



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN

CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

**DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE TRES ESPECIES FORESTALES NO
MADERABLES EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO**

JOSÉ ENRIQUE BAÑUELOS REVILLA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ

OCTUBRE DE 2017

La presente tesis, titulada: **DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE TRES ESPECIES FORESTALES NO MADERABLES EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO**, realizada por el alumno **José Enrique Bañuelos Revilla**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. JUAN FELIPE MARTÍNEZ MONTOYA

DIRECTOR DE TESIS:



DR. JORGE PALACIO NÚÑEZ

ASESOR:



DR. GENARO OLMOS OROPEZA

ASESOR:



DR. JORGE ALBERTO FLORES CANO

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, 26 de octubre de 2017



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el (la) que suscribe José Enrique Bañuelos Revilla alumno(a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del(la) Profesor(a) Dr. Jorge Palacio Núñez, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE TRES ESPECIES FORESTALES NO MADERABLES EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO;** y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El (la) Consejero (a) o Director (a) de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, a 31 de octubre de 2017.

José Enrique Bañuelos Revilla

Firma

JORGE PALACIO NÚÑEZ

Vo. Bo. Profesor(a) Consejero(a) o Director(a) de Tesis

DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE TRES ESPECIES FORESTALES NO MADERABLES EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO

José Enrique Bañuelos Revilla, MC

Colegio de Postgraduados, 2017

México cuenta con ecosistemas que propician una de las floras más ricas y variadas del mundo, y que contienen importantes especies vegetales. Los productos y servicios derivados de estos son de gran importancia en las zonas áridas y semiáridas, donde destacan la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y el sotol (*Dasyllirion cedrosanum*). Las tres son importantes ecológica e industrialmente por sus usos, y son aprovechadas por habitantes rurales. Sin embargo, la recolecta no está debidamente controlada y no hay registros sobre la intensidad de uso ni de su disponibilidad. Dada la importancia social y económica, el objetivo del presente estudio fue estimar la distribución potencial y la abundancia de estas tres especies forestales no maderables en el norte de Zacatecas. El área de estudio se ubicó en los municipios de Concepción del Oro, El Salvador, Mazapil y Melchor Ocampo. Se realizó modelado de distribución potencial (DP) mediante el algoritmo MaxEnt, con 18 registros para candelilla, 36 para lechuguilla y 27 para sotol entre, históricos y recientes. Para los modelados se usaron 28 variables predictivas. Con base en el mapa obtenido, se obtuvo el área de DP de cada especie, en el que se seleccionaron 48 puntos de cotejo incluyendo sitios dentro del área de DP y fuera de ella. Donde se presentaron las especies, se trazaron parcelas para obtener densidad poblacional y la talla de las plantas. Los modelos presentaron muy buena predicción para las tres especies y la implicación de las variables del hábitat fue diferente para cada una de las especies, pero su distribución coincidió en la mayor extensión. Respecto a la zona de estudio, el área real de DP fue muy reducida en los tres casos, 19.2% para candelilla, 20% para lechuguilla y 19.4% para sotol, donde el área con probabilidad de DP alta fue menor al 1% para todas. Mediante el cotejo de presencia, se encontraron errores o sesgos en el modelado. En los tres casos, la densidad poblacional fue menor a lo reportado por otros autores, pero con tallas similares o mayores. Con base en mapas de distribución preexistentes de estas especies, se sobreestima su disponibilidad, por lo que se sugieren nuevos estudios mejor enfocados.

Palabras clave: densidad poblacional; disponibilidad; MaxEnt; recursos naturales; variables ambientales; zonas áridas y semiáridas.

Abstract

POTENTIAL DISTRIBUTION AND ABUNDANCE OF THREE NON-MADERABLE FOREST SPECIES IN NORTH OF ZACATECAS

José Enrique Bañuelos Revilla, MC

Colegio de Postgraduados, 2017

Mexico has ecosystems of temperate, tropical and arid environments, which favor one of the richest and most varied floras in the world, and which contain important plant species. The products and services derived from these are of great importance in the arid and semi-arid zones. They emphasize the candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*), the lechuguilla (*Agave lechuguilla*) and the sotol (*Dasyilirion cedrosanum*), able to develop in these environments of aridity; Are important from an ecological approach and have different uses in the industry. For these reasons, the inhabitants of these areas use them as a means of subsistence; however, the collection is not properly controlled and there are no records on the intensity of use or availability. Given the social and economic importance, the objective of the present study was to estimate the potential distribution and abundance of three non-timber forest species in northern Zacatecas. The study area was in the municipalities of Concepción del Oro, El Salvador, Mazapil and Melchor Ocampo. We used 18 records for candelilla, 36 for lechuguilla and 27 for sotol between historical and recent. For the modeling, 28 predictive variables were used: 19 bioclimatic, vegetation type, vegetation cover, exposure, slope, digital elevation model, population density, Physiographic Province and Physiographic Subprovinces and topographical index, at scale 1: 250 000. Generating matrices of Presence-absence that were analyzed by logistic regression. The potential distribution models were generated with the algorithm MaxEnt presented very good prediction for the three species. The distribution of the species coincided in the greater extent of the area, but the analysis regarding the habitat variables was not completely congruent with the potential distribution, however, the implication of the habitat variables was different for each of the species. In general, the response of each species to most of these habitat variables was not clear; floral populations were found to be abundant and representative within the study area.

KEYWORDS: population density; availability; MaxEnt; natural resources; environmental variables; arid and semi-arid zones.

¡No digas no puedo ni en broma, porque el inconsciente no tiene sentido del humor, lo tomará en serio, y te lo recordará cada vez que lo intentes!

Facundo Cabral

Agradecimientos

A mis padres, Genoveva Revilla Hernández y José Enrique Bañuelos Benites por todo el apoyo que me brindaron en esta etapa de mi vida.

A mis hermanas María Elena y Anayeli, porque siempre estuvieron animándome cuando sentía que ya no podía, cuando estaba en los suelos y me levantaron.

A mi hermano Carlos por todo el apoyo que me ha brindado, por ser una de mis grandes alegrías y por la ayuda que me brindó en campo.

A mi rey chiquito Santiago, porque siempre ha sabido cómo sacarme sonrisas, aun cuando no estaba de ánimos.

A Fabián Eduardo García Carvajal, por el apoyo brindado en campo y con su gran amistad sincera que siempre me ha proporcionado.

A Blas Emmanuel Esquivel Martínez por el apoyo dado en mi trabajo en campo, por esas buenas anécdotas que me sacaron muy buenas sonrisas.

A cada uno de los doctores que forman parte de mi consejo: el Dr. Juan Felipe Martínez Montoya, el Dr. Jorge Palacio Núñez, el Dr. Genero Olmos Oropeza y el Dr. Jorge Alberto Flores Cano, por su ayuda y apoyo que se me brindó en el transcurso de la maestría.

Al Colegio de Postgraduados campus San Luís Potosí por todo el apoyo que se me brindó para realizar mi investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca brindada para hacer posible dicha maestría.

Esta investigación fue financiada por:



Colegio de Postgraduados



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE CUADROS	XI
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
JUSTIFICACIÓN	2
HIPÓTESIS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	3
CANDELILLA (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>).....	4
LECHUGUILLA (<i>Agave lechuguilla</i>)	7
SOTOL (<i>Dasyilirion cedrosanum</i>).....	8
LITERATURA CITADA.....	10
CAPÍTULO I. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE CANDELILLA (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>) EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO.....	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.1.2 Objetivos particulares	16
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
1.2.1 Área de estudio	16
1.2.2 Distribución potencial.....	18
1.2.3 Abundancia de candelilla.....	18
1.2.4 Análisis estadísticos	19
1.3 RESULTADOS.....	20
1.4 DISCUSIÓN	28
1.5 CONCLUSIONES	31
1.6 LITERATURA CITADA.....	31
CAPÍTULO II. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE LECHUGUILLA (<i>Agave lechuguilla</i>) EN EL NORTE DE ZACATECAS.....	35
2.1 INTRODUCCIÓN	35
2.1.1 OBJETIVO GENERAL	37

2.1.2	Objetivos particulares	37
2.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
2.2.1	Área de estudio	37
2.2.2	Distribución potencial.....	38
2.2.3	Abundancia de lechuguilla.....	39
2.2.4	Análisis estadísticos.....	40
2.3	RESULTADOS.....	41
2.4	DISCUSIÓN	50
2.5	CONCLUSIONES	53
2.6	LITERATURA CITADA.....	53
 CAPÍTULO III. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE SOTOL (<i>Dasyllirion cedrosanum</i>) EN EL NORTE DE ZACATECAS.....		59
3.1	INTRODUCCIÓN	59
3.1.1	OBJETIVO GENERAL	60
3.1.2	Objetivos particulares	60
3.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	61
3.2.1	Área de estudio	61
3.2.2	Distribución potencial.....	62
3.2.3	Abundancia de sotol.....	63
3.2.4	Análisis estadístico.....	64
3.3	RESULTADOS.....	64
3.4	DISCUSIÓN	73
3.5	CONCLUSIONES	76
3.6	LITERATURA CITADA.....	77
 CONCLUSIONES GENERALES		81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Área de estudio con límites estatales y municipales, donde se muestran los registros de candelilla, tanto históricos como recientes.....	17
Figura 1.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de candelilla. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.....	21
Figura 2.1. Área de estudio con límites estatales y municipales, donde se muestran los registros de lechuguilla, tanto históricos como recientes	38
Figura 2.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de lechuguilla. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.....	42
Figura 3.1. Área de estudio con límites estatales y municipales donde se muestran los registros de sotol, tanto históricos como recientes.	62
Figura 3.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de sotol. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.....	66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial de candelilla en el norte de Zacatecas.	20
Cuadro 1.2. Ubicación geográfica de registros históricos y recientes. Se especifica el tipo (TR) y número de registro (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), la subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de vegetación (TV), tipo de suelo (TS), pendiente del terreno (Pend, en clases) y altitud (Alt, en msnm).....	23
Cuadro 1.3. Puntos de cotejo y muestreo para candelilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).....	25
Cuadro 1.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km ⁻²) de candelilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.	27
Cuadro 1.5. Talla media y desviación estándar de candelilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.	28
Cuadro 2.1. Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial de lechuguilla en el norte de Zacatecas.	41
Cuadro 2.2. Ubicación geográfica de registros históricos y recientes de lechuguilla. Se especifica el tipo de registro (TR) y número del mismo (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), la subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de vegetación, tipo de suelo (TS), pendiente (Pend, en grados), altitud (Alt, en msnm) y exposición (Exp).	44
Cuadro 2.3. Puntos de cotejo y muestreo para lechuguilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).....	47

Cuadro 2.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km ⁻²) de lechuguilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.	49
Cuadro 2.5. Talla media y desviación estándar de lechuguilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.	50
Cuadro 3.1. Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial del sotol en el norte de Zacatecas.	65
Cuadro 3.2. Ubicación geográfica de los registros históricos y recientes de sotol en el norte de Zacatecas. Se especifica el tipo (TR) y número de registro (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de suelo (TS), tipo de vegetación (TV), altitud (Alt, en msnm), pendiente (Pend, en grados) y exposición (Exp).....	67
Cuadro 3.3. Puntos de cotejo y muestreo para sotol en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).....	70
Cuadro 3.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km ⁻²) de sotol para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.	72
Cuadro 3.5. Talla media y desviación estándar del sotol para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.....	73

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las plantas han jugado un papel muy valioso en el aspecto individual y social desde la aparición del ser humano en la Tierra, y el conocimiento de la flora ha permitido al hombre mejorar sus condiciones de vida (Fernández-Nava *et al.*, 2001). Los recursos naturales son y han sido aprovechados, y esta tradición de uso y manejo por parte de la población rural juega un papel primordial en su existencia (Villarreal-Quintanilla y Estrada-Castillón, 2008). En la región árida de México, la agricultura con cultivos convencionales, con especies o variedades no autóctonas se dificulta por la limitación de agua, por lo que los habitantes rurales hacen uso y manejo de especies nativas de la zona (Martínez-Salvador, 2013). Una de las principales actividades en el árido mexicano es el aprovechamiento de los recursos forestales no maderables, los cuales juegan un papel importante como fuente de empleo; entre estos destaca el aprovechamiento de la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y el sotol (*Dasyliirion cedrosanum*) ya sea para autoconsumo o para comercialización de materia prima (Castillo-Quiroz *et al.*, 2005a; Aguirre, 1983) que por su importancia, su potencial industrial y su amplia área de distribución en el país, por generaciones han representado una alternativa de subsistencia imprescindible para numerosos habitantes rurales de las regiones áridas y semiáridas del país (Villarreal y Maití, 1989; Berlanga-Reyes-Agüero y Aguirre, 1999; Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Castillo-Quiroz *et al.*, 2005b). En diversas regiones del norte de México, la recolecta o aprovechamiento se realiza en las áreas con mayor densidad poblacional humana, o en las de mayor cercanía a los poblados. Actualmente dichas áreas se encuentran sobreexplotadas y el uso de estas especies no ha sido el adecuado (Martínez-Salvador, 2013). En el estado Zacatecas existen cuatro municipios que aprovechan estas especies (Concepción del Oro, El Salvador, Mazapil y Melchor Ocampo), en donde varias comunidades rurales utilizan estas plantas con diferentes usos (ADR-SEDENORTE-PESA –FAO, 2006).

La candelilla se usa para la extracción de cera, mientras que la lechuguilla para fibra. La explotación de estas dos especies ha dado origen a la región conocida como ixtlero-candelillera, por ser las especies más importantes generadoras de ingresos en esta región (Núñez-González, 2011). El sotol se utiliza sólo como alimento para el ganado, construcción de cercas y arreglos florales (Comunicación personal del Sr. Alfredo Cisneros). La cera de la candelilla se utiliza para la fabricación de distintos productos en la industria, con un valor de venta atractivo para sus

usuarios, por lo que representa una de las bases de las actividades económicas más importantes de las regiones rurales del semidesierto del norte de Zacatecas. La fibra proveniente de la lechuguilla se usa principalmente para la fabricación de cepillos, morrales, bolsos y sogas, entre otros; mientras que el sotol no genera productos comerciales (ni económicos) y sus usos son sólo como forraje. (ADR-SEDENORTE–PESA –FAO, 2006).

Dichas especies comparten un hábitat esencial muy parecido y, por sus características, y es posible generar modelados de su distribución potencial mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). En general, se cuenta con escasa o insuficiente información sobre los aspectos ecológicos de sus poblaciones y del medio físico donde se desarrollan, lo que ha generado la necesidad de implementar estrategias de conservación sustentable. Esto también ha sido un factor limitante en el diseño de tácticas que protejan a las poblaciones de estos recursos forestales no maderables, ante lo cual se hace evidente la necesidad de generar conocimiento sobre la distribución y la disponibilidad de estos recursos. Ante esta necesidad, el estudio se enfocó en determinar tanto la distribución potencial como la abundancia de estas tres especies forestales no maderables (candelilla, lechuguilla y sotol) en el norte de Zacatecas, y buscar la generación de propuestas de uso sustentable.

JUSTIFICACIÓN

Los recursos forestales no maderables en el norte de Zacatecas, particularmente la candelilla, la lechuguilla y el sotol, se están degradando por la sobreexplotación como consecuencia de la extracción incontrolada y de la destrucción del hábitat (Martínez-Salvador, 2013). La información documentada sobre el estado de conservación de los ecosistemas desérticos en el estado, así como la forma y presión de uso, son la mejor herramienta para proponer estrategias positivas con el ambiente, que garanticen su uso sostenible a largo plazo (Flores-Del Ángel, 2013; March, *et al.*, 2009). Por tal motivo, la finalidad del presente trabajo fue evaluar la distribución potencial y la abundancia de estas especies, enfatizando su importancia ecológica, o su importancia para los habitantes rurales de la región.

Hipótesis

La distribución y la abundancia actual de la candelilla, la lechuguilla y el sotol en el norte de Zacatecas están en función tanto de las condiciones de su entorno físico como del manejo por parte de los habitantes rurales y del cambio en el uso del suelo.

Objetivo general

Estimar la distribución potencial y la abundancia de tres especies forestales no maderables en el norte de Zacatecas.

