versión 3.4.1) [51] porque ha demostrado que realiza bien los SDM, en relación con otros métodos de modelado [21, 40, 48]. Maxent también utiliza datos de solo presencia para predecir la distribución de una especie basada en la teoría de la máxima entropía [51]; además, Maxent tiene una interpretación probabilística natural, que proporciona una transición suave de la mayoría a las condiciones menos adecuadas, por lo que se puede interpretar fácilmente [39,52].

Para calibrar el modelo, se utilizó un algoritmo de remuestreo Bootstrap de Maxent [51]. Seleccionamos el 75% de los datos para correr los modelos y el 25% para las pruebas de modelos [53], manteniendo otros valores por defecto.

Se realizó un análisis de Jackknife para determinar las variables que reducen la confiabilidad del modelo cuando se omite alguna variable [54]. También utilizamos el área bajo la curva del operador receptor curva (ROC-AUC) para evaluar el rendimiento del modelo. El rango de ROC-AUC varían de 0 a 1, los valores cercanos a 1 indican un buen rendimiento del modelo y un valor de 0.50 indica que el modelo no funciona mejor que la azar o aleatoriedad [55,48]. Mientras tanto, un valor de 1.0 indica discriminación perfecta [55,56,48]. El modelo con el valor más alto de UAC se consideró el mejor para evaluar la distribución potencial de Candelilla [53].

El enfoque de jackknife excluye una variable a la vez cuando se ejecuta el modelo. Proporciona información sobre la importancia de cada variable para el modelo en términos de cuán efectiva es cada variable para explicar la distribución de especies y cuánta información única proporciona cada variable [57]; mientras tanto, el AUC es un enfoque clasificado para evaluar el ajuste del modelo que determina que la ubicación de idoneidad del hábitat se clasificará más alto que una ubicación de fondo aleatoria [51,57]. Estas ubicaciones de fondo al azar sirven como pseudo-ausencias para todos los análisis en Maxent [57].

Para mostrar el análisis final de reclasificación, los resultados (rango 0-1) se importaron a Arc GIS 10.3. Los seis modelos generados (tres GCMs y dos RCPs) se reclasificaron en las siguientes cinco clases de hábitats potenciales: ninguno de idoneidad del hábitat (0-0.19); bajo (0.2–0.38); medio (0.39-0.57); alto (0.58-0.76); muy alta idoneidad del hábitat (0.77–1.0) [58].

RESULTADOS

Predicción actual de presencia de la candelilla

El valor promedio de AUC (0.970) (\pm 0.001) indicó una alta discriminación para modelo de distribución actual de candelilla en América del Norte (Figura 2.2), desempeñándose mejor que un modelo aleatorio [26,21]. Las variables que mostraron la mayor contribución a los SDMs fueron la temperatura media del trimestre más frío (Bio 11) (45.7%), la estacionalidad de precipitación (coeficiente de variación) (Bio 15) (13.3%), la precipitación del trimestre más frío (Bio 19) (11,6%) y la temperatura media del trimestre más seco (8,7%) y la precipitación del mes más seco (4,7%). La contribución acumulativa de estas seis variables fue del 84%. Las 13 variables consideradas para el modelo integraron un valor acumulativo del 99% (Tabla 1). Estos resultados mostraron que las temperaturas y precipitaciones invernales también tienen una gran influencia en la distribución de la candelilla en la región de estudio.

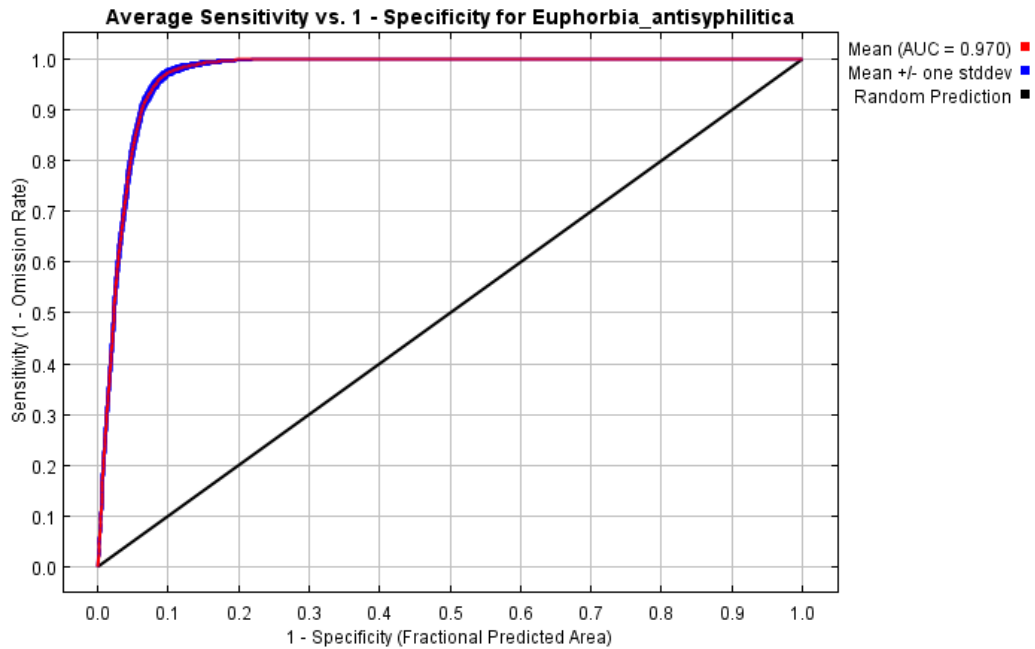


Figura 2.2 Valor de la media para área bajo curva (AUC) para 50 réplicas proyectadas a futuro medio (2050).

El análisis de Jackknife mostró que la temperatura media del trimestre más frío tiene la mayor importancia relativa como variable independiente sobre el modelo de distribución de candelilla. Además, indicó que las variables ambientales relacionadas con la temperatura (Isotermalidad=variable 03, Estacionalidad de la temperatura = variable 04) son importantes para el modelo de distribución de la candelilla (Figura 2.3).