Objetivos específicos

- Realizar modelos de distribución potencial de tres especies forestales no maderables en el norte de Zacatecas.
- Evaluar la abundancia de tres especies forestales no maderables en el norte de Zacatecas.
- Relacionar subprovincias fisiográficas, altitud, pendiente del terreno, tipo de vegetación, el tipo de suelo y la abundancia de tres especies forestales no maderables en el norte de Zacatecas.

REVISIÓN DE LITERATURA

El territorio mexicano es extenso, ocupa el décimo cuarto lugar en el mundo y el quinto en el hemisferio (Tamayo, 1990; Aguayo-Quezada, 2003). Por su ubicación geográfica y su topografía (Sánchez-Molina, 1969; Rzedowski, 1978; Tamayo, 1990), alberga una amplia gama de ecosistemas (Rzedowski, 1978; Tamayo, 1990; Balleza y Villaseñor, 2011). Los rasgos característicos más notables entre la vegetación de cada sitio son: el número de plantas leñosas y herbáceas, así como de afinidad tropical o templada, y elementos climáticos y de ubicación geográfica; conjunto de elementos que permiten caracterizar cada tipo de hábitat (Challenger, 1998). De esta manera, las zonas ecológicas en México son: tropical cálido-húmeda (10%), tropical cálido-subhúmeda (15%), templada húmeda (< de 1%), templada subhúmeda (14%),

árida y semiárida (43%) e inundable o de transición mar-tierra (17%) (Toledo y Ordóñez, 1993; Challenger, 1998; Toledo y Ordóñez, 2009). Entre esta diversidad se encuentran los desiertos integrados por matorrales, principalmente los denominados matorrales xerófilo y crasicale (Challenger, 1998). Siendo la zona desértica la mayor cobertura en el territorio.

En general, el desierto está definido como un ecosistema donde la precipitación pluvial es limitada, por lo general menor a 250 mm (Challenger, 1998; Gatica, 1999; Hernández y Godínez, 1994). Entre estos tipos de ecosistemas se encuentra el desierto Chihuahuense, que abarca una región desde el sur de Texas, y de Nuevo México en EE. UU., hasta los estados de Zacatecas y San Luis Potosí (Wiken *et al.*, 2011). Corresponde a una región que, pese a sus condiciones de escasa precipitación, es rica en biodiversidad (Gatica, 1999) y es el hábitat de mayor diversidad de cactáceas del mundo, incluyendo numerosos endemismos (Hernández y Godínez, 1994). En esta zona existen numerosas plantas de interés humano para fines alimenticios, medicinales, para la construcción, combustible, ornamental y para la práctica de rituales, entre otros (De la Garza, 1985; Kobelkowsky-Sosa *et al.*, 2001; Mondragón-Jacobo *et al.*, 2003; Martínez-Salvador, 2013). Dentro de estas especies, se encuentran la candelilla, la lechuguilla y el sotol, de los que se derivan productos que son importantes en varias actividades industriales (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Cervantes-Ramírez, 2002; Narcia-Velasco *et al.*, 2012; Martínez-Salvador, 2013).

Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*)

Pertenece a la familia Euphorbiaceae, que está constituida por árboles, arbustos y herbáceas, las cuales típicamente contienen látex. Son plantas monoicas caracterizadas por inflorescencias en las que la unidad básica es el ciato. La familia incluye alrededor de 8,700 especies ubicadas en 320 géneros (Webster, 1994) distribuidas principalmente en zonas tropicales y templadas. Se calcula que en México está representada por 43 géneros y 782 especies, más 32 taxas intraespecíficos: 8 subespecies y 24 variedades. El género *Enriquebeltrania* es endémico del país, además, se estima que 57% de las especies mexicanas son endémicas (Steinmann, 2002).

Zuccarini describió en 1832 la planta con el nombre científico *Euphorbia antisiphilitica*, reconociendo las propiedades medicinales del jugo de la planta. Posteriormente surgió una nueva

clasificación presentada G. Alcocer en 1909, quien la nombró *Euphorbia cerifera*, destacando las propiedades de la planta para la obtención de cera (Scora *et al.*, 1995; Saucedo-Pompa, 2007). Es una planta perenne de tallos múltiples, cilíndricos y de color verde blanquecino; produce cera como respuesta adaptativa a las condiciones ambientales extremas de las zonas áridas (Flores-López, 1995).

La planta de candelilla florece entre los 400 y 1200 msnm de altitud (Romahn, 1992a), en suelos con pendientes de 1 a 3% (CONAFOR, 2009) bien drenados, con orientación sur en laderas de piedra caliza de origen aluvial, someros (menor de 25 cm), de textura franco-arenosa, pedregosos, con buen drenaje, ricos en carbonato de calcio, con un pH que va de 7.4 a 8.4 y pobres en nitrógeno (Romahn, 1992b). Esta especie se encuentra ampliamente distribuida desde el meridiano 99°25' oeste hasta los 105°50' oeste y desde los 22°00' a los 30°40' norte, teniendo las mayores concentraciones entre los meridianos 102° a 104° latitud oeste hasta el paralelo 24°00' (CONAFOR, 2009). Se distribuye en Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas. Son arbustos con un diámetro aproximado a 90 cm, la raíz es pequeña. Una planta de tamaño moderado puede desarrollar más de 100 tallos, con dimensiones típicas de 30 a 60 cm de largo y de 0.1 a 1.0 cm de diámetro (Romahn, 1992b). Contribuye a la prevención de la erosión edáfica, pues protege al suelo de la radiación solar y del efecto del viento. No se conocen plagas o enfermedades que la afecten; sin embargo, el aprovechamiento del recurso, la ganadería, el sobrepastoreo y los incendios pueden llegar a poner en peligro sus poblaciones (CONAFOR, 2009).

La candelilla se desarrolla generalmente mezclada con especies espinosas. No forma masas puras, se encuentra localizada en forma de matas o manchas normalmente aisladas. Se encuentra mezclada con especies como la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), guapilla (*Agave striata* y *A. falcata*), sotol (*Dasyilirion cedrosanum*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), sangre de drago (*Jatropha dioica*), palma china (*Yucca filifera*), palma samandoca (*Y. carnerosana*), hojásén (*Fluorensia cernua*), mezquite (*Prosopis* sp.), mariola (*Parthenium icanum*). Se asocia también con numerosas cactáceas, como varias especies de nopal (*Opuntia* spp.), cardenche (*Cylindropuntia imbricata*) y tasajillo (*C. leptocaulis*), de acuerdo con Esquivel (1979).

Como respuesta adaptativa a las condiciones ambientales extremas de las regiones áridas, la candelilla produce cera que le permite conservar la humedad que capta en los tiempos de lluvia (Scora *et al.*, 1995; CONAFOR, 2005). Esta constituye ahora el producto no maderable, motivo de su recolecta comercial. Su descubrimiento y uso original se debe a los pobladores prehispánicos del norte del país, quienes extraían la cera cruda mediante el calentamiento de los tallos en recipientes de barro y después la mezclaban con colorantes para usarla con fines ornamentales (Romhan, 1992a; Romhan, 1992b). En la época de la colonia española se empleó para elaborar velas, de ahí el nombre de candelilla, que significa “vela pequeña”. El aprovechamiento actual se remonta a 1914, cuando los señores Borrego y Flores diseñaron un método para la extracción de la cera. La recolección es de naturaleza migratoria, ya que una vez agotada la planta de un área, los recolectores se trasladan a otros lugares (De la Cruz, 1958). Según Espinosa (1962) en Flores-López, (1995), la recolección se realiza en época de seca, específicamente de octubre a junio.

La cera es de color amarillo transparente, con dureza, brillo y fácil digestión sin ser tóxica, generalmente reconocida como segura (GRAS), por la Food and Drugs Administration (FDA). Tiene varios usos industriales, como la cosmética y la electrónica por sus características fisicoquímicas, como su punto de fusión, impermeabilidad, su bajo índice de contracción y propiedades dieléctricas, le permiten funcionar con eficiencia en el proceso de moldeo de precisión o cera perdida en la industria eléctrica (Canales *et al.*, 2006). Destacan la fabricación de velas, manufactura de cosméticos, pinturas, recubrimientos para dulces y frutos de exportación, revestimientos aisladores, goma de mascar, ceras para calzado, ungüentos, jabones, envases desechables y productos para pulir y dar brillo a automóviles, muebles y pisos (Gupta y Mehrotra, 1997; Hagenmaier, 2000; Cervantes-Ramírez, 2002; Barsch, 2004). En 1941, la revista *Nature* publicó un artículo de John Whitaker, mencionando que la cera de candelilla era el material con el mayor número de aplicaciones comerciales de todas las sustancias extraídas de plantas silvestres que crecen en el continente americano (FDA, 1982; Kuznesof y Whitehouse, 2007).

México es el principal productor de cera de candelilla en el mundo. Zacatecas, por su parte, ocupa el cuarto lugar en la producción anual de cera en el país; su producción está sujeta a los

niveles de demanda en el mercado internacional y por las variaciones que presentan los productos sustitutos, en especial las parafinas derivadas del petróleo. En el país existen 630,500 ha susceptibles de aprovechamiento, de las cuales 81,497 ha se ubican en el estado de Zacatecas, de donde se extraen cerca de 64,182 kg de cera por año en los municipios de Melchor Ocampo, Mazapil y Concepción del Oro (SAGARPA, 2007). Actualmente, del 60% al 80% de la producción es exportada, principalmente a los Estados Unidos, Japón, Alemania y Unión Europea (CENAMEX, 2005).

Lechuguilla (*Agave lechuguilla*)

Es un arbusto rosetófilo, pequeño, con 11 a 30 hojas en promedio por planta; mide de 30 a 40 cm de ancho y 20 a 60 cm de alto (Rzedowski, 1978; Sheldon, 1980; Magallán, 1998). Al madurar cuenta con una inflorescencia conocida como quiote, mequite o garrocha que puede llegar a medir de 2.5 hasta 6 m de alto (Rzedowski, 1978; Sheldon, 1980; Gentry, 1982; Flores, 1986; Berlanga-Reyes *et al.*, 1992). Su floración ocurre entre los meses de mayo y junio; en años secos puede ser en octubre o noviembre. Por lo general se reproduce de manera asexual por medio de rizomas conocidos como vástagos, hijatos, retoños o hijuelos; la reproducción continua de los hijuelos da origen a masas densas (Freeman y Reid, 1985).

Es una planta de las zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos y México. Es uno de los agaves con mayor distribución geográfica y se presenta en 100,000 km² (Nobel, 1998). En México, su área de distribución abarca zonas de los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas, también se tienen registros en Hidalgo, Oaxaca y Estado de México (Marroquín *et al.*, 1981). Esta distribución corresponde al patrón altiplanicie mexicana y zonas adyacentes (Reyes-Agüero y Aguirre, 1999), mientras que Rzedowski (1978) menciona que está presente en altiplanicie y planicie del noroeste de México. Su densidad poblacional es muy variable, de 4,300 a 56,000 individuos/ha (Nobel, 1998) aunque hay estimaciones que oscilan entre 21,000 y 28,333 plantas/ha (Reyes-Agüero *et al.*, 2000). Respecto a las condiciones donde se desarrolla, hay poca información; Aguirre, (1983) la reporta en suelos que contienen 37.3% de arena, 34.5% de arcilla, 28.2% de limo, y pH de 7.7. Es considerada una de las especies forestales no maderables con mayor valor socioeconómico en las zonas desérticas

del país, utilizada principalmente por su fibra desde hace aproximadamente 8,000 años (Berlanga-Reyes *et al.*, 1992; Pando-Moreno *et al.*, 2004; Castillo-Quiroz *et al.*, 2005a). En la actualidad, su aprovechamiento representa una de las principales actividades para pobladores rurales de estas regiones (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Narcia-Velasco *et al.*, 2012).

La fibra de lechuguilla se obtiene del cogollo, formado por las hojas más tiernas de la planta, que se encuentran agrupadas al centro de ésta, y del cual proviene la fibra de mayor calidad y valor comercial (Lozano, 1988; Marroquín *et al.*, 1981; Sheldon, 1980; Zárate *et al.*, 1991). Las características propias de la fibra en poblaciones naturales no son siempre homogéneas; éstas pueden variar de una región a otra, tanto en color como en longitud (Mauersberger, 1950), incluso, entre un sitio y otro en una misma región. Además del color y la longitud, las características físico-mecánicas de la fibra no son del todo uniformes en las poblaciones silvestres; dentro de ellas existen también pequeñas áreas en donde las plantas pueden o no presentar características deseables en cuanto a grosor, resistencia y rendimiento. El aprovechamiento de esta planta suele estar asociado con la recolección de candelilla y orégano, y con actividades de agricultura de temporal y ganadería extensiva, pero, en ciertos casos, es la única fuente de ingresos económicos para algunas familias (Berlanga-Reyes *et al.*, 1992; Pando-Moreno *et al.*, 2004; Castillo-Quiroz *et al.*, 2005a). Este aprovechamiento consiste en el tallado de las hojas del cogollo, y la fibra se utiliza para la elaboración de numerosos productos tales como morrales, costales, lazos, estropajos, sombreros, bolsos, etc., el resto de la planta usualmente se desperdicia. También puede ser utilizada en infusiones para tratar heridas; las flores son comestibles, las inflorescencias para alimentar al ganado, así como para la construcción de cercos, o como leña (Gómez *et al.*, 2010). En cuanto a la pulpa residual el tallado (conocida como guishe), sus aplicaciones industriales han sido poco estudiadas, aunque se conoce que tiene propiedades abrasivas, pero también se usa para la elaboración de láminas, maderas aglomeradas, cartón, papel filtro y la obtención de esteroides (Berlanga-Reyes *et al.*, 1992); mientras que del tallo y del guishe se pueden fabricar jabones y mejoradores de suelo (Flores y Perales, 1989; Zapién, 1981).

Sotol (*Dasyilirion cedrosanum*)

El sotol es una planta perenne que representa al Desierto Chihuahuense, área que comprende gran parte del norte de México y sur de los Estados Unidos (Bogler, 1994; Zárate, 2003). Se desarrolla en diversos tipos de terreno, preferentemente en lomeríos de suelos someros y bien drenados, en donde convive con una gran variedad de formas de vida; es una planta muy rústica que se distribuye en matorral rosetófilo y matorral crasicaule espinoso (Zárate, 2003), aunque ocasionalmente forma parte del matorral desértico micrófilo (Henrickson y Johnston, 1977). Suele distribuirse en una temperatura media anual de 17 a 21°C, con precipitación entre 150 a 400mm por año; los suelos que conforman su distribución son Xerosoles, Rendzinas y Regosoles, ricos en carbonatos de calcio, con poco desarrollo y buen drenaje, prefieren lugares en laderas, pie de montañas y con pendiente (Berlanga-Reyes *et al.*, 1992). Se trata de una planta de hojas numerosas que brotan simétricamente desde el tallo, con 30 a 170 cm de longitud, caídas o arqueadas, relativamente amplias, flexibles y en forma de cuchara en el extremo inferior; el tallo es corto, en parte subterráneo, fibroso y robusto, cubierto de hojas persistentes. Es una planta dioica; ambos sexos cuentan con una inflorescencia llamada escapo (Bogler, 1994).

El sotol pertenece al género *Dasyilirion*, de la familia Agavaceae de acuerdo con Henrickson y Johnston (1977), aunque Dahlgren *et al.* (1985) lo ubica en Nolinaceae. Este género comprende alrededor de 14 a 18 especies y se distribuye en el suroeste de los Estados Unidos y buena porción del norte y centro de México (Henrickson y Johnston, 1977; Bogler, 1994). Henrickson y Johnston (1977) mencionan solamente nueve especies: *D. texanum* (Coahuila, Nuevo León y norte de San Luis Potosí), *D. parrayanum* sinonimia de *D. graminifolium* (San Luis Potosí), *D. wheeleri* (Durango), *D. cedrosanum* (Durango, Coahuila y Zacatecas), *D. leiophyllum* (Chihuahua y oeste de Coahuila), *D. stewartii* con dos variedades *D. stewartii* var. *stewartii* y *D. stewartii* var. *glaucum* (Coahuila), *D. heteracanthum* (Chihuahua y noreste de Coahuila), *D. palaciosi* (San Luis Potosí) y *D. longissimum* (Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo).