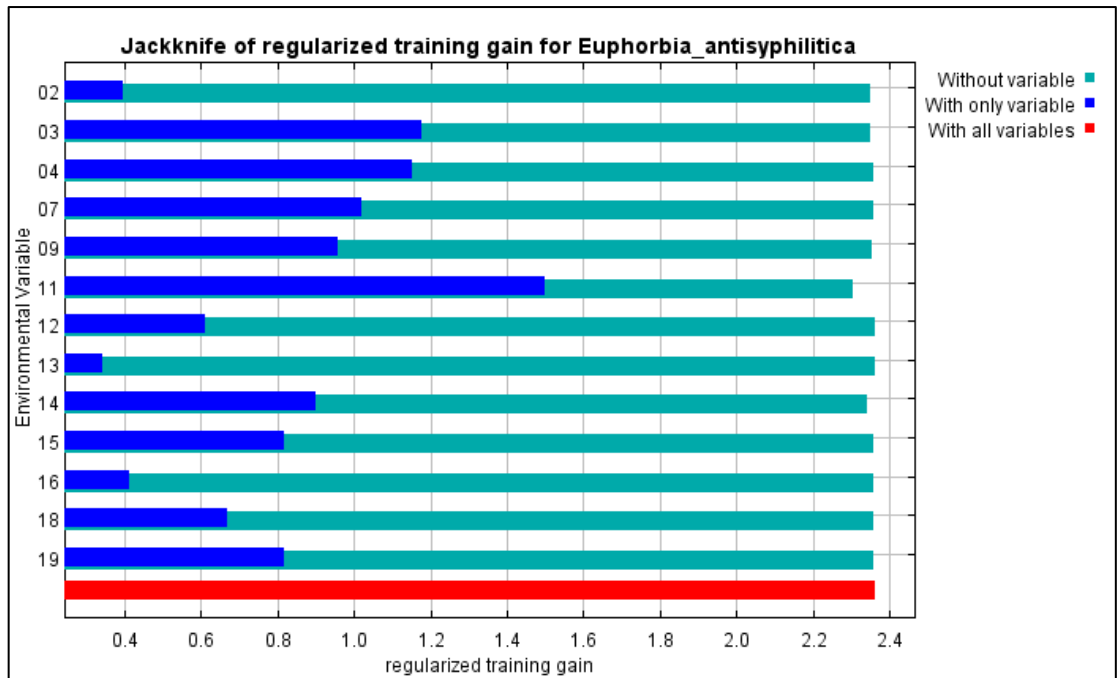


Figura 2.3 Prueba de regularizada de ganancia Jackknife para candelilla

El área estimada para las clases de idoneidad de hábitat medio y bajo predijo una gran área de distribución potencial de candelilla en América del Norte. Esta área incluía los estados de Tamaulipas, Jalisco, el Oeste de Zacatecas y el Oeste de Guanajuato en México, así como el sureste de Texas en los Estados Unidos. Actualmente no hay evidencia de presencia de candelilla en esta área [9,32,59,27]. Por lo tanto, la proyección actual de la distribución de candelilla parece coincidir mejor con la clase de alta idoneidad del hábitat (19,166,820 ha), que incluye los estados de Coahuila, Noreste de Durango, Pascua Zacatecas y San Luis Potosí en México, y una pequeña área en el Sur de Texas (Tabla 2 y Figura 2.4) [9,32].