Una de las especies de mayor importancia económica dentro del género *Dasyilirion* es *D. cedrosanum*. El producto económicamente más importante de la planta es la bebida llamada “sotol”, obtenida a partir de la fermentación del jugo proveniente del tallo o cabeza de la planta; aunque también se usa para construir cercas, cestería y techos (Cano-Pineda, 2006), así como la

extracción de inulina, la cual tiene gran valor en la industria farmacéutica. En la zona de estudio sólo se usa como forraje.

LITERATURA CITADA

- ADR-SEDENORTE-PESA –FAO. 2006. Matriz de caracterización micro-regional de Melchor Ocampo, Zacatecas, México. Folleto. Melchor Ocampo, Zacatecas, México.
- Aguayo-Quezada, S. 2003. México en cifras. México: SEP-Grijalbo. Ciudad de México.
- Aguirre R., J.R. 1983. Enfoques para el estudio de las actividades agrícolas en el altiplano potosino zacatecano. En: J. T. Molina G. (Ed.) Recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Balleza, J.J. y J.L. Villaseñor. 2011. Contribución del estado de Zacatecas (México) a la conservación de la riqueza florística del Desierto Chihuahuense. Acta Botánica Mexicana 94: 61-89.
- Barsch, F. 2004. Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*): Utilization in Mexico and international trade. Medicinal Plant Conservation 9:46-50.
- Berlanga-Reyes, C.A., M. García y L.A. González. 1992. Técnicas para el establecimiento y manejo de una plantación de lechuguilla. Folleto divulgativo Número 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Centro de Investigación regional Noreste-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental “La Saucedá”. Ramos Arizpe, Coahuila, México.
- Bogler, D.J. 1994. Systematics of *Dasylyrion*: Taxonomy and molecular phylogeny. Boletín de la Sociedad Botánica de México 56:69-76.
- Canales, G.E., V. Canales-Martínez y E.M. Zamarrón-Rodríguez. 2006. Candelilla del Desierto Mexicano Hacia el Mundo. Biodiversitas 69:1-5.
- Cano-Pineda, 2006. Informe del Proyecto CONAFOR-CONACYT C03-10376 “Desarrollo tecnológico para el manejo sustentable del Sotol (*Dasylyrion cedrosanum* Trel.) en el estado de Coahuila. Documento inédito. CONAFOR-CONACYT. Saltillo, México.
- Castillo-Quiroz, D. y A. Cano-Pineda. 2005b. Guía técnica para el establecimiento de plantaciones de cortadillo (*Nolina cespitifera* Trel.) para la producción de fibras duras en el estado de Coahuila. Folleto Técnico Núm. 16. SAGARPA. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. México.
- Castillo-Quiroz, D., A. Berlanga-R. y A. Cano-Pineda. 2005a. Recolección, extracción y uso de la fibra de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) en el estado de Coahuila. Publicación Especial Núm. 6. INIFAP, Centro de Investigación Regional del Noreste. Campo Experimental Saltillo. México.
- Ceras Naturales Mexicanas, S.A. de C.V (CENAMEX). 2005. Reporte económico-comercial de la candelilla. Saltillo, Coahuila, México.
- Cervantes-Ramírez, M.C. 2002. Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. Temas Selectos de Geografía de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Pp. 125-137.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO, Instituto de Biología y Agrupación Sierra Madre S.C. México. Ciudad de México.

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2005. La Candelilla. http://www.conafor.gob.mx/revista_forestal/vol207.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. Gerencia de plantaciones forestales comerciales. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temasforestales/competitividad/estudio-2009>.
- Dahlgren, R.M.T., H.T. Clifford and P.F. Yeo. 1985. The families or the monocotyledons. Springer- Verlag. Berlin. 520 p.
- De la Cruz C., J.A. 1958. Contribución al estudio de la candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, México.
- De la Garza P., F. 1985. Comercialización y costos de producción del ixtle de lechuguilla. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales -Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Boletín informativo número 73. Ciudad de México.
- Esquivel, W. 1979. Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.). Estudio monográfico. Tesina Biólogo. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
- Fernández-Nava, R., D. Ramos-Zamora y E. Carranza-González. 2001. Notas sobre plantas medicinales del estado de Querétaro, México. Polibotánica 12:1-39.
- Flores-Del Ángel, M.L. 2013. Situación actual de las poblaciones de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.): inventario, su propagación sexual y asexual en el estado de Coahuila, México. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
- Flores-López, C. 1995. Viabilidad de las semillas, emergencia de plántulas y plantaciones de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) en Ramos Arizpe, Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. División de Agronomía. Ramos Arizpe, Coahuila.
- Flores, F.J. y J.M Perales. 1989. Primer reporte nacional de plagas asociadas a la lechuguilla *Agave lechuguilla* Torrey. Atraria 5:57-73.
- Flores, M.S. 1986. Estudio citogenético de *Agave crassispina* Trel. y *Agave lechuguilla* Torr. en el municipio de Pinos, Zacatecas y en el municipio de Real de Catorce, San Luis Potosí, México. Tesis de licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales, UNAM. Los Reyes Iztacala. México. 124p.
- Food and Drugs Administration (FDA). 1982. Candelilla wax, proposed affirmation of GRAS status as a direct human food ingredient. Registro federal 47:35776-35777.
- Freeman, C.E. and W.H. Reid. 1985. Aspects of the reproductive biology of *Agave lechuguilla* Torr. Desert Plants 7:75-80.
- Gatica, A.C. 1999. Desierto Chihuahuense, ¿Qué sabemos de él? Ciencia en la Frontera. Centro de Estudios de Bachillerato Universidad Autónoma de Ciudad Juárez 1:8-16.
- Gentry, H.S. 1982. Agaves of continental North America. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona. 670p.
- Gómez, J.D., A.I. Monterroso, J.A Tinoco. y M.L. Toledo. 2010. Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México 62p.
- Gupta, N. and N.K. Mehrotra. 1997. Potassium nutrition related biomass and wax productivity of *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. in sand culture. Journal of the Indian Botanical Society 76:99-101.

- Hagenmaier, R.D. 2000. Evaluation of a polyethylene-candelilla coating for “Valencia” oranges. *Postharvest Biology and Technology* 19: 147-154.
- Henrickson, J. and M.C Johnston.1977. A flora of the chihuahuan desert region. Edition 1.2 volumen 2. L.A.
- Hernández, H.M. y H. Godínez A. 1994. Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botánica Mexicana* 26:33-52.
- Kobelkowsky-Sosa R., J. Palacio-Núñez y L. A. Tarango. 2001. Diversificación productiva para la conservación de la biodiversidad del Ejido Guanamé, Venado, S.L.P. *In: Memorias de la 5ª Reunión Científica y Tecnológica Agrícola, Pecuaria y Forestal. Fundación Produce S.L.P. San Luis Potosí, México.*
- Kuznesof, P.M. and D.B. Whitehouse. 2007. Candelilla Wax. Chemical and Technical Assessment (CTA) 65th JECFA A. FAO. http://www.fao.org/es/esn/jecfa/cta_65_candelilla_wax.pdf.
- Lozano M., E. 1988. Estudio Biométrico de *Agave lechuguilla* Torr. en 7 localidades de Mina, Nuevo León. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N. L. México.
- Magallán, H.E.F. 1998. Las agaváceas de Querétaro. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. 155 p.
- March, I.J., M.A. Carvajal-De los Ángeles, R.M. Vidal, J.E. San Román, G. Ruiz. 2009. Planificación y desarrollo de estrategias para la conservación de la biodiversidad, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO. México. Pp. 545-573.
- Marroquín, J.S., L.G. Borja, C.R. Velásquez y J.A. De la Cruz. 1981. Estudio ecológico dasonómico de las zonas áridas del norte de México. Publicación Especial Núm. 2. 2ª Edición. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Ciudad de México. 166 p.
- Martínez-Salvador, M. 2013. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrarias y Pecuarias – Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Sitio Experimental La Campana. Aldama, Chihuahua, México.
- Mauersberger, H.R. 1950. Matthews’ Textile Fibers. Their physical, microscopical, and chemical properties. Fifth Edition. John Wiley & Sons. Nueva York.
- Mondragón-Jacobo, C., S. Pérez-González, E. Arias, S. G. Reynolds y M. D. Sánchez. 2003. El nopal (*Opuntia* spp.) como forraje. Producción y protección vegetal 169. FAO, Roma Italia. 172 p.
- Narcia-Velasco, M., D. Castillo-Quiroz, J.A. Vázquez-Ramos y C.A. Berlanga-Reyes. 2012. Turno técnico de la lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3(9):81-88.
- Nobel, P.S. 1998. Los incomparables Agaves y Cactus. Ed. Trillas. México, D.F.
- Núñez-González, R.D. 2011. Hombre del cerro y el bajío: Ixtleros candelilleros de Ramos Arizpe, Coahuila, y Mina, Nuevo León. Tesis de maestría. El Colegio de San Luis. A.C. San Luis Potosí, México.
- Pando-Moreno, M., O. Eufrazio, E. Jurado y E. Estrada. 2004. Post-harvest growth of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Agavaceae) in Northeastern México. *Economic Botany* 58 (1) pp 78-82.

- PESA–FAO. 2006. Matriz de caracterización micro-regional de Mazapil, Zacatecas, México. Mazapil, Zacatecas.
- Reyes-Agüero, J.A. y J.R. Aguirre. 1999. Fitogeografía de la sierra Monte Grande, Charcas, San Luis Potosí, México. *Caldasia* 21:50-69.
- Reyes-Agüero, J.A., J.R. Aguirre y C.B. Peña. 2000. Biología y Aprovechamiento de *Agave lechuguilla* Torr. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 67:75-88.
- Romahn, C.F. 1992a. Los recursos forestales no maderables de México: una Revisión. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 131 p.
- Romahn, C.F. 1992b. Principales productos forestales no maderables de México. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. LIMUSA. México, D.F.
- SAGARPA. 2007. Programa para el Desarrollo Rural Sustentable. Avances de Ejercicio en el Estado de Zacatecas. Zacatecas, México.
- Sánchez-Molina, A. 1969. Síntesis geográfica de México. Trillas. México.
- Saucedo-Pompa, S. 2007. Desarrollo de películas comestibles a partir de cera de candelilla y activos antioxidantes. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila. México.
- Scora, G.A., M. Ahmed and R.W. Scora. 1995. Epicuticular hydrocarbons of candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) from three different geographical areas. *Industrial Crops and Products* 4: 179-184.
- Sheldon, S. 1980. Ethnobotany of *Agave lechuguilla* and *Yucca carnerosana* in Mexico's Zona Ixtlera. *Economic Botany* 34(4):376-390.
- Steinmann, V.W. 2002. Diversidad y endemismo de la familia Euphorbiaceae en México. *Acta Botánica Mexicana* 61:61-93.
- Tamayo, J.L. 1990. Geografía moderna de México. Décima edición. Trillas. México.
- Toledo, V.M. y M.J. Ordóñez. 2009. Zonas ecológicas de México. Extraído de los proyectos A006 y E021: Diagnostico de los escenarios de la biodiversidad en México fases 1 y 2. Escala 1: 1,000,000. Centro de Ecología, UNAM. El proyecto fue financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.
- Toledo, V.M. y M.J. Ordoñez. 1993. The biodiversity scenario of Mexico: A review of territorial habitats. En T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.). *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford Univertisty, Press. New York. Pp. 757-777.
- Villarreal-Quintanilla, J. y E. Estrada-Castillón. 2008. Listados florísticos de México. XXIV. Flora de Nuevo León. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. México.
- Villarreal R., L. y R.K. Maití. 1989. Características morfoanatómicas y productividad de fibra en *Agave lechuguilla* Torr. en Nuevo León. *Turrialba* 41(3): 423-429.
- Webster, G.L. 1994. Synopsis of the genera and suprageneric taxa of Euphorbiaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 81:33-144.
- Wiken, E., F. Jiménez-Nava and G. Griffith. 2011. North American Terrestrial Ecoregions— Level III. Commission for Environmental Cooperation, Montreal, Canada. 149 p.
- Zapién, B.M. 1981. Evaluación de la producción de ixtle de lechuguilla en cuatro sitios diferentes. En: Primera Reunión Regional sobre Ecología, Manejo y Domesticación de las Plantas Útiles del Desierto. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. SARH. Publicación Especial Número 31:385-389.

- Zárate, L.A. 2003. Inventario de las poblaciones y su condición del sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) en el sur de Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Gobierno del Estado de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
- Zárate, L.A., C.A. Berlanga-Reyes y H. Franco L. 1991. Análisis dimensional en lechuguilla. In: III Simposio Nacional sobre ecología, manejo y domesticación de plantas útiles del Desierto. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Saltillo. México.

CAPÍTULO I. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE CANDELILLA (*Euphorbia antisyphilitica*) EN EL NORTE DE ZACATECAS, MÉXICO

1.1 INTRODUCCIÓN

México cuenta con regiones áridas y semiáridas que cubren 1 030 000 km², constituida en lomeríos y grandes planicies con montañas aisladas (INEGI, 2008). La vegetación dominante es matorral xerófilo, que ocupa 40% de la superficie continental (INEGI, 2005a). El clima presenta condiciones restringidas de precipitación, y la sobrevivencia es difícil para los organismos silvestres (Sosa *et al.*, 2006) y para los habitantes humanos rurales (Cihlar *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2006). Sin embargo, mantiene sitios de gran importancia ecológica, con flora y fauna silvestre singular (Martínez-Salvador, 2013), con presencia de especies susceptibles de aprovechamiento (Sosa *et al.*, 2006), entre las que se encuentran la planta conocida localmente como candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.). Esta se distribuye principalmente en el desierto Chihuahuense (Steinmann, 2002), en los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas y San Luis Potosí, en altitud entre 460 a 2 400 m, llegando a predominar entre 700 y 1 200 m (Martínez-Salvador, 2013).

La candelilla es considerada como un recurso muy importante para habitantes de estas zonas (Cervantes-Ramírez, 2002). Tiene especial relevancia por múltiples usos industriales para la elaboración de pinturas, abrillantadores, velas, productos de piel, cosméticos, cordelería, llantas, envases desechables, papel encerado y artículos electrónicos (Canales *et al.*, 2006). Se cuenta con información general sobre su biología y distribución, así como de algunas variables del hábitat que influyen en su presencia (e.g. Rzedowski, 1978; Martínez-Salvador, 2013). También sobre los productos y subproductos que se derivan de esta planta (e.g. Gupta y Mehrotra, 1997; Hagenmaier, 2000; Cervantes-Ramírez, 2002; Barsch, 2004) y sobre su importancia ecológica (e.g. Martínez-Salvador, 2013) y económica (e.g. Barsch, 2004). Sin embargo, se desconoce tanto la intensidad de su uso como la disponibilidad de este recurso forestal no maderable, y no hay información precisa sobre su distribución y su abundancia en muchas regiones.

Para obtener esta información, los programas informáticos de predicción son herramientas actuales valiosas para la generación de diferentes modelos. En particular, el algoritmo MaxEnt es robusto y preciso para el modelado de distribución potencial (MDP) de las especies (Phillips *et al.*, 2006). Se basa en registros de ocurrencia junto con variables ambientales tales como temperatura, vegetación, altitud, humedad para un área adyacente de estudio (Phillips *et al.*, 2006, Phillips y Dudík 2008). Adicionalmente, hay técnicas para evaluar la disponibilidad de un recurso.

1.1.1 Objetivo general

Estimar la distribución potencial de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) y con base en la distribución potencial, evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes en el norte de Zacatecas.

1.1.2 Objetivos particulares

- Modelar la distribución potencial de candelilla en cuatro municipios del norte de Zacatecas y cotejar en campo esta distribución.
- Evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes con base en la distribución potencial.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1 Área de estudio

El trabajo se realizó en el norte del estado de Zacatecas, abarcando los municipios de Mazapil, Melchor Ocampo, Concepción del Oro y El Salvador, con una extensión total de 17 075 km² (Figura 1.1). Incluye la extensión total o parcial de las subprovincias fisiográficas (SPF) Sierras

Transversales (ST), Sierras y Llanuras Occidentales (SLO) y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande (SLARG) (Cervantes-Zamora *et al.*, 1990). Predominan los climas árido y semiárido, con temperatura media anual de 18 a 22°C, precipitación de 125 a 400 mm y, con extensiones reducidas tanto de clima muy árido y templado (SNIARN, 2005). La vegetación muestra adaptaciones a la aridez (Rzedowski, 1978) y los tipos, de acuerdo con su abundancia, son: 1) seca, compuesta por matorrales xerófilos (micrófilo, rosetófilo, crasicauale, chaparral, mezquital) en su mayor extensión, así como pastizal natural, vegetación halófila y pastizal gipsófilo y halófilo, 2) templada, compuesta por bosques de pino y, 3) antrópica, presente en áreas agrícolas, que en esta región es básicamente agricultura de temporal y pastizal inducido (INEGI, 2005a). Los principales tipos de suelo son: Calcisol, Chernozem, Castañozem, Leptosol, Regosol, Phaeozem, Solonchak y Solonetz (INEGI, 2007). La altitud fluctúa entre 1,239 a 3,166 msnm, en terrenos que van desde planos a escarpados (INEGI, 2008).