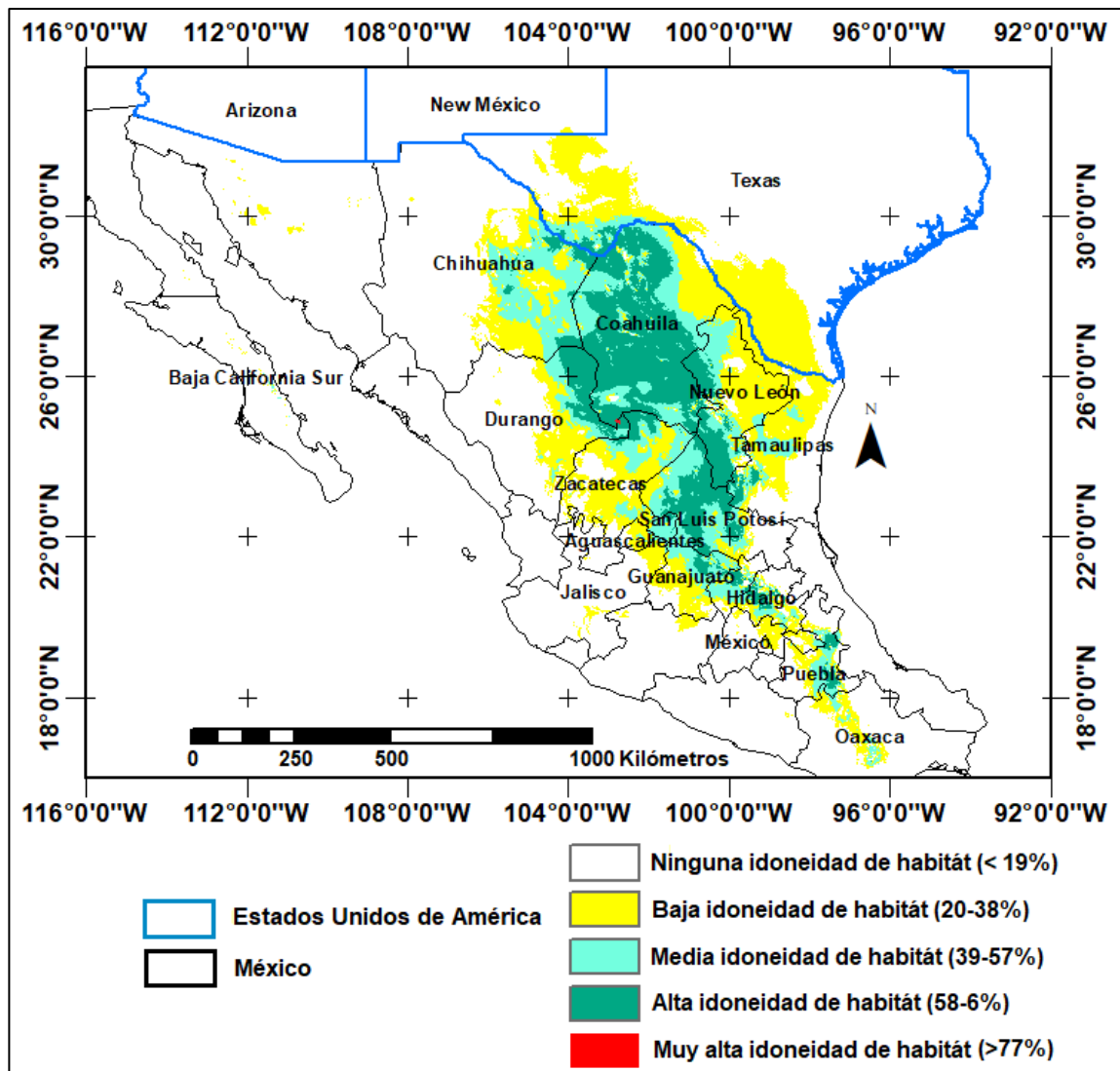


Figura 2.4 Idoneidad actual del hábitat de candelilla en México y Estados Unidos.

Futuros sitios potenciales para la distribución de Candelilla

Basado en la alta idoneidad del hábitat, los seis modelos mostraron que en el futuro (año 2069) los cambios ambientales generados por el aumento de la concentración de gases como el dióxido de carbono pueden causar una

reducción en la idoneidad del hábitat de la candelilla en América del Norte, en comparación a la idoneidad del hábitat en las condiciones actuales. Esto podría suceder incluso en el escenario más conservador RCP 4.5 (Tabla 2.2). Estos resultados sugieren que las poblaciones del sur de Candelilla reducirán su área de distribución en el futuro como consecuencia del cambio climático. Actualmente, los aspectos básicos de la especie son la falta de conocimiento, como la fisiología reproductiva, la adaptación al cultivo y la genética. Los estudios que brindan esta información deberían ser de gran utilidad para proporcionar un mejor manejo a la población de candelilla en el futuro cercano.

Tabla 2.2 Idoneidad del hábitat de la candelilla en México y Estados Unidos

Modelo	Idoneidad de hábitat				
	Ninguna (< 19%)	Baja (20-38%)	Media (39-57%)	Alta (58-76%)	Muy alta (>77%)
Condiciones actuales	258,239,854	35,762,240	20,472,214	19,166,820	430
GFDL-CM3 4.5	271,611,220	31,420,530	18,923,526	11,661,342	24,940
HADGEM2 4.5	249,190,934	46,029,350	23,239,178	15,173,496	8,600
MPI-ESM-LR 4.5	251,931,668	40,811,730	23,755,178	17,110,216	32,766
GFDL-CM3 8.5	279,306,328	27,304,398	16,429,784	10,545,664	55,384
HADGEM2 8.5	250,376,272	47,687,086	23,284,156	12,262,396	31,648
MPI-ESM-LR 8.5	264,142,894	33,837,818	25,283,742	10,375,556	1,548

Los seis modelos fueron consistentes en sus proyecciones. El modelo GFDL-CM3 predijo aumentos en el área de distribución para la clase ninguno y reducciones para las clases de idoneidad de hábitat baja, media y alta para los dos escenarios (Tabla 2). El modelo HADGEM2 predijo reducciones en el área de distribución de candelilla para las clases ninguna y alto, y también incrementos

en la distribución para las clases baja y media para los dos escenarios. Mientras tanto, el modelo MPI-ESM-LR proyectó reducciones en las clases ninguna y alta para los escenarios RCP4.5, y reducciones en las clases baja y alta para el escenario RCP8.5. La clase de idoneidad de hábitat muy alta parece subestimar el área de distribución de candelilla, según informes técnicos y científicos [32,9,59,8].

Según la proyección obtenida con los GCMs y el RCP 4.5, el aumento en el área causada por el cambio climático en el futuro (año 2069) para las clases ninguna, baja y media ocuparía tierras más allá de la porción Norte y Oeste de la actual distribución, principalmente en los estados de Chihuahua y Sonora en México, y Texas en los Estados Unidos. Este comportamiento podría estar relacionado con el calentamiento que probablemente ocurrirá en las latitudes más bajas como consecuencia del cambio climático. La distribución de candelilla parece ser mayor en áreas más frías (Figura 2.5). Para la clase de alta idoneidad del hábitat, los modelos GFDL-CM3, HADGEM2 y MPI-ESM-LR predijeron una reducción del porcentaje en 39.2, 20.8 y 10.7 en el área de distribución de la candelilla, respectivamente. Los estados donde las poblaciones de candelilla podrían verse negativamente afectadas son Coahuila y San Luis Potosí en México. Actualmente, la mayor cosecha de la especie se realiza en estos estados [8,9].

Según estos resultados, el efecto de los cambios climáticos durante los próximos cincuenta años podría generar una reducción significativa de las tierras donde actualmente se cosecha candelilla. En este sentido, el cambio climático también podría afectar el porcentaje de cera producida por la planta de candelilla como consecuencia de los cambios en las temperaturas invernales y las precipitaciones.