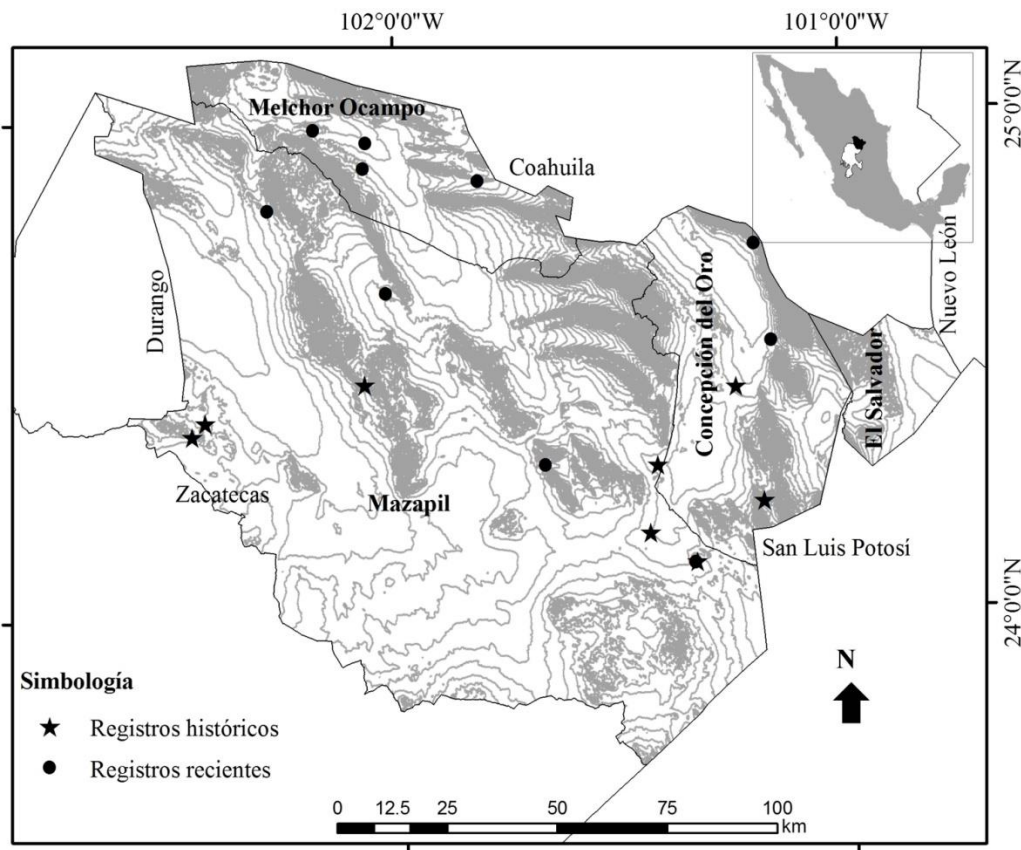


Figura 1.1 Área de estudio con límites estatales y municipales, donde se muestran los registros de candelilla, tanto históricos como recientes.

1.2.2 Distribución potencial

Se obtuvieron 10 registros nuevos en dos salidas de campo de cinco y siete días, respectivamente, entre junio y agosto de 2016, con la ayuda de guías locales. También se visitaron 8 sitios con registros históricos (anteriores a 2011) obtenidos de *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF; www.gbif.org). Todos los puntos fueron georreferenciados con un geoposicionador (GPS, Garmin© modelo Etrex 10). Para estimar la distribución potencial (DP) de candelilla se empleó el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k siguiendo las especificaciones de Phillips (2013), con los 18 registros de presencia y el uso de 27 variables ambientales como predictores: 19 variables bioclimáticas (Hijmans *et al.*, 2005), tres del modelo digital de elevación: pendiente, modelo digital de elevación (MDE), y exposición (INEGI, 2008). También se incluyó la SPF tomadas de Cervantes-Zamora *et al.* (1990), índice topográfico (INEGI, 2005b), tipo de vegetación (INEGI, 2005a), así como la cobertura de la misma (Hansen *et al.*, 2000) y densidad poblacional humana (CIAT *et al.*, 2005). La escala utilizada fue 1: 250 000. Las capas se unificaron a una resolución de 1 km² (0.01 grados).

Con MaxEnt se obtuvo el área bajo la curva (AUC) generada por el algoritmo (Hernandez *et al.*, 2006) y el mapa promedio que se reclasificó en ArcMap 10.3 (ESRI, 2010), considerando cuatro niveles de probabilidad (1. alta, 2. media, 3. baja y 4. ausente o no detectada). Para ello se consideró el umbral de corte del mínimo de presencia de los puntos de entrenamiento de 0.3723, aportado por el mismo modelo. Con este mapa y estos niveles se calculó el área de distribución potencial para la especie, expresada en porcentaje del área total.

1.2.3 Abundancia de candelilla

Con base en el mapa de distribución potencial y el programa informático ArcGIS 10.3 (ESRI, 2010), se eliminaron las áreas donde la vegetación nativa fue removida por motivos antrópicos. En el mapa resultante se obtuvieron de manera aleatoria 29 puntos de verificación en donde hubo probabilidad de distribución potencial de la especie, y otros 19 en donde no hubo esa probabilidad. Estos 48 nuevos sitios tuvieron una separación de al menos 5 km, y fueron

localizados en campo entre los meses de febrero y marzo de 2017 mediante el uso de un geoposicionador Garmin© modelo Etrex 10, para corroborar o no, la presencia de la candelilla. En los sitios donde esta especie fue localizada, se procedió a realizar muestreos sobre su disponibilidad, considerando su abundancia mediante densidad poblacional (expresada en individuos por kilómetro cuadrado), y su talla media (en cm). Para esto se realizaron parcelas de 20x20m (400 m²), donde se obtuvo la frecuencia de aparición. Para estimar la talla de las plantas, dentro de cada parcela se trazaron aleatoriamente dos subparcelas de 5x5 m, donde se midió la talla de todos los ejemplares. Con los valores promedio se formaron cinco clases: muy pequeña (<29 cm), pequeña (29-45), mediana (46-61), grande (62-78) y muy grande (79-96 cm).

Para estimar la influencia de variables ambientales sobre la distribución, la abundancia y la talla de la candelilla, se consideraron en campo: coordenadas geográficas (expresada en grados decimales) y la altitud del terreno (en msnm), obtenidas mediante el GPS, y la pendiente del terreno (en grados) con clinómetro Suunto, modelo PM-5. Esta última variable fue catalogada en cinco clases, siguiendo los criterios de Aramburu y Escribano (2006) en: nula o suave (NS = <3°), moderada (M= 3-10°), fuerte (F= >10-20°), muy fuerte (MF= >20-30°) y escarpada (E= >30°). Adicionalmente se consideraron el tipo de vegetación (INEGI, 2005a) y tipo de suelo (INEGI, 2007), las SPF (Cervantes-Zamora, *et al.*, 1990) y municipio (INEGI, 2012). En los sitios donde la especie no fue localizada, dentro y fuera del mapa de distribución potencial, también se tomó información de las mismas variables tanto de campo como cartográficas.

1.2.4 Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se realizaron para la densidad y la talla de las plantas entre las diferentes variables: tipo de vegetación, tipo de suelo, altitud y pendiente. Cabe señalar que todos los datos de campo tuvieron una gran dispersión de valores y no se ajustaron a una distribución normal. Cuando la normalidad de los datos no puede ser asumida, se requiere de pruebas no paramétricas (e.g. Gotfryd y Hansell, 1985; Gundale y Deluca, 2006), tales como Kruskal–Wallis (KW), que prueba la diferencia entre varios grupos de muestras independientes, o de resultados de muestreo de grupos independientes, la U de Mann-Whitney (MW) entre dos grupos (e.g. Gundale y

Deluca, 2006; Vergura *et al.*, 2009). El modelo se realizó utilizando el programa InfoStat versión 2016 (Di *et al.*, 2016), con un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$.

1.3 RESULTADOS

De acuerdo con el análisis de la curva ROC, el modelo presentó una predicción robusta ($AUC = 0.920 \pm 0.039$). Las variables: tipo de vegetación, exposición, pendiente, MDE, cobertura vegetal, índice topográfico, precipitación total anual (Bio 12), rango de temperatura anual (Bio 07), SPF, temperatura media del trimestre más frío (Bio 10), temperatura máxima del mes más caliente (Bio 05) y precipitación del trimestre más frío (Bio 19) contribuyeron con 82.1% para la generación de este modelo (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial de candelilla en el norte de Zacatecas.

Variable	Contribución (%)
Tipo de vegetación	20.4
Exposición	10.2
Pendiente	9.9
Modelo digital de elevación	7.2
Cobertura vegetal	7.0
Índice topográfico	5.1
Precipitación total anual (Bio 12)	4.7
Rango de temperatura anual (Bio 07)	4.3
Subprovincia fisiográfica	4.2
Temperatura media del trimestre más frío (Bio 10)	3.2
Temperatura máxima del mes más caliente (Bio 05)	3.0
Precipitación del trimestre más frío (Bio 19)	2.9

La distribución potencial de la candelilla se encontró en 3,265 km², 19.2% del área de estudio, mientras que el 80.8% restante correspondió a la probabilidad de DP ausente o no detectada (PA-

ND). Entonces, 14.7% correspondió a probabilidad de presencia baja (PB), 3.9% a probabilidad media (PM) y 0.6% a probabilidad alta (PA). En los ocho sitios de registros históricos se confirmó presencia, por lo que fueron un reforzante para el modelado. Para el municipio de Mazapil, con 11 registros, se encontró que en 17.3% de su extensión hubo probabilidad de DP, para Melchor Ocampo (3 registros) fue en 27.3%, para Concepción del Oro (4 registros) fue 25.9% y para El Salvador (sin registros) fue 6.6% (Figura 1.2); en otras porciones montañosas, sobre todo en el noreste de Mazapil, noreste de Concepción el Oro y noroeste de El Salvador, el mapa de predicción mostró PA-ND. Esto mismo ocurrió en todas las zonas planas o con pendiente más suavizada, que ocupan la mayor proporción del área de estudio, donde los sitios con probabilidad de DP aparecieron frecuentemente aislados. Los sitios con probabilidad alta fueron especialmente escasos y aislados.

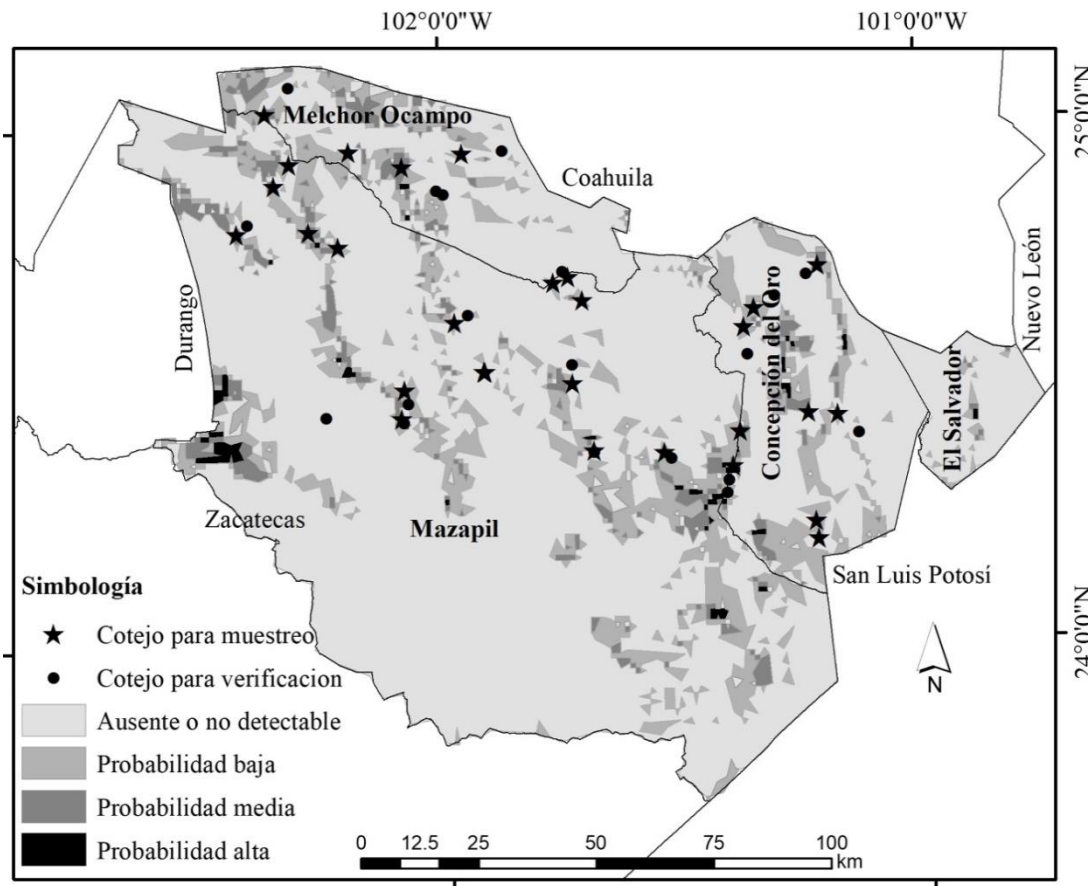


Figura 1.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de candelilla. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.

Respecto a la distribución entre las variables del hábitat, 13 registros se ubicaron en la SPF Sierras Transversales (72.2%) y los cinco restantes en Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande (27.8%). Respecto al tipo de vegetación, 55.6% se encontró en matorral rosetófilo y 44.4% en matorral micrófilo. La variable tipo de suelo no fue importante en el modelado; 83.3% de la distribución de la candelilla se encontró en suelo de tipo Calcisol (55.6%), Phaeozem (33.3%) y 11.1% en Leptosol. Respecto a la pendiente del terreno, el 100% de los registros se encontraron en sitios con inclinación; 16.7% en clase N-S, 44.4% en Md, 22.2% en Fu, 11.1% en MF y 5.6% en E. En cuanto a altitud, el 100% de la distribución se encontró en el rango 1,469 y 2,151 msnm. La ubicación de cada registro, así como información adicional sobre variables ambientales se muestra en el Cuadro 1.2.

La ubicación de todos los puntos de cotejo se muestra en el Cuadro 1.3; los puntos con DP positiva se numeran del 1 al 29 y los de probabilidad ausente o no detectada del 30 al 48. En estos resultados, en 11 de los 29 sitios donde el modelo predijo probabilidad de DP baja, media o alta (37.9%), se confirmó la presencia de candelilla. En contraparte, en 2 de los 19 sitios (10.5%) en donde la probabilidad de DP fue PA-ND, también fue encontrada. Cabe mencionar que, en este nuevo muestreo, no hubo puntos en las SPF: SLO y SLARG, también quedó excluido el municipio de El Salvador, por lo que los resultados de estos puntos aleatorios para cotejo difirieron de los dirigidos por los guías locales en los registros para el modelado.

Cuadro 1.2. Ubicación geográfica de registros históricos y recientes. Se especifica el tipo (TR) y número de registro (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), la subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de vegetación (TV), tipo de suelo (TS), pendiente del terreno (Pend, en clases) y altitud (Alt, en msnm).