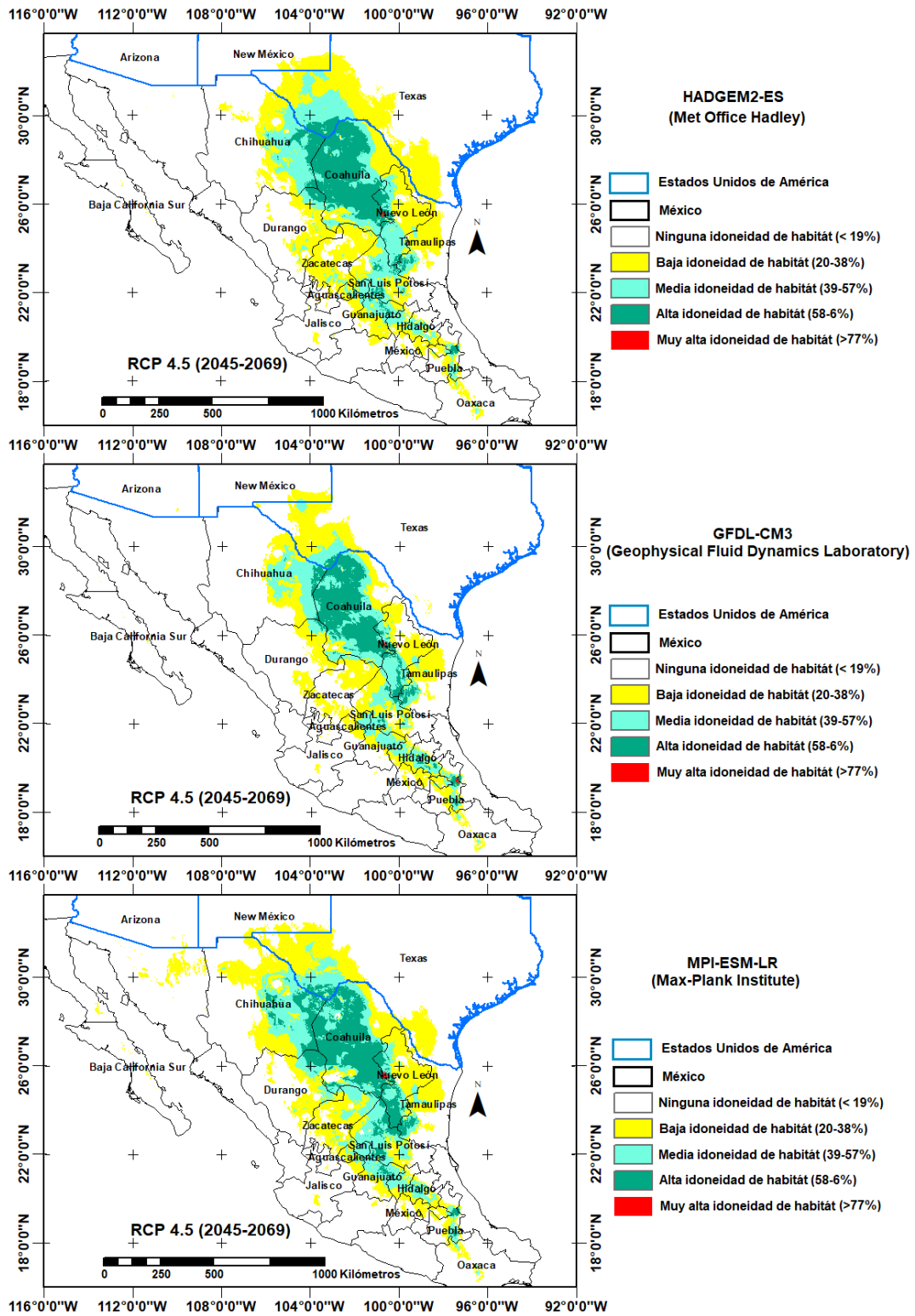


Figura 2.5 Áreas de distribución potencial de Candelilla con un RCP de 4.5, bajo tres GCM para México y USA.

Para el escenario RCP 8.5, el modelo HADGEM2 proyectó incrementos de hasta 33.3% en el área de distribución de candelilla para la clase baja y 13.7% para la clase media. Mientras tanto, el modelo MPI-ESM-LR predijo un incremento del 23.5% en el área para la clase media y del 2.3% para la clase ninguna. Con respecto al GFDL-CM3, proyectó una reducción del 23.7%, 19.7% y 45% para las clases baja, media y alta, respectivamente. Además, los tres modelos predijeron reducciones entre 36 y 45% en la clase alta. Los incrementos en el área de distribución de candelilla podrían ocurrir en el área Norte y Oeste, de acuerdo con la distribución actual de candelilla y el RCP4.5. Mientras tanto, los estados con reducciones en la distribución de candelilla, como resultado del cambio climático bajo el RCP 8.5, son Coahuila, San Luis Potosí y Zacatecas, México (Figura 2.6).

El escenario 8.5 muestra reducciones de hasta el 45% de las áreas de distribución de candelilla durante los próximos 50 años. Bajo este escenario, los cambios proyectados continuarán más allá de cincuenta años, lo que podría reducir drásticamente el área de distribución de la especie en los próximos 100 años o más. Los estudios genéticos y la adaptabilidad de la candelilla a escenarios extremos podrían generar la información necesaria para establecer estrategias de conservación de la especie ante posibles cambios ambientales a largo plazo.

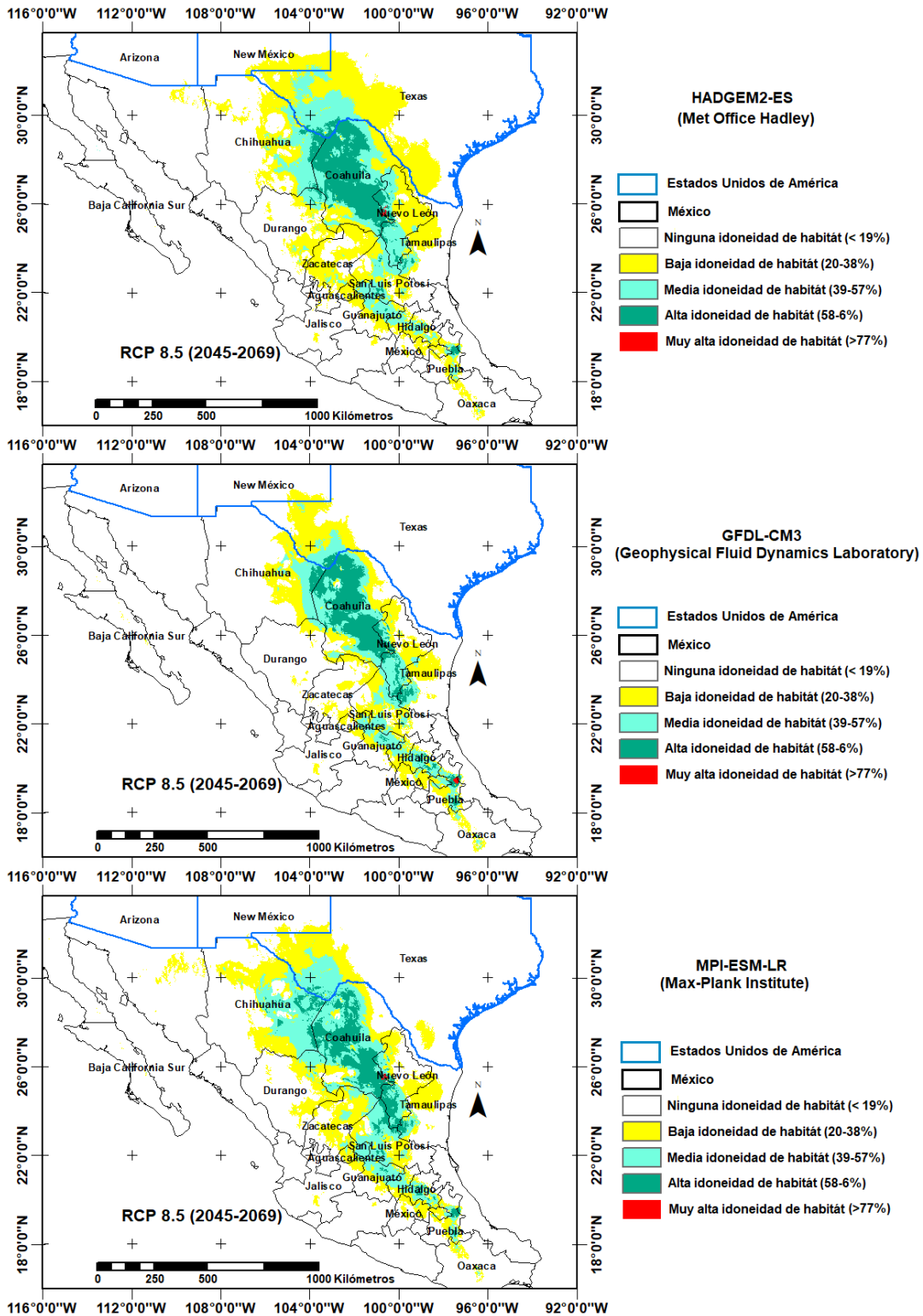


Figura 2.6 Áreas de distribución potencial de Candelilla con un RCP de 8.5, bajo tres GCM para México y USA.

Según las clases de idoneidad de hábitat baja y media, los dos escenarios proyectan un incremento en las áreas de distribución de la candelilla, incluidas las áreas sin condiciones actuales para su crecimiento [9]. Estas áreas están ubicadas en el sur de México e incluyen los estados de Veracruz, Oaxaca, Puebla y el Estado de México, donde la temperatura y la precipitación son más altas que las condiciones climáticas necesarias para la distribución natural de la candelilla [2,3,36,49] Por el contrario, la presencia candelilla fue reportada en la parte sur de México, en el Valle Tehucacán-Cuicatlán, que se encuentra en la región semiárida entre Puebla y Oaxaca, México [60].

DISCUSION

Los seis modelos de distribución potencial *E. antisiphilitica* en América del Norte mostraron un valor ROC-UAC muy preciso [22,48]. Para las condiciones actuales, *E. antisiphilitica* ocupa una gran área de distribución (191,616 km²) sobre las tierras áridas del Norte de México y una pequeña porción del Sur de Texas. Los tres GCMs proyectaron una reducción en el área de distribución para la alta idoneidad del hábitat como consecuencia del cambio climático durante los próximos cincuenta años (2069). Incluso el escenario más conservador de las emisiones de dióxido de carbono de un RCP 4.5 predijo un área de reducción que va del 10 al 39%; mientras tanto, el escenario extremo de RPC 8.5 proyectó un área de reducción del 36 al 45%, en comparación con la distribución actual. En los estados mexicanos de Coahuila, Chihuahua, Zacatecas y San Luis Potosí, la cosecha de candelilla para la extracción comercial de cera aumenta constantemente debido a la creciente demanda de cera orgánica [9,8,2]. A pesar de que el uso actual de candelilla no puede considerarse extremadamente amenazante para la especie, dada su vasta área de distribución, las reservas de planta silvestre local a regional se reducen o han desaparecido. Por lo tanto, la explotación de la especie sin un manejo controlado conduce a la disminución de las poblaciones [2,61].

Nuestros resultados permitirían establecer un mejor manejo de la candelilla, incluida la protección o el cultivo basado en la vulnerabilidad de las poblaciones silvestres o en la ubicación de áreas adecuadas para el crecimiento de la candelilla [8,9,62]. En este sentido, identificamos que trece variables ambientales influyen (99%) en la distribución actual y futura de candelilla en América del Norte. Cuatro de esas variables acumularon casi el 80% de la influencia en los MCG (Temperatura del trimestre más frío (Bio 11) (45.7%), Temporada de precipitación (Coeficiente de variación) (Bio 15) (13.3%), Precipitación del trimestre más frío (Bio 19) (11,6%), y el%), la temperatura media del trimestre más seco (Bio9) (8,7%)). Estas variables ambientales mostraron que la distribución de la candelilla se ve afectada principalmente por las bajas temperaturas y las estaciones secas. Según la literatura, esta especie crece en áreas de clima semidesértico y está altamente adaptada a las condiciones de sequía con regímenes de lluvia erráticos con una precipitación anual de 150–500 mm y temperaturas extremas de 44 °C y -2 °C [2, 8,62].