TR	NR	Mun	Long	Lat	SPF	TV	TS	Pend	Alt
H	1	Maz	-101.341	24.099	SLARG	MR	Calcisol	M	1976
H	2	Maz	-101.445	24.159	SLARG	MM	Calcisol	M	2151
H	3	CdO	-101.189	24.218	ST	MR	Phaeozem	NS	1786
H	4	Maz	-101.425	24.295	ST	MM	Calcisol	NS	1757
H	5	Maz	-102.465	24.37	SLARG	MR	Calcisol	NS	1832
H	6	Maz	-102.435	24.396	SLARG	MR	Calcisol	M	1817
H	7	CdO	-101.246	24.449	ST	MM	Calcisol	F	1857
H	8	Maz	-102.077	24.468	ST	MR	Phaeozem	MF	1947
R	9	Maz	-101.345	24.098	SLARG	MM	Calcisol	M	1843
R	10	Maz	-101.676	24.299	ST	MR	Calcisol	F	1477
R	11	CdO	-101.164	24.54	ST	MR	Calcisol	M	1596
R	12	Maz	-102.026	24.65	ST	MR	Leptosol	M	1469
R	13	CdO	-101.198	24.734	ST	MR	Phaeozem	M	1830
R	14	Maz	-102.288	24.82	ST	MR	Phaeozem	E	1849
R	15	MO	-101.814	24.872	ST	MM	Leptosol	M	1792
R	16	MO	-102.071	24.902	ST	MM	Phaeozem	MF	1845
R	17	MO	-102.065	24.953	ST	MM	Calcisol	F	1922
R	18	MO	-102.181	24.981	ST	MM	Phaeozem	F	2024

Abreviaturas: Tipo de registro (TR) = histórico (H), reciente (R); Municipio (Mun) = Concepción del Oro (CdO), Mazapil (Maz), Melchor Ocampo (MO); Coordenadas: Long = longitud, Lat = latitud; Subprovincia fisiográfica (SPF) = Sierras Transversales (ST), Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande (SLARG); Tipo de suelo (TS); Tipo de vegetación (TV) = matorral rosetófilo (MR), matorral micrófilo (MM), altitud (Alt); clases de pendiente (Pen) = Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E.

Conforme a la cartografía (INEGI, 2005a), hubo cuatro tipos de vegetación en el área donde hubo DP positiva, con frecuencia de aparición en 52.1% por matorral rosetófilo, 41.7% matorral micrófilo, pastizal inducido (4.2%) y matorral crasicauale (2.1%). Sin embargo, en los puntos de cotejo (Cuadro 1.3), al igual que en los sitios de registro (Cuadro 1.2), la candelilla se distribuyó sólo en matorral rosetófilo (92.3%) y en micrófilo (7.7%). Respecto a los ocho tipos de suelo para esta misma área (INEGI, 2007), Chernozem, Castañozem, Regosol y Solonetz fueron escasos, y no se registró a la especie ni en los registros ni en el cotejo. En este sentido, los suelos más frecuentes en los 48 puntos de cotejo (Cuadro 1.3) fueron Calcisol (39.6%), seguido de Phaeozem (37.5%), Leptosol (12.5%), Solonchak (8.3%) y Regosol (2.1%). Sin embargo, la presencia de la candelilla se encontró sólo en Phaeozem (53.8%), Leptosol (30.8%) y Calcisol (15.4%). En lo que respecta a la pendiente del terreno en los sitios de registro, predominó M (44.4%), seguida de F (22.2%), NS (16.7%), MF (11.1%) y E (5.6%), mientras que los puntos de cotejo se encontraron en NS (75.0%), M (18.8%), F (4.2%) y E (2.1%). Pese a esta frecuencia, la mayor distribución de candelilla, al igual que en los registros, se encontró en M (46.2%), NS (38.5%); F y E se presentaron por igual con 7.7%. En cuanto a la distribución altitudinal, ahora se encontró en cota más baja, desde 1,285 a 2,046 msnm. La densidad poblacional general de candelilla en el área con DP fue $295,767.3 \pm 172,586 \text{ ind km}^{-2}$, aunque se encontró una densidad máxima de $540,000 \text{ ind km}^{-2}$. Respecto a la implicación de las variables del hábitat en la densidad, respecto al tipo de vegetación (MW: $p=0.000$), hubo diferencias (Cuadro 1.4), pero en relación con el tipo de suelo (KW: $H=2.85, p=0.2380$) y a la pendiente (KW: $H=3.25, p=0.3516$) no las hubo.

Respecto a la talla de las plantas entre las variables del hábitat (Cuadro 1.5), ni el tipo de vegetación (MW: $p=0.5933$) ni el de suelo (KW: $H=4.35, p=0.113$) hubo diferencias, pero para la pendiente del terreno si hubo (KW: $H=9.01, p=0.0290$); las plantas de mayor tamaño se encontraron en F, seguida de NS y M; en E se presentó la menor talla.

Cuadro 1.3. Puntos de cotejo y muestreo para candelilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Pend	Alt	PDP
1	-102.428	24.803	MAZ	Si	MR	Phaeozem	NS	1689	PB
2	-102.348	24.894	MAZ	Si	MR	Leptosol	F	1690	PB
3	-102.364	25.033	MO	No	MR	Calcisol	NS	1416	PB
4	-102.078	24.927	MO	Si	MR	Calcisol	M	1416	PM
5	-101.952	24.95	MO	Si	MM	Leptosol	M	1612	PM
6	-102.276	24.804	MAZ	Si	MR	Phaeozem	NS	1830	PM
7	-101.705	24.663	MAZ	Si	MR	Phaeozem	M	1931	PM
8	-101.974	24.625	MAZ	Si	MR	Leptosol	NS	1743	PM
9	-101.765	24.698	MAZ	No	MR	Phaeozem	M	1810	PM
10	-101.346	24.642	CdO	Si	MR	Phaeozem	M	1783	PB
11	-101.21	24.721	CdO	No	MR	Phaeozem	NS	1785	PM
12	-101.397	24.339	CdO	No	MR	Phaeozem	M	1620	PB
13	-102.081	24.497	MAZ	No	MR	Leptosol	F	1964	PB
14	-102.088	24.442	MAZ	No	PI	Phaeozem	NS	1886	PB
15	-101.54	24.367	MAZ	No	MR	Calcisol	NS	1949	PB
16	-101.381	24.405	CdO	No	MM	Calcisol	NS	1841	PB
17	-101.227	24.23	CdO	Si	MR	Phaeozem	E	1946	PM
18	-101.176	24.434	CdO	Si	MR	Phaeozem	NS	1856	PA
19	-101.688	24.374	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1951	PB
20	-101.912	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	M	1911	PB
21	-101.368	24.605	CdO	No	MC	Regosol	NS	1921	PB
22	-102.315	24.935	MAZ	No	MM	Phaeozem	NS	1542	PB
23	-102.215	24.774	MAZ	No	MR	Leptosol	NS	2012	PB
24	-101.734	24.709	MAZ	No	MM	Phaeozem	NS	1901	PB
25	-101.73	24.504	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1778	PB
26	-101.222	24.196	CdO	No	MR	Phaeozem	NS	2046	PB

Abreviaturas: Coordenadas: Long. = longitud, Lat. = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación (TV): matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Tipo de suelo (TS); Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de Distribución potencial (PDP): Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 1.3. (Continuación) Puntos de cotejo y muestreo para candelilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Pend	Alt	PDP
27	-101.914	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	NS	1908	PB
28	-101.237	24.439	CdO	No	MM	Calcisol	NS	1786	PM
29	-102.189	24.957	MO	Si	MR	Leptosol	M	1682	PM
30	-102.246	24.447	MAZ	Si	MR	Phaeozem	NS	1620	A-ND
31	-101.73	24.541	MAZ	Si	MR	Calcisol	M	1779	A-ND
32	-102.406	24.821	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1652	A-ND
33	-102.314	25.083	MO	No	MM	Solonchak	NS	1285	A-ND
34	-102.007	24.88	MO	No	MM	Solonchak	NS	1529	A-ND
35	-101.992	24.873	MO	No	MM	Solonchak	NS	1530	A-ND
36	-101.746	24.72	MO	No	MM	Calcisol	NS	1847	A-ND
37	-101.946	24.64	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1707	A-ND
38	-101.302	24.665	CdO	No	MM	Calcisol	NS	1683	A-ND
39	-101.235	24.705	CdO	No	MM	Calcisol	NS	1689	A-ND
40	-101.407	24.312	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1821	A-ND
41	-102.074	24.471	MAZ	No	MR	Phaeozem	NS	1973	A-ND
42	-102.084	24.435	MAZ	No	PI	Phaeozem	NS	1889	A-ND
43	-101.526	24.357	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1924	A-ND
44	-101.411	24.288	CdO	No	MR	Calcisol	NS	1811	A-ND
45	-101.133	24.398	CdO	No	MM	Calcisol	NS	1964	A-ND
46	-101.687	24.372	MAZ	No	MM	Calcisol	NS	1946	A-ND
47	-101.362	24.553	CdO	No	MR	Calcisol	NS	1925	A-ND
48	-101.867	24.954	MO	No	MM	Solonchak	NS	1635	A-ND

Abreviaturas: Coordenadas: Long. = longitud, Lat. = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación (TV): matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Tipo de suelo (TS); Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de Distribución potencial (PDP): Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 1.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km⁻²) de candelilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.

Variable		Densidad poblacional (ind km ⁻²)		<i>P</i>
General		295,767.3	± 172,586.6	-
Tipo de vegetación	MDR	297,555.6 _a	± 176,870.1	0.000
	MDM	260,000.0 _b	± 0.0	
Tipo de suelo	Calcisol	390,000.0	± 132,122.6	0.2380
	Leptosol	278,055.6	± 144,804.8	
	Phaeozem	266,419.8	± 207,707.5	
Pendiente	Nula o suave	293,015.7	± 203,202.3	0.3516
	Moderada	317,777.8	± 156,785.8	
	Fuerte	317,777.8	± 0.0	
	Escarpada	28,888.9	± 0.0	

Abreviaturas: Tipo de vegetación: Matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM.

Respecto a las clases de edad de estas plantas, expresado en clase de talla, el mayor porcentaje para candelilla se encontró para talla pequeña (51.6%) y mediana (24.7%), la talla muy pequeña apareció en 17.2% y la grande con 5.6%; las plantas muy grandes fueron las más escasas (0.9%). El mayor ejemplar encontrado fue de 96 cm.

Cuadro 1.5. Talla media y desviación estándar de candelilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.

Variable		Talla media (cm)			P
General		62.7	±	13.7	-
Tipo de vegetación	MDR	40.3	±	13.8	0.5933
	MDM	37.0	±	11.2	
Tipo de suelo	Calcisol	37.0	±	11.0	0.113
	Leptosol	39.8	±	13.0	
	Phaeozem	42.5	±	15.5	
Pendiente	Nula o suave	42.7 _a	±	16.6	0.0290
	Moderada	38.3 _a	±	11.7	
	Fuerte	47.2 _a	±	9.9	
	Escarpada	19.0 _b	±	0.0	

Abreviaturas: Tipo de vegetación: Matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM.

1.4 DISCUSIÓN

El uso de pocos registros en el programa MaxEnt, sólo cinco o seis, ocasiona una sobrepredicción en los modelos generados (Pearson *et al.*, 2007), sin embargo, el número usado en este trabajo se consideró adecuado, de acuerdo con lo sugerido por Phillips *et al.* (2006). Para garantizar mejorar la eficacia, evitando sesgos causados, por ejemplo, por cambios en el uso del suelo, es conveniente incluir registros propios actualizados (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011; Pearson *et al.*, 2007; Phillips *et al.*, 2006). En el modelo, 12 variables ambientales explicaron 81.6% de la distribución de la candelilla, donde las más relevantes fueron: tipo de vegetación, exposición, pendiente, altitud y cobertura vegetal. Esta especie está adaptada a condiciones áridas y semiáridas en una gama de variantes ambientales (Martínez-Salvador, 2013), en lo referente a exposición, temperatura y precipitación (Rzedowski, 1978), pero su distribución no fue homogénea.

De los tipos de vegetación en el área de estudio, los más abundantes son los matorrales xerófilos, y de estos, el matorral desértico micrófilo es el de mayor dispersión, básicamente en los terrenos dominados por los llanos (Sosa *et al.*, 2006), seguido del rosetófilo (Rzedowski, 1978); sin embargo, esta disposición no fue acorde con la distribución de la candelilla, que fue abundante en el matorral rosetófilo y apenas presente en el micrófilo. Estos resultados coinciden con Martínez-Salvador (2013), pero este autor no especifica esta proporción. También se menciona que la candelilla se distribuye en otros tipos de vegetación, tal como matorral halófilo y chaparral (Martínez-Salvador, 2013), lo cual no se confirmó en este estudio.

Respecto al suelo, CONAFOR (2010) y Martínez-Salvador (2013) mencionan que la candelilla se localiza preferentemente en terrenos calcáreos, y prefiere suelos pedregosos tipo Calcisol y Leptosol, lo cual fue corroborado para el norte de Zacatecas, aunque también se encontró, sin diferencia significativa, en Phaeozem, el cual fue el suelo más frecuente en los sitios con DP positiva, y el segundo en toda el área de estudio, después de Calcisol. Este último fue el menos abundante en los sitios con DP positiva. Con relación a la importancia de las variables topográficas, la información es escasa o inexistente. Se menciona que, en general, los sitios con pendiente mayor a 3% favorecen su presencia, en suelos de poca profundidad y pedregosos (CONAFOR, 2010; Martínez-Salvador, 2013) y en estos resultados se encontró un gradiente donde la distribución de la candelilla va, sin diferencias, entre pendiente nula o suave hasta fuerte, con menor abundancia en la escarpada. En cuanto a la altitud, Martínez-Salvador (2013) la ubica en el rango entre 460 a 2,400 m, llegando a predominar entre 700 a 1,200 m, por lo que estos resultados quedaron dentro del rango general, pero todos a mayor altitud que el rango de mayor predominio señalado por estos autores.

Respecto a la talla de las plantas entre las variables del hábitat, no se encontró información en la literatura. De manera básica, se reporta la altura media de esta especie entre 30 a 60 cm, y que puede alcanzar hasta 130 cm (Molina *et al.*, 2011) y estos resultados quedaron dentro de ese rango. Los tipos de vegetación o de suelo no tuvieron relación con la talla de candelilla, pero la pendiente del terreno sí, con menor valor en la pendiente escarpada.

La densidad media de candelilla para el norte de Zacatecas fue 295,767.3 ind km⁻² y no hay gran información en este tema; esa densidad fue baja en comparación con la de las sierras del centro del estado de Coahuila, en donde se determinaron 399,600 ind km⁻² (Flores-Del Ángel, 2013). Respecto a la distribución de tallas, hubo predominio de plantas pequeñas, lo que puede deberse a la explotación, donde frecuentemente se recolecta más de lo debido y muchas plantas, aunque maduras, se encuentran en talla reducida (Villa-Castorena, 2010).

Como recurso forestal no maderable, esta es una especie relevante para numerosas familias rurales de la región, sin embargo, no hay control en su explotación y este recurso ha estado en una situación poblacional preocupante (SEMARNAT, 1999). Respecto a la información disponible, puede haber gran discrepancia. Mientras estos resultados muestran que en sólo el 19.2% de la superficie de los cuatro municipios del norte de Zacatecas hubo distribución potencial, y sólo 0.6% correspondió a probabilidad alta, el mapa de distribución para esta especie, reportado por Molina *et al.*, (2011), marca una distribución continua para el 100% del área de estudio. Otros inconvenientes con MaxEnt, según Hirzel *et al.* (2002) y Mateo *et al.* (2011), es que puede cometer errores de comisión, adjudicando distribución potencial en sitios donde una especie no está presente (falso positivo), o lo contrario, errores de omisión, cuando adjudica la no presencia de la especie donde en verdad se encuentra (falso negativo). En este caso, además de incluir registros propios, la presencia de la especie fue cotejada en todos los sitios, incluyendo los históricos, por lo que no hubo falsos registros que pudieran ocasionar sesgos (e.g. Varela *et al.*, 2014). En este sentido, en los resultados del cotejo se confirmó su presencia sólo en 44.8% de los sitios donde el modelo de predijo la probabilidad de DP, lo cual puede ser un error de omisión, o que la especie ha desaparecido en esos puntos, ya que su hábitat está sujeto a sobrepastoreo (CONAFOR, 2010), y la especie puede estar siendo mal utilizada (Villa-Castorena, 2010). En contraparte, también se encontró en 10.5% en los sitios de PA-ND, lo que se considera un error de comisión.