Los tres modelos fueron consistentes en sus proyecciones para los dos escenarios (RPC 4.5 y RPC 8.5). El modelo GFDL-CM3 predijo cambios más conservadores en comparación con los modelos HADGEM2 y MPI-ESM-LR. Ambos escenarios predijeron posibles incrementos en el área de distribución de la candelilla para las clases de idoneidad del hábitat bajo y medio, principalmente hacia el área Norte de la distribución actual [63,64, 65]. Los modelos también predijeron una reducción considerable en el área para la clase de alta idoneidad del hábitat durante los próximos cincuenta años. Las proyecciones de incrementos o reducción de las áreas de distribución de candelilla fueron mayores para los escenarios RPC 8.5 en comparación con los escenarios RPC 4.5. Por lo tanto, la candelilla puede ser sensible a los cambios de calentamiento generados como consecuencia de un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro [66]. Para conservar las poblaciones de candelilla, este comportamiento sugiere que las plantaciones de candelilla podrían establecerse en el área Norte de su distribución actual, principalmente en el Norte

de Coahuila y el Noroeste de Chihuahua en México [7,18,19,10]. En contraste, las poblaciones del Sur parecen ser más vulnerables como consecuencia del calentamiento global con la presencia de inviernos más cálidos durante los próximos cincuenta años.

CONCLUSIONES

Los seis modelos de distribución potenciales generados para candelilla (*E. antisiphilitica*) en América del Norte mostraron un valor ROC-UAC muy preciso. Los tres GCM utilizados en este estudio fueron consistentes en sus proyecciones para los dos escenarios evaluados (RPC4.5 y RPC8.5); sin embargo, el modelo GFDL-CM3 predijo cambios más conservadores en comparación con los modelos HADGEM2 y MPI-ESM-LR.

El área de distribución estimada de candelilla para Norteamérica es de aproximadamente 19.1 millones de hectáreas en las condiciones actuales; sin embargo, la proyección para los próximos cincuenta años (año 2069) no es prometedora porque podría haber una reducción de 4.5 millones de hectáreas considerando el escenario conservador (RCP 4.5) o un promedio de 8.1 millones de hectáreas en el caso del escenario extremo (RCP 8.5).

Las variables climáticas con mayor influencia en los modelos de distribución de candelilla fueron la temperatura del trimestre más frío, la estacionalidad de precipitación (coeficiente de variación), la precipitación del trimestre más frío, la temperatura media del trimestre más seco y la precipitación del mes más seco. Por lo tanto, la distribución de especies podría estar fuertemente condicionada por las bajas temperaturas y las precipitaciones que ocurren durante la temporada de invierno.

Las proyecciones de incrementos o reducciones en el área de distribución de candelilla fueron mayores para el escenario extremo (RPC 8.5) en comparación

con el conservador (RPC 4.5). Este comportamiento muestra que la candelilla es sensible al calentamiento; por lo tanto, las poblaciones del Sur podrían ser más vulnerables en comparación con las del Norte. En este sentido, se podrían establecer plantaciones de esta especie en el área norte de la distribución actual de candelilla, principalmente en el Norte de Coahuila y el Noroeste del estado de Chihuahua en México.

LITERATURA CITADA

1. Scora, G. A.; Ahmed, M.; Scora, R. W., Epicuticular hydrocarbons of candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) from three different geographical areas. *Industrial crops and products* 1995, 4 (3), 179-184.
2. Barsch, F., Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*): utilization in Mexico and international trade. *Medicinal Plant Conservation* 2004, 9 (10), 46-50.
3. Webster, G. L., Synopsis of the genera and suprageneric taxa of Euphorbiaceae. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 1994, 81, 33-144.
4. Horn, J. W.; van Ee, B. W.; Morawetz, J. J.; Riina, R.; Steinmann, V. W.; Berry, P. E.; Wurdack, K. J., Phylogenetics and the evolution of major structural characters in the giant genus *Euphorbia* L. (Euphorbiaceae). *Mol Phylogenet Evol* 2012, 63 (2), 305-26.
5. Martínez-Ballesté, A.; Mandujano, M. C., The consequences of harvesting on regeneration of a non-timber wax producing species (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) of the Chihuahuan Desert. *Economic Botany* 2013, 67 (2), 124-136.
6. Flores-del Ángel, M.; Foroughbakhch, R.; Rocha-Estrada, A.; Cárdenas-Ávila, M.; Guzmán-Lucio, M.; Hernández-Aguilar, Y.; Alvarado-Vázquez, M., Morfología, viabilidad y germinación de semillas de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.). *Phyton* 2013, 82 (2), 161-167.
7. Ochoa-Reyes, E.; Saucedo-Pompa, S.; De La Garza, H.; Martínez, D. G.; Rodríguez, R.; Aguilar-Gonzalez, C. N., Extracción tradicional de cera de

- Euphorbia antisyphilitica*. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila 2010, 2 (3), 1-13.
8. Rojas Molina, R.; Saucedo Pompa, S.; De León Zapata, M. A.; Jasso Cantú, D.; Aguilar, C. N., Pasado, presente y futuro de la candelilla. Revista mexicana de ciencias forestales 2011, 2 (6), 7-18.
 9. Martínez-Salvador, M.; Hermosillo-Rojas, D. E.; Mojica-Guerrero, A.; Prieto-Amparan, J. A., Potencial productivo y zonificación para el uso y manejo de especies forestales de zonas áridas. INIFAP: Chihuahua, Chihuahua, México, 2015; Vol. 1, p 119.
 10. Resendez, A. M.; Hernández-Herrera, J. A.; Valenzuela-Núñez, L. M.; Martínez-Salvador, M., Modelación de la presencia de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc mediante propiedades físicas y químicas del suelo. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 2019, 6 (18), 499-511.
 11. Alvarado, C. J. C.; Galindo, A. S.; Bermúdez, L. B.; Berumen, C. P.; Orta, C. Á.; Garza, J. A. V., Cera de Candelilla y sus aplicaciones. Avances en Química 2013, 8 (2), 105-110.
 12. Rojas-Molina, R.; De León-Zapata, M.; Saucedo-Pompa, S.; Aguilar-Gonzalez, M.; Aguilar, C., Chemical and structural characterization of Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.). Journal of Medicinal Plants Research 2013, 7 (12), 702-705.
 13. Tapia-Tapia, E. D. C.; Reyes-Chilpa, R., Productos forestales no maderables en México: aspectos económicos para el desarrollo sustentable Madera y bosques 2008, 14 (2), 95-112.
 14. Luna, E. V.; Barriada-Bernal, L. G.; Lopez-Diaz, S.; Villa, F. C.; Medrano, J. R. M., Effect of abiotic stress conditions on the wax production in candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* zucc.). Revista Latinoamericana de Química 2016, 44, 7.
 15. Villarreal-Quintanilla, J. A.; Bartolomé-Hernández, J. A.; Estrada-Castillón, E.; Ramírez-Rodríguez, H.; Martínez-Amador, S. J., El elemento endémico

de la flora vascular del Desierto Chihuahuense. *Acta botánica mexicana* 2017, (118), 65-96.

16. García, E., Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, Para adaptarlo a los climas de la República Mexicana. 4a ed.; UNAM: México D. F., 2004; p 90.
17. Granados-Sánchez, D.; Sánchez-González, A.; Victorino, R. L. G.; Rosa, A. B. D. L., Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 2011, 17 (1), 111-130.
18. Cortes, L.; Dominguez, I.; Lebgue, T.; Viramontes, O.; Melgoza, A.; Pinedo, C.; Camarillo, J., Variation in the distribution of four cacti species due to climate change in Chihuahua, Mexico. *Int J Environ Res Public Health* 2013, 11 (1), 390-402.
19. Maciel-Mata, C. A.; Manríquez-Morán, N.; Octavio-Aguilar, P.; Sánchez-Rojas, G., El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta universitaria* 2015, 25 (2), 3-19.
20. Grotch, S. L.; MacCracken, M. C., The use of general circulation models to predict regional climatic change. *Journal of Climate* 1991, 4 (3), 286-303.
21. Elith, J.; Graham, C. H.; Anderson, R. P.; Dudi'k, M.; Ferrier, S.; Antoine Guisan; Hijmans, R. J.; Huettmann, F.; Leathwick, J. R.; Lehmann, A.; Li, J.; Lohmann, L. G.; Loiselle, B. A.; Glenn Manion, C. M.; Nakamura, M.; Nakazawa, Y.; Overton, J. M.; Peterson, A. T.; Phillips, S. J.; Richardson, K.; Scachetti-Pereira, R.; Robert E. Schapire; Sobero'n, J.; Williams, S.; Wisz, M. S.; Zimmermann, N. E., Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 2006, 29, 129-151.
22. Seo, C.; Thorne, J. H.; Hannah, L.; Thuiller, W., Scale effects in species distribution models: implications for conservation planning under climate change. *Biology letters* 2009, 5 (1).

23. Hernandez, P. A.; Graham, C. H.; Master, L. L.; Albert, D. L., The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 2006, 29 (5), 773-785.
24. Warren, D. L.; Seifert, S. N., Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological applications* 2011, 21 (2), 335-342.
25. Baek, H.; Lee, J.; Lee, H.; Hyun, Y.; Cho, C.; Kwon, W.; Marzin, C.; Gan, S.; Kim, M.; Choi, D., Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 2013, 49 (-), 603–618.
26. Wei, B.; Wang, R.; Hou, K.; Wang, X.; Wu, W., Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China *Global ecology and conservation* 2018, 16, e00477.
27. GBIF.org, Occurrence download. <https://www.gbif.org> GBIF: Copenhagen, Denmark, 2019.
28. Huettmann, F., Databases and science-based management in the context of wildlife and habitat: toward a certified ISO standard for objective decision-making for the global community by using the internet. *The Journal of Wildlife Management* 2005, 69 (2), 466-472.
29. Hijmans, R.; Garrett, K.; Huaman, Z.; Zhang, D.; Schreuder, M.; Bonierbale, M., Assessing the geographic representativeness of genebank collections: the case of Bolivian wild potatoes. *Conservation Biology* 2000, 14 (6), 1755-1765.
30. Reese, G. C.; Wilson, K. R.; Hoeting, J. A.; Flather, C. H., Factors affecting species distribution predictions: a simulation modeling experiment. 2005, 15 (2), 554-564.
31. Elith, J.; H. Graham, C.; P. Anderson, R.; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.; J. Hijmans, R.; Huettmann, F.; R. Leathwick, J.; Lehmann, A., Novel

methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. 2005, 29 (2), 129-151.