En este trabajo se obtuvo información más precisa sobre la distribución potencial de la candelilla, sobre su abundancia y su talla, así como de la importancia de algunas variables del hábitat, sin embargo, su área de distribución potencial resultó muy reducida y fragmentada, y su densidad poblacional baja. Los planes de manejo deben contar con información actual y bien

documentada para garantizar un aprovechamiento sin detrimento a largo plazo. De manera natural, la distribución de las especies depende de una serie de factores ambientales y antrópicos, frecuentemente difíciles de predecir, y los modelos de distribución están sujetos a sesgos y errores, pero siguen siendo herramientas útiles (Varela *et al.* 2014). Estos resultados aportan información actual sobre la distribución y la disponibilidad de esta especie en el norte de Zacatecas, pero es necesario que se realicen estudios bien enfocados a otras zonas donde se distribuye y es utilizada.

1.5 CONCLUSIONES

El modelado para obtener la distribución potencial de la candelilla fue robusto, sin embargo, al cotejar la presencia de la especie, hubo sesgos por falsos negativos y posibles falsos positivos.

Esta especie mostró preferencias en su distribución, y fue más abundante en el matorral rosetófilo, poco presente en el área de estudio, y ausente en otros tipos de vegetación que, tal vez le sean restrictivos, al igual que algunos tipos de suelo.

En general, el área de distribución potencial fue muy reducida respecto al total del área de estudio y, dentro de esta última, su distribución no fue continua, y su densidad poblacional fue baja.

En este sentido, la disponibilidad de este recurso se consideró menor que la planteada por otros autores, por lo que se recomienda realizar estudios mejor enfocados en este tema y así garantizar su uso sustentable.

1.6 LITERATURA CITADA

- Aramburu, M. P. y Escribano, R. 2006. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Madrid. España. Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- Barsch, F. 2004. Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*): Utilization in Mexico and international trade. Medicinal Plant Conservation 9:46-50.
- Canales, G. E., Canales-Martínez, V. y Zamarrón-Rodríguez, E. M. 2006. Candelilla del desierto mexicano hacia el mundo. Biodiversitas 69:1-5.

- Cervantes-Ramírez, M. C. 2002. Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. Temas Selectos de Geografía de México. Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olguín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E. y Pineda-Velázquez, A. 1990. Provincias Fisiográficas de México. Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV. 10. 2. *Atlas Nacional de México*. Ciudad de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía. UNAM.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), United Nations Environment Program (UNEP), Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University, & The World Bank. 2005. Latin American and Caribbean Population Data Base. Version 3. Recuperado de: <http://www.na.unep.net/datasets/datalist.php3>.
- Cihlar, J., Latifovic, R., Beaubien, J., Li, Z. and Magnussen, S. 2000. Selecting representative high resolution simple image for land cover studies. Part 2: Application to estimating land cover composition. *Remote Sensing of Environment* 72:127-138.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. Técnicas de producción de plantas de candelilla por semilla, estacas e hijuelos. Foros y Encuentros/Foro Temático de Candelilla. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=1157&grupo=18>.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- ESRI. 2010. ArcGIS Desktop 10.3. Environmental System Research Institute. Palm Springs, CA.
- Flores-del Ángel, M. L., Foroughbakhch, R., Rocha-Estrada, A., Cárdenas-Ávila, M. L., Guzmán-Lucio, M. A., Hernández-Aguilar, Y. L., y Alvarado-Vázquez, M. A. 2013. Morfología, viabilidad y germinación de semillas de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.). *Phyton (Buenos Aires)* 82(2):161-167.
- GBIF. Global Biodiversity Information. Facility. Recuperado de: <https://www.gbif.org/species/3069440>.
- Gotfryd, A. and Hansell, R. I. 1985. The impact of observer bias on multivariate analyses of vegetation structure. *Oikos* 45:223-234.
- Gundale, M. J. and DeLuca, G. T. H. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management* 231(1):86–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.004>.
- Gupta, N. and Mehrotra, N. K. 1997. Potassium nutrition related biomass and wax productivity of *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. in sand culture. *Journal of the Indian Botanical Society* 76:99-101.
- Hagenmaier, R. D. 2000. Evaluation of a polyethylene-candelilla coating for “Valencia” oranges. *Postharvest Biology and Technology* 19(2):147–154.
- Hansen, M., Defries R., Townshend, J. R. G. and Sohlberg, R. 2000. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing* 21:1331-1365.
- Hernandez, P. A., Graham, C. H., Master, L. L. and Albert, D. L. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29(5):773–785. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x>.

- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. and Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15):1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>.
- Hirzel, A. H. and Le Lay, G. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology* 45(5):1372–1381. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01524.x>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2005a. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000, Serie III, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ciudad de México, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2005b. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de topografía. Escala 1:150,000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2007. Conjunto de datos Vectoriales Edafológicos. Escala 1:250,000, Serie II, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2008. Continuo de elevación nacional. Instituto Nacional de Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2012. Áreas geoestadísticas municipales. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Martínez-Salvador, M. 2013. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrarias y Pecuarías–Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Sitio Experimental La Campana. Aldama, Chihuahua, México.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M. y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84(2):217–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>.
- Pearson G. R., Raxworthy, C., Nakamura, M. and Peterson, A. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34:102–117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>.
- Phillips, S. J. 2013. A brief tutorial on Maxent. Versions: 3.3.1. Recuperado de: www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/.
- Phillips, S. J. and Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2):161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. and Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3):231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Plissock, P. y Fuentes-Castillo, T. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* 48:61–79. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>.
- Molina, R. R., Pompa, S. S., Zapata, M. A. D. L., Cantú, D. J. y Aguilar, C. N. 2011. Pasado, presente y futuro de la candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6):7–18.

- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. LIMUSA. Ciudad de México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1999. Norma Oficial Mexicana NOM-018-RECNAT-1999. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Recuperado de: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3332/1/nom-018-semarnat-1999.pdf>.
- SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales). 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.
- Sosa, M., Galarza, J. L., Lebgue, T., Soto, R. y Puga, S. 2006. Clasificación de las comunidades vegetales en la región árida del estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada* 5:53–59.
- Steinmann, V. W. 2002. Diversidad y endemismo de la familia Euphorbiaceae en México. *Acta Botánica Mexicana* 61: 61–93.
- Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. 2014. Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas* 23(1):46–53. <https://doi.org/10.7818/831>.
- Vergura, S., Acciani, G., Amoroso, V., Patrono, G. E. and Vacca, F. 2009. Descriptive and Inferential Statistics for Supervising and Monitoring the Operation of PV Plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(11):4456–4464. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.927404>.
- Villa-Castorena, M., Catalán-Valencia, E. A., Inzunza-Ibarra, M. A., González-López, M. de L. y Arreola-Ávila, J. G. 2010. Producción de plántulas de Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) mediante estacas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(1):37-47. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.07.027>.

CAPÍTULO II. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE LECHUGUILLA (*Agave lechuguilla*) EN EL NORTE DE ZACATECAS

2.1 INTRODUCCIÓN

La superficie de México está dominada por regiones áridas y semiáridas, básicamente constituidas por lomeríos, grandes planicies y montañas aisladas (INEGI, 2008), donde la vegetación dominante es matorral xerófilo, en 40% de la superficie total del país (González-Medrano, 2003). En estos entornos, las condiciones son difíciles para la sobrevivencia de organismos silvestres (Soto *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2006), y para los habitantes humanos rurales (Cihlar *et al.*, 2000; Soto *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2006), y todos se han adaptado a esta situación. En estos climas existe flora y fauna silvestre singular (Martínez-Salvador, 2013), y destacan especies con características especiales en cuanto a producción de materiales susceptibles de aprovechamiento (López-Ibarra y Mendoza-Moreno, 2000; Soto *et al.*, 2000). Dentro de la vegetación representativa de estas zonas se encuentra la familia Agavaceae, a la cual pertenece el género *Agave* sp., común en el desierto Chihuahuense con varias especies representativas. Particularmente, la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) es una especie nativa común en los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas, Hidalgo y Querétaro, preferentemente en matorral xerófilo (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Narcia-Velasco *et al.*, 2012). Se le encuentra asociada o no con otras especies de crecimiento arrosetado y constituyen el matorral desértico rosetófilo (Rzedowski, 1978); se considera de crecimiento colonial (Nobel, 1998). Habita en suelos someros poco desarrollados y con pedregosidad, en Litosoles asociados a Rendzinas, Xerosoles y Yermosoles, en clima preferente seco y cálido con lluvias en verano, con precipitación media anual de 200 a 400 mm (Vidal-Zepeda, 1990; SNIARN, 2005); en altitud de 200 a 2,400 msnm (Reyes-Agüero, *et al.*, 2000; Pando-Moreno, *et al.*, 2004).

La lechuguilla constituye un recurso forestal no maderable que se identifica como una especie de valor económico y ambiental importante en la zona centro norte del desierto Chihuahuense. Es básico para numerosas familias rurales que dependen de su uso como medio de sustento, único o complementario (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Martínez-Salvador, 2013). Es utilizada por su fibra

desde hace 8,000 años aproximadamente (Pérez *et al.*, 2008). La diversidad de aplicaciones se fundamenta en los compuestos de las hojas, constituido un 85% de pulpa y un 15% de fibra (Jonguitud, 2005; Pérez *et al.*, 2008). La pulpa es aprovechada por sus sustancias bioactivas como timol, carvacrol, xilitol, vitamina C y saponinas; en cuanto a la fibra, es conocida comúnmente como “ixtle”, se utiliza principalmente en la industria para la fabricación de cepillos, morrales, bolsos y sogas (Pérez *et al.*, 2008; Kalan-Kaash, 2009). Su explotación siempre se ha realizado de manera tradicional (Zárate *et al.*, 1991), sin embargo, a la fecha no existen planes de manejo que aseguren su conservación y fomento a largo plazo. Existe información sobre su distribución potencial en Chihuahua, Durango, Coahuila y Zacatecas aportada por Martínez-Salvador (2013).

Este trabajo se realizó en los municipios de Concepción del Oro, El Salvador, Mazapil y Melchor Ocampo, ubicados en el norte de Zacatecas. Dentro del área de estudio, la lechuguilla se considera una especie abundante, sin embargo, no hay planes de manejo ni regulación en su extracción, y su hábitat es alterado por sobrepastoreo o por cambio en el uso del suelo (CONAFOR, 2009). Como una aproximación a una evaluación de la disponibilidad de un recurso, existen programas informáticos muy robustos, como MaxEnt, para modelar la distribución potencial de las especies. Se fundamenta en sistemas de información geográficos mediante el análisis de registros georreferenciados de presencia de la especie de interés, y su distribución utilizando una serie de variables ambientales como predictores (Phillips *et al.*, 2006). Con esto se obtiene información tanto de las variables que mejor contribuyeron a explicar el modelado, como un mapa de predicción de distribución potencial (DP) (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Una vez obtenido el mapa, el área marcada con DP se puede usar como punto de partida, y realizar estudios más enfocados a su disponibilidad, tales como su abundancia (estimada mediante su densidad poblacional), y otros atributos de la especie como su talla. El objetivo del presente trabajo fue estimar la distribución potencial de lechuguilla en el norte de Zacatecas y, con base en el área de distribución potencial, obtener su densidad poblacional y su talla, así como determinar las principales variables de influencia.

2.1.1 Objetivo general

Estimar la distribución potencial de lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y con base en la distribución potencial, evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes en el norte de Zacatecas.

2.1.2 Objetivos particulares

- Modelar la distribución potencial de lechuguilla en cuatro municipios del norte de Zacatecas y cotejar en campo esta distribución.
- Evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes con base en la distribución potencial.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Área de estudio

El trabajo se realizó en el norte del estado de Zacatecas, abarcando los municipios de Mazapil, Melchor Ocampo, Concepción del Oro y El Salvador, con una extensión total de 17,075 km² (Figura 2.1). Incluye la extensión total o parcial de tres subprovincias fisiográficas (SPF): Sierras Transversales (ST), Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande (SLARG) y Sierras y Llanuras Occidentales (SLO) (Cervantes-Zamora *et al.*, 1990).

En esta región son comunes los climas árido y semiárido, donde la temperatura media anual fluctúa de 18 a 22°C y la precipitación de 125 a 400 mm. Existen porciones reducidas de clima muy árido y templado (SNIARN, 2005). Los tipos de vegetación nativos están adaptados a la aridez (Rzedowski, 1978) y, de acuerdo con su abundancia, son: 1) seca, compuesta por matorrales xerófilos (micrófilo, rosetófilo, crasicaule, chaparral, mezquital) en su mayor

extensión, así como pastizal natural, vegetación halófila, y pastizal gipsófilo y halófilo, 2) templada, compuesta por bosques de pino y, 3) antrópica, presente en áreas agrícolas (INEGI, 2005a). Los principales tipos de suelo son: Calcisol, Chernozem, Castañozem, Leptosol, Regosol, Phaeozem, Solonchak y Solonetz (INEGI, 2007). La altitud fluctúa entre 1,239 a 3,166 msnm, en terrenos que van desde planos a escarpados (INEGI, 2008).

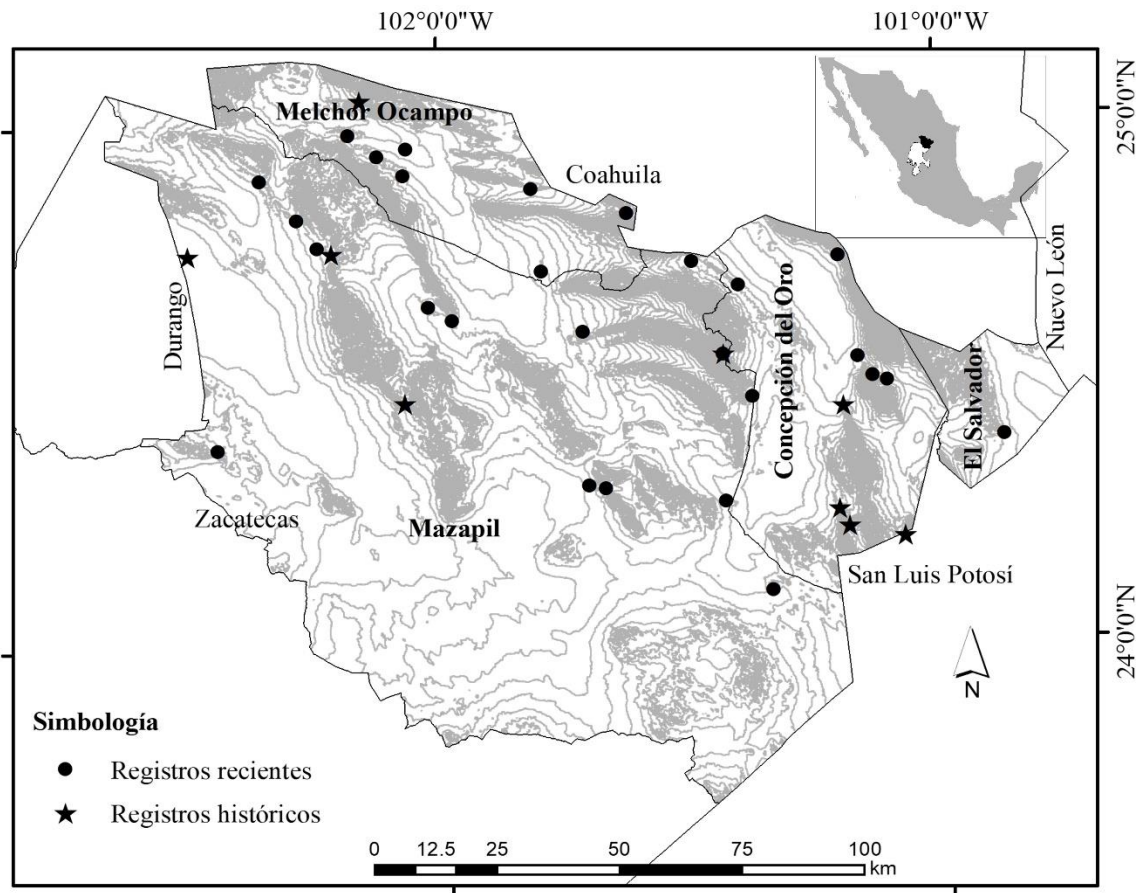


Figura 2.1. Área de estudio con límites estatales y municipales, donde se muestran los registros de lechuguilla, tanto históricos como recientes

2.2.2 Distribución potencial

Se obtuvieron 27 registros nuevos en dos salidas de campo entre junio y agosto de 2016, con la ayuda de guías locales. También se usó la información de 9 sitios con registros históricos

(anteriores a 2011) obtenidos de *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF; www.gbif.org). Todos los puntos fueron georreferenciados con un geoposicionador (GPS, Garmin © modelo Etrex 10). Para estimar la distribución potencial (DP) de lechuguilla se empleó el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k siguiendo las especificaciones de Phillips (2013), con los 36 registros de presencia y el uso de 27 variables ambientales como predictores: 19 variables bioclimáticas (Hijmans *et al.*, 2005), tres del modelo digital de elevación: pendiente, modelo digital de elevación (MDE), y exposición (INEGI, 2008). También se incluyó la SPF tomadas de Cervantes-Zamora *et al.* (1990), índice topográfico (INEGI, 2005b), tipo de vegetación (INEGI, 2005a), así como la cobertura de la misma (Hansen *et al.*, 2000) y densidad poblacional humana (CIAT *et al.*, 2005). La escala utilizada fue 1: 250 000. Las capas se unificaron a una resolución de 1 km² (0.01 grados).

Con MaxEnt se obtuvo el área bajo la curva (AUC) generada por el algoritmo (Hernandez *et al.*, 2006) y el mapa promedio que se reclasificó en ArcMap 10.3 (ESRI, 2010), considerando cuatro niveles de probabilidad: 1) alta, 2) media, 3) baja y 4) ausente o no detectada. Para ello se consideró el umbral de corte del mínimo de presencia de los puntos de entrenamiento de 0.2932, aportado por el mismo modelo. Con este mapa y estos niveles se calculó el área de distribución potencial para la especie, expresada en porcentaje del área total.

2.2.3 Abundancia de lechuguilla

El mapa de DP obtenido de MaxEnt se usó como nuevo punto de partida en cuanto al área a explorar. Mediante el programa informático ArcGIS 10.3 (ESRI, 2010) se eliminaron las zonas con cambios en el uso del suelo, donde la vegetación nativa fue eliminada por motivos antrópicos. En este mapa resultante se obtuvieron 33 puntos de verificación aleatorios en donde hubo probabilidad de DP de la especie, y otros 15 en donde no la hubo. Estos 48 nuevos sitios tuvieron una separación de al menos 5 km, y fueron localizados en campo mediante el uso de un geoposicionador Garmin© modelo Etrex 10 entre los meses de febrero y marzo de 2017, para corroborar la presencia de lechuguilla. Cuando la lechuguilla fue localizada, se procedió a realizar muestreos sobre su disponibilidad, considerando su abundancia mediante densidad poblacional (expresada en individuos por kilómetro cuadrado), y su talla media (en cm). En estos

sitios se realizaron parcelas de 20x20m (400 m²), donde se obtuvo la frecuencia de aparición. Dentro de cada parcela se trazaron aleatoriamente dos subparcelas de 5x5 m, donde se midió la talla de todos los ejemplares. Con los valores promedio se formaron cinco clases: muy pequeña (<25 cm), pequeña (25-39 cm), mediana (40-53 cm), grande (54-68 cm) y muy grande (69-84 cm).

Para estimar la influencia de variables ambientales sobre la distribución, la abundancia y la talla de lechuguilla, se consideraron en campo: coordenadas geográficas (expresada en grados decimales) y la altitud del terreno (en msnm), obtenidas mediante el GPS, y la pendiente del terreno (en grados) con clinómetro Suunto, modelo PM-5. La altitud del terreno no se ajustó a lo reportado en la literatura, por lo que se consideró la amplitud de clase siguiendo el criterio de Steel y Torrie (1980), y se obtuvieron dos clases (1,239 a 2,202, y 2,203 a 3,166 msnm). La pendiente del terreno fue catalogada en cinco clases, siguiendo los criterios de Aramburu y Escribano (2006) en: nula o suave (NS = <3°), moderada (M= 3-10°), fuerte (F= >10-20°), muy fuerte (MF= >20-30°) y escarpada (E= >30°). Adicionalmente se consideraron tipo de vegetación (INEGI, 2005a) y tipo de suelo (INEGI, 2007), las SPF (Cervantes-Zamora, *et al.*, 1990) y municipio (INEGI, 2012). En los sitios donde la especie no fue localizada, dentro y fuera del mapa de DP, también se tomó información de las mismas variables tanto de campo como cartográficas.

2.2.4 Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se realizaron para la densidad y la talla de las plantas entre las diferentes variables: tipo de vegetación, tipo de suelo y pendiente. Los datos de campo no se ajustaron a una distribución normal. Cuando la normalidad de los datos no puede ser asumida, se requiere de pruebas no paramétricas (*e.g.* Gotfryd y Hansell, 1985; Gundale y Deluca, 2006), tales como Kruskal–Wallis (KW), que prueba la diferencia entre varios grupos de muestras independientes, o de resultados de muestreo de grupos independientes (*e.g.* Gundale y Deluca, 2006; Vergura *et al.*, 2009). El modelo se realizó utilizando el programa InfoStat versión 2016 (Di *et al.*, 2016), con un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$.

2.3 RESULTADOS

De acuerdo con el análisis de la curva ROC, el modelo presentó una predicción robusta ($AUC = 0.921 \pm 0.021$). Las variables: cobertura vegetal, pendiente, tipo de vegetación, SPF, precipitación total anual (Bio 12), densidad poblacional humana, rango de temperatura diurno medio (Bio 02), exposición, precipitación del trimestre más cálido (Bio 18), modelo digital de elevación, índice topográfico y rango de temperatura anual (Bio 07) contribuyeron con 88% para la generación de este modelo (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial de lechuguilla en el norte de Zacatecas.

Variable	Contribución (%)
Cobertura vegetal	14.5
Pendiente	13.9
Tipo de vegetación	13.3
SPF	7.9
Precipitación total anual (Bio 12)	7.8
Densidad poblacional humana	6.2
Rango de temperatura diurno medio (Bio 02)	5.2
Exposición	4.3
Precipitación del trimestre más cálido (Bio 18)	4.3
Modelo digital de elevación	4
Índice topográfico	3.6
Rango de temperatura anual (Bio 07)	3

La DP de la lechuguilla se encontró en 3,453 km², 20% del área de estudio, mientras que el 80% restante correspondió a la probabilidad de DP ausente o no detectada (PA-ND). Entonces, 14.5% correspondió a probabilidad de presencia baja (PB), 5% a probabilidad media (PM) y 0.5% a probabilidad alta (PA). En los nueve sitios de registros históricos se confirmó presencia, por lo

que fue un reforzante para el modelo. Para el municipio de Melchor Ocampo, con 8 registros, se encontró que en 54% de su extensión hubo probabilidad de DP, para Concepción del Oro fue en 44%, para Mazapil 10.6% y para El Salvador 19 % (Figura 2.2). En otras porciones montañosas, sobre todo en el noreste de Mazapil, noreste de Concepción el Oro y noroeste de El Salvador, el mapa de predicción mostró PA-ND. Esto mismo ocurrió en todas las zonas planas o con pendiente más suavizada, que ocupan la mayor proporción del área de estudio, donde los sitios con probabilidad de DP aparecieron frecuentemente aislados; con probabilidad alta fueron especialmente escasos y aislados.

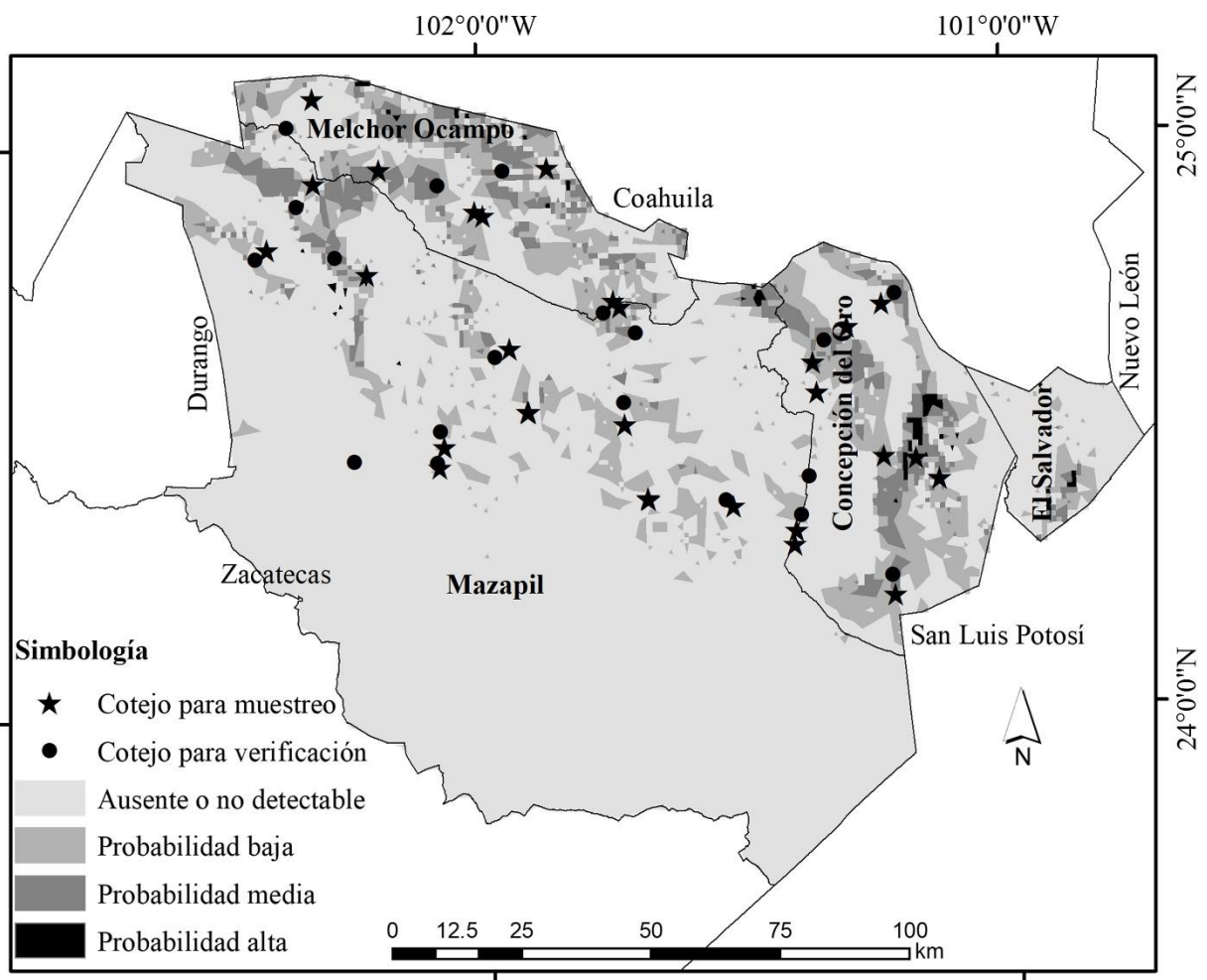


Figura 2.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de lechuguilla. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.

Respecto a la distribución entre las variables del hábitat, 89% de los registros se ubicaron en la SPF Sierras Transversales y el 11% restante en Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande. Respecto al tipo de vegetación, 67%, se encontró en matorral rosetófilo, 25% en matorral micrófilo, 5% en bosque de pino y 3% en vegetación halófila. La variable tipo de suelo no fue importante en el modelado, 36% fue encontrado en Calcisol, 39% en Leptosol y 25% en Phaeozem. De acuerdo con la pendiente del terreno, el 100% de los registros se encontraron en sitios con inclinación de moderada (M) a escarpada (E), predominando M con 61.0% seguido de F y E, con 16.7% cada una, y MF con 5.6%. La mayor concentración de puntos en cuanto a altitud (91.7%) se ubicó en el rango 1,239 a 2,202, y en 8.3% restante entre 2,203 y 3,166. En cuanto a la exposición, 36.1% se encontraron en orientación noroeste, 27.8% al noreste, 13.9% al norte al igual que el oeste y 8.3% al sureste (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Ubicación geográfica de registros históricos y recientes de lechuguilla. Se especifica el tipo de registro (TR) y número del mismo (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), la subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de vegetación, tipo de suelo (TS), pendiente (Pend, en grados), altitud (Alt, en msnm) y exposición (Exp).

TR	NR	Mun	Long	Lat	SPF	TV	TS	Pend	Alt	Exp
R	1	MAZ	-101.345	24.098	SLARG	MM	Calcisol	M	1859	NW
R	2	MAZ	-101.436	24.27	ST	MR	Leptosol	M	1843	NE
R	3	MAZ	-101.676	24.299	ST	MR	Calcisol	F	1734	N
R	4	MAZ	-101.71	24.304	SLARG	MR	Calcisol	F	1477	NE
R	5	MAZ	-102.455	24.383	SLARG	MR	Calcisol	E	1590	NW
R	6	SAL	-100.873	24.386	ST	MR	Leptosol	M	1596	NE
R	7	MAZ	-101.378	24.468	ST	MM	Leptosol	M	1469	NE
R	8	CdO	-101.106	24.494	ST	MM	Phaeozem	M	1743	NW
R	9	CdO	-101.135	24.504	ST	MR	Leptosol	M	1830	NW
R	10	CdO	-101.164	24.54	ST	MR	Calcisol	E	1771	NW
R	11	MAZ	-101.434	24.55	ST	BP	Leptosol	M	1848	N
R	12	MAZ	-101.716	24.598	ST	MR	Leptosol	M	2315	NE
R	13	MAZ	-102.026	24.65	ST	MR	Leptosol	M	1818	NE
R	14	CdO	-101.4	24.682	ST	MR	Phaeozem	E	1849	NE
R	15	MO	-101.797	24.715	ST	MM	Calcisol	MF	2009	NE
R	16	MAZ	-101.494	24.728	ST	MM	Calcisol	M	1886	NE
R	17	CdO	-101.198	24.734	ST	MR	Phaeozem	M	1796	N
R	18	MAZ	-102.248	24.766	ST	MR	Leptosol	M	2050	N
R	19	MAZ	-102.288	24.82	ST	MR	Phaeozem	E	2057	N

Abreviaturas: Tipo de registro: H = histórico, R = reciente; Municipio: CdO = Concepción del Oro, Maz = Mazapil, MO = Melchor Ocampo; Subprovincia fisiográfica: ST = Sierras Transversales, SLARG = Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande; Tipo de vegetación: MR = matorral rosetófilo, MM = matorral micrófilo, BP = bosque de pino, VH = vegetación halófila; Pendiente del terreno: M = moderada, F = fuerte, MF = muy fuerte, E = escarpada; Exposición del terreno: N = norte, NE = noreste, NW = noroeste, SE = sureste, W = oeste.

Cuadro 2.2. (Continuación) Ubicación geográfica de registros históricos y recientes de lechuguilla. Se especifica el tipo de registro (TR) y número del mismo (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), la subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de vegetación, tipo de suelo (TS), pendiente (Pend, en grados), altitud (Alt, en msnm) y exposición (Exp).