32. INIFAP-CONABIO, Inventario Nacional de Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) Fase I Version 1.5. Occurrence dataset. In Inventario Nacional de Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) CONABIO, Ed. México D.F., 2018.
33. Elith, J.; Leathwick, J. R., Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. 2009, 40, 677–697.
34. Guisan, A.; Thuiller, W., Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters 2005, 10 (5), 993-1009.
35. Li, G. Q.; Liu, C. C.; Liu, Y. G.; Yang, J.; Zhang, X. S.; Guo, K., Advances in theoretical issues of species distribution models. Acta Ecologica Sinica 2013, 36 (16), 4827-4835.
36. Wang, R.; Li, Q.; He, S.; Liu, Y.; Wang, M.; Jiang, G., Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. PloS one 2018, 13 (2), e0192153.
37. Soberón, J.; Osorio-Olvera, L.; Peterson, T., Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. Revista mexicana de biodiversidad 2017, 88 (2), 437-441.
38. Gastón, A.; García-Viñas, J. I., Modelling species distributions with penalised logistic regressions: A comparison with maximum entropy models. 2011, 222 (13), 2037-2041.
39. Phillips, S. J.; Dudík, M.; Schapire, R. E. In A maximum entropy approach to species distribution modeling, Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning, 2004; p 83.

40. Elith, J.; Phillips, S. J.; Hastie, T.; Dudík, M.; Chee, Y. E.; Yates, C. J., A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions* 2011, 17 (1), 43-57.
41. Ortíz-Yusty, C.; Restrepo, A.; Páez, V. P., Distribución potencial de *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climático global. 2014, 13 (9), 471-481.
42. Martin, G.; Bellouin, N.; Collins, W.; Culverwell, I.; Halloran, P.; Hardiman, S.; Hinton, T.; Jones, C.; McDonald, R.; McLaren, A., The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.* 2011, 4), 723–757.
43. Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A., An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2012, 93 (4), 485-498.
44. Hijmans, R. J.; Cameron, S.; Parra, J.; Jones, P.; Jarvis, A.; Richardson, K., WorldClim-Global Climate Data. Free Climate Data for Ecological Modeling and GIS. www.worldclim.org, 2015; Vol. 2.0.
45. Giorgetta, M. A.; Jungclaus, J.; Reick, C. H.; Legutke, S.; Bader, J.; Böttinger, M.; Brovkin, V.; Crueger, T.; Esch, M.; Fieg, K., Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 2013, 5 (3), 572-597.
46. Griffies, S. M.; Winton, M.; Donner, L. J.; Horowitz, L. W.; Downes, S. M.; Farneti, R.; Gnanadesikan, A.; Hurlin, W. J.; Lee, H.-C.; Liang, Z., The GFDL CM3 coupled climate model: characteristics of the ocean and sea ice simulations. *Journal of Climate* 2011, 24 (13), 3520-3544.
47. Good, P.; Jones, C.; Lowe, J.; Betts, R.; Gedney, N., Comparing tropical forest projections from two generations of Hadley Centre Earth System models, HadGEM2-ES and HadCM3LC. *Journal of Climate* 2013, 26 (2), 495-511.

48. Qin, A.; Liu, B.; Guo, Q.; Bussmann, R. W.; Ma, F.; Jian, Z.; Xu, G.; Pei, S., Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation* 2017, 10, 139-146.
49. Cook, B. I.; Ault, T. R.; Smerdon, J. E., Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances* 2015, 1 (1), e1400082.
50. Fernández-Eguiarte, A.; Zavala-Hidalgo, J.; Romero-Centeno, R., Atlas climático digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM Centro de Ciencias de la Atmosfera: México D.F., 2010; Vol. 1, p 2.
51. Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Schapire, R. E., Maximum entropy modeling of species geographic distributions *Ecological modelling* 2006, 190 (3-4), 231-259.
52. Jaynes, E. T., Information theory and statistical mechanics. *Physical review* 1957, 106 (4), 620.
53. Phillips, S. J.; Dudík, M., Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 2008, 31 (2), 161-175.
54. Torres-Olave, M. E., Aproximación espacio-temporal de sus scrofa en Chihuahua, México. Instituto de Arquitectura Diseño y Arte 2018.
55. Fielding, A. H.; Bell, J. F., A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental conservation* 1997, 24 (1), 38-49.
56. Swets, J. A., Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 1988, 240 (4857), 1285-1293.
57. Baldwin, R. A., Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *J Entropy* 2009, 11 (4), 854-866.

58. Yang, X.-Q.; Kushwaha, S.; Saran, S.; Xu, J.; Roy, P., Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering* 2013, 51, 83-87.
59. SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Avisos de aprovechamiento de la Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. 1 ed.; SEMARNAT, Ed. SEMARNAT: México, D.F., 2018.
60. Giordani, L., The role of goats in germination and dispersal of *Mimosa Luisana Brandege* (Leguminosae-Mimosoideae) seeds in Tehuacan-Cuicatlan valley, Puebla State, Mexico. *Norwegian University of Life Science: Norway*, 2008; Vol. 1, p 24.
61. Saucedo-Pompa, S.; Rojas-Molina, R.; Aguilera-Carbó, A. F.; Saenz-Galindo, A.; De La Garza, H.; Jasso-Cantú, D.; Aguilar, C. N., Edible film based on candelilla wax to improve the shelf life and quality of avocado. *Food Research International* 2009, 42 (4), 511-515.
62. Bañuelos-Revilla, J. E.; Palacio-Núñez, J.; Martínez-Montoya, J. F.; Olmos-Oropeza, G.; Flores-Cano, J. A., Distribución potencial y abundancia de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. *Madera y bosques* 2019, 25 (1).
63. Quesada-Quirós, M.; Acosta-Vargas, L. G.; Arias-Aguilar, D.; Rodríguez-González, A., Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 2017, 14 (34), 1-12.
64. Varela, S.; Terribile, L. C.; De Oliveira, G.; Diniz-Filho, J. A. F.; González-Hernández, J.; Lima-Ribeiro, M. S., ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía. *Revista Ecosistemas* 2015, 24 (3), 88-92.
65. IPCC, Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de

Expertos sobre el Cambio Climático. 1a ed.; OMM PNUMA: Ginebra, Suiza, 2014; p 200.

66. Uribe Botero, E., El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. 1a ed.; United Nations CEPAL: Santiago de Chile, 2015; Vol. 1, p 84.