TR	NR	Mun	Long	Lat	SPF	TV	TS	Pend	Alt	Exp
R	20	MO	-101.622	24.822	ST	MR	Leptosol	M	1792	NW
R	21	MO	-101.814	24.872	ST	MM	Leptosol	MF	1845	NW
R	22	MAZ	-102.362	24.896	ST	MR	Leptosol	M	1890	NE
R	23	MO	-102.071	24.902	ST	MM	Phaeozem	E	1904	NW
R	24	MO	-102.124	24.939	ST	MR	Calcisol	F	1922	NW
R	25	MO	-102.065	24.953	ST	MM	Calcisol	F	2024	NW
R	26	MO	-102.181	24.981	ST	MM	Phaeozem	E	1934	W
R	27	MAZ	-102.455	24.383	SLARG	MR	Calcisol	M	1820	NW
H	28	MAZ	-102.509	24.756	ST	VH	Calcisol	M	1576	W
H	29	MAZ	-102.22	24.756	ST	MR	Calcisol	M	1907	W
H	30	MAZ	-102.077	24.468	ST	MR	Phaeozem	M	1976	NW
H	31	CdO	-101.189	24.218	ST	MR	Phaeozem	M	2151	W
H	32	CdO	-101.208	24.252	ST	MR	Calcisol	M	1995	SE
H	33	CdO	-101.196	24.448	ST	MR	Phaeozem	M	1793	SE
H	34	CdO	-101.078	24.197	ST	MR	Leptosol	F	2231	SE
H	35	MO	-102.157	25.047	ST	MR	Leptosol	F	1549	NW
H	36	MAZ	-101.434	24.551	ST	BP	Leptosol	M	2314	W

Abreviaturas: Tipo de registro: H = histórico, R = reciente; Municipio: CdO = Concepción del Oro, Maz = Mazapil, MO = Melchor Ocampo; Subprovincia fisiográfica: ST = Sierras Transversales, SLARG = Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande; Tipo de vegetación: MR = matorral rosetófilo, MM = matorral micrófilo, BP = bosque de pino, VH = vegetación halófila; Pendiente del terreno: M = moderada, F = fuerte, MF = muy fuerte, E = escarpada; Exposición del terreno: N = norte, NE = noreste, NW = noroeste, SE = sureste, W = oeste.

La ubicación de todos los puntos de cotejo se muestra en el Cuadro 2.3; los puntos con DP positiva se numeran del 1 al 33 y los de probabilidad ausente o no detectada del 34 al 48. En estos resultados, en 15 de los 33 sitios donde el modelo predijo probabilidad de DP baja, media o alta (45.5%), se confirmó la presencia de lechuguilla. En contraparte, en 2 de los 15 sitios (13.3%) en donde la probabilidad de DP fue PA-ND, también fue encontrada. Cabe mencionar que, en este nuevo muestreo, no hubo puntos en las SPF: SLO y SLARG, también quedó

excluido el municipio de El Salvador, por lo que los resultados de estos puntos aleatorios para cotejo difirieron de los dirigidos por los guías locales en los registros para el modelado.

Conforme a la cartografía (INEGI, 2005a), hubo cuatro tipos de vegetación en el área donde hubo DP positiva, con frecuencia de aparición en 52.1% por matorral rosetófilo, 41.7% matorral micrófilo, pastizal inducido (4.2%) y matorral crasicaule (2.1%). Sin embargo, en los puntos de cotejo (Cuadro 2.3) se distribuyó sólo en Matorral rosetófilo (86.7%), micrófilo al igual que y crasicaule con (6.7%); mientras que en los sitios de registro (Cuadro 2.2), se distribuyó en matorral rosetófilo (66.7%), en micrófilo (25.0%), en bosque de pino (5.6%) y en vegetación halófito (2.8%). Respecto a los ocho tipos de suelo para esta misma área (INEGI, 2007), Chernozem, Castañozem y Solonetz fueron escasos, y no se encontró a la especie ni en los registros ni en el cotejo. En este sentido, los suelos más frecuentes en los 48 puntos de cotejo (Cuadro 2.3) fueron Calcisol (39.6%), seguido de Phaeozem (37.5%), Leptosol (12.5%), Solonchak (8.3%) y Regosol (2.1%). Sin embargo, la presencia de la lechuguilla se encontró sólo en Phaeozem (53.3%), Leptosol (26.7%), Calcisol (13.3%) y Regosol (6.7%). En lo que respecta a la pendiente del terreno, en los sitios de registro predominó M (61.1%), seguida de F y E con 16.7% cada uno y MF (5.6%), mientras que los puntos de cotejo se encontraron en NS (75.0%), M (18.8%), F (4.2%) y E (2.1%). Pese a esta frecuencia en los puntos de cotejo, la mayor distribución de lechuguilla, al igual que en los registros, se encontró en M (46.7%), NS (33.3%); F (13.3%) y E (6.7%). En cuanto a la distribución altitudinal, en el cotejo ahora se encontró en cota más baja, de 1,285 a 2,046 msnm. Esta planta llega a ser muy abundante en algunos sitios, y se encontró una densidad máxima de 933,333.3 ind km², sin embargo, la densidad media en los 3,453 km² del área con DP, fue 315,151.4 ± 209,565 ind km². Esta planta mostró su adaptación a una gama amplia de condiciones del hábitat (Cuadro 2.4), y su densidad poblacional no mostró diferencias significativas respecto al tipo de vegetación (KW: H=1.34 $p=0.5114$), ni al tipo de suelo (KW: H=1.75, $p=0.6235$) ni a la pendiente (KW: H=5.36, $p=0.1456$).

Respecto a la talla de las plantas, las variables del hábitat (Cuadro 2.5) tuvieron implicación significativa. Respecto a los tipos de vegetación, las plantas más altas se encontraron en el matorral desértico rosetófilo (KW: H=6.35 $p=0.0416$), para los tipos de suelo fueron mayores en Calcisol, sin diferencia entre Leptosol, Phaeozem y Regosol (KW: H=45.73, $p<0.0001$). Para la

pendiente del terreno, las plantas de mayor talla se encontraron sin diferencia entre NS, M y F, pero estos valores fueron mayores que los encontrados en E (KW: $H=16.77$, $p=0.0008$).

Cuadro 2.3. Puntos de cotejo y muestreo para lechuguilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Alt	Pend	PDP
1	-102.428	24.803	MAZ	No	MR	Phaeozem	1689	NS	PB
2	-102.406	24.821	MAZ	No	MM	Calcisol	1652	NS	PB
3	-102.364	25.033	MO	Si	MR	Calcisol	1416	NS	PB
4	-102.315	24.935	MAZ	No	MM	Phaeozem	1542	NS	PB
5	-102.215	24.774	MAZ	No	MR	Leptosol	2012	NS	PB
6	-102.088	24.442	MAZ	No	PI	Phaeozem	1886	NS	PB
7	-102.084	24.435	MAZ	No	PI	Phaeozem	1889	NS	PB
8	-102.081	24.497	MAZ	Si	MR	Leptosol	1964	F	PB
9	-102.074	24.471	MAZ	No	MR	Phaeozem	1973	NS	PB
10	-101.73	24.504	MAZ	No	MM	Calcisol	1778	NS	PB
11	-101.688	24.374	MAZ	No	MM	Calcisol	1951	NS	PB
12	-101.687	24.372	MAZ	No	MM	Calcisol	1946	NS	PB
13	-101.54	24.367	MAZ	No	MR	Calcisol	1949	NS	PB
14	-101.397	24.339	CdO	Si	MR	Phaeozem	1620	M	PB
15	-101.368	24.605	CdO	Si	MC	Regosol	1921	NS	PB
16	-101.346	24.642	CdO	Si	MR	Phaeozem	1783	M	PB
17	-101.235	24.705	CdO	No	MM	Calcisol	1689	NS	PB
18	-101.222	24.196	CdO	No	MR	Phaeozem	2046	NS	PB
19	-102.348	24.894	MAZ	Si	MR	Leptosol	1690	F	PM
20	-102.276	24.804	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1830	NS	PM
21	-102.189	24.957	MO	Si	MR	Leptosol	1682	M	PM
22	-102.078	24.927	MO	Si	MR	Calcisol	1416	M	PM

Abreviaturas: Coordenadas: Long = longitud, Lat = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación: matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de distribución potencial: Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 2.3. (Continuación) Puntos de cotejo y muestreo para lechuguilla en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Alt	Pend	PDP
23	-101.974	24.625	MAZ	No	MR	Leptosol	1743	NS	PM
24	-101.952	24.95	MO	Si	MM	Leptosol	1612	M	PM
25	-101.914	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	1908	NS	PM
26	-101.912	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	1911	M	PM
27	-101.734	24.709	MAZ	No	MM	Phaeozem	1901	NS	PM
28	-101.237	24.439	CdO	No	MM	Calcisol	1786	NS	PM
29	-101.765	24.698	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1810	M	PA
30	-101.705	24.663	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1931	M	PA
31	-101.227	24.23	CdO	Si	MR	Phaeozem	1946	E	PA
32	-101.21	24.721	CdO	Si	MR	Phaeozem	1785	NS	PA
33	-101.176	24.434	CdO	Si	MR	Phaeozem	1856	NS	PA
34	-102.314	25.083	MO	No	MM	Solonchak	1285	NS	A-ND
35	-102.246	24.447	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1620	NS	A-ND
36	-102.007	24.88	MO	No	MM	Solonchak	1529	NS	A-ND
37	-101.992	24.873	MO	No	MM	Solonchak	1530	NS	A-ND
38	-101.946	24.64	MAZ	No	MM	Calcisol	1707	NS	A-ND
39	-101.867	24.954	MO	No	MM	Solonchak	1635	NS	A-ND
40	-101.746	24.72	MO	No	MM	Calcisol	1847	NS	A-ND
41	-101.73	24.541	MAZ	Si	MR	Calcisol	1779	M	A-ND
42	-101.526	24.357	MAZ	No	MM	Calcisol	1924	NS	A-ND
43	-101.411	24.288	CdO	No	MR	Calcisol	1811	NS	A-ND
44	-101.407	24.312	MAZ	No	MM	Calcisol	1821	NS	A-ND
45	-101.381	24.405	CdO	No	MM	Calcisol	1841	NS	A-ND
46	-101.362	24.553	CdO	No	MR	Calcisol	1925	NS	A-ND
47	-101.302	24.665	CdO	No	MM	Calcisol	1683	NS	A-ND
48	-101.133	24.398	CdO	No	MM	Calcisol	1964	NS	A-ND

Abreviaturas: Coordenadas: Long = longitud, Lat = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación: matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de distribución potencial: Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 2.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km⁻²) de lechuguilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.

Variable		Densidad poblacional (ind km ²)			<i>P</i>
General		315,151.4	±	209,565.0	-
Tipo de vegetación	MC	133,333.3	±	96,856.8	0.5114
	MDR	215,369.2	±	143,491.5	
	MDM	346,666.7	±	0.0	
Tipo de suelo	Calcisol	134,909.1	±	91,887.7	0.6235
	Leptosol	172,034.6	±	153,730.6	
	Phaeozem	195,151.5	±	125,780.6	
	Regosol	113,333.3	±	86,856.8	
Pendiente	Nula o suave	241,414.1	±	177,971.3	0.1456
	Moderada	213,838.4	±	162,921.0	
	Fuerte	134,909.1	±	91,168.3	
	Escarpada	108,484.8	±	0.0	

Abreviaturas: Tipo de vegetación: Matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM; matorral crasicaule = MC.

Respecto a las clases de edad de estas plantas, expresado en clase de talla, el mayor porcentaje se encontró para talla pequeña (45.2%), grande (20.6%) y mediana (19.0%), las plantas muy pequeñas (10.8%) y muy grandes (4.4%) fueron las más escasas. El mayor ejemplar encontrado fue de 84 cm.

Cuadro 2.5. Talla media y desviación estándar de lechuguilla para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.

Variable		Talla media (cm)			P
General		41.6	±	15.4	-
Tipo de vegetación	MC	37.64 _b	±	9.87	0.0416
	MDR	42.15 _a	±	15.74	
	MDM	33.32 _b	±	8.36	
Tipo de suelo	Calcisol	54.17 _a	±	17.47	<0.0001
	Leptosol	40.81 _b	±	13.19	
	Phaeozem	39.29 _b	±	14.56	
	Regosol	37.64 _b	±	9.87	
Pendiente	Nula o suave	42.28 _a	±	16.07	0.0008
	Moderada	41.07 _a	±	14.14	
	Fuerte	44.64 _a	±	14.97	
	Escarpada	29.88 _b	±	11.56	

Abreviaturas: Tipo de vegetación: Matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM; matorral crasicaule = MC.

2.4 DISCUSIÓN

Para el modelado en este trabajo usando el programa MaxEnt, se usaron 36 registros, lo cual se considera un número adecuado que no subestima la distribución potencial (Phillips *et al.*, 2006) ni sobreestima (Pearson *et al.*, 2007). También pueden ocurrir sesgos derivados de imprecisión en la cartografía base, o por cambios en el uso del suelo, es recomendable incluir registros propios actualizados (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011; Pearson *et al.*, 2007; Phillips *et al.*, 2006). Para este modelo, las variables ambientales cobertura vegetal, pendiente, tipo de vegetación, SPF, precipitación total anual (Bio 12), densidad poblacional humana, rango de temperatura diurno medio (Bio 02), exposición, precipitación del trimestre más cálido (Bio 18), modelo digital de elevación, índice topográfico y rango de temperatura anual (Bio 07) explicaron

88% de la distribución de la lechuguilla, y el modelo presentó una predicción robusta ($AUC = 0.921 \pm 0.021$).

Estos resultados confirmaron la adaptación de la lechuguilla a condiciones áridas y semiáridas en una gama de variantes ambientales reportada por Rzedowski (1978), en lo referente a suelo, exposición, temperatura, precipitación y por Martínez-Salvador *et al.* (2006) para tipos de vegetación, sin embargo, su distribución no fue homogénea. Los tipos de vegetación más abundantes en el área de estudio son diferentes tipos de matorrales xerófilos y, de estos, el matorral desértico micrófilo es el de mayor dispersión, presente básicamente en zonas de llanos (Sosa *et al.*, 2006), al que le sigue en abundancia el matorral rosetófilo (Rzedowski, 1978). Sin embargo, esta disposición no fue acorde con la distribución de la lechuguilla, que fue abundante en el matorral micrófilo y seguido de rosetófilo y crasicale. Estos resultados coinciden con Martínez-Salvador (2013), pero este autor no especifica esta proporción. Respecto al suelo, Rzedowski (1978) menciona que se localiza preferentemente en terrenos derivados de rocas sedimentarias ricas en carbonato de calcio, tales como Calcisol y Leptosol (INEGI, 2004). Esto fue corroborado para el norte de Zacatecas, aunque también se encontró, sin diferencia significativa, en Phaeozem. Este último fue el suelo más frecuente en los sitios con DP positiva, y el segundo en toda el área de estudio, después de Calcisol. Regosol fue el suelo menos abundante y en el que presentó la menor densidad poblacional. También está presente en otros tipos de suelo como Litosoles (Martínez, 2013), lo cual no fue confirmado. Relativo a la pendiente del terreno, Martínez *et al.* (2006) menciona que tiene preferencias por pendientes prolongadas, hasta de 45%, pero también se le encuentra en lomeríos y planicies. Estos resultados confirman esta amplitud y la lechuguilla se encontró, sin diferencias, en pendiente desde NS hasta E, con menor abundancia en la escarpada. En cuanto a la altitud, se ubicó en el rango mencionado por Reyes-Agüero *et al.* (2000) y Pando-Moreno *et al.* (2004), aunque todos los sitios estuvieron a mayor altitud que el rango de mayor predominio señalado por estos autores.

Respecto a la talla de estas plantas, no se encontró información en la literatura respecto a la influencia de las variables del hábitat. Su talla fluctúa entre 20 a 70 cm (Reyes *et al.*, 2000; Martínez-Burciaga, 2011), aunque en los resultados se encontró un margen más amplio, donde la

clase de talla muy grande fue de 69 a 84 cm, cuyo límite superior correspondió a la del mayor ejemplar registrado. Se encontró relación significativa respecto a las tres variables consideradas. Para tipo de vegetación se encontraron las plantas de mayor tamaño en el matorral desértico rosetófilo, en suelo fue en Calcisol mientras que en la pendiente fue en F, NS y M, sin diferencia entre ellas, pero mayores que en E. Estos resultados son una nueva contribución sobre caracterización de esta especie.

La lechuguilla, al ser de crecimiento colonial, llega a ser una planta muy abundante en algunos sitios particulares (Nobel, 1998), lo cual fue confirmado, y se encontró una densidad máxima de más de 900,000 ind km⁻². Sin embargo, su densidad media fue 315,151.4 ind km⁻², la cual fue baja en comparación con los 5,000,000 ind km⁻² en el estado de Coahuila (De la Cerda-Suárez, 2012).

La lechuguilla es un recurso forestal no maderable fundamental para numerosas familias rurales de la región, sin embargo, no hay control en su explotación y ha estado en una situación poblacional decadente (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Martínez-Salvador, 2013). Respecto a su disponibilidad puede haber gran discrepancia; mientras estos resultados muestran que en sólo el 20% del área hubo DP, y sólo 0.5% correspondió a PA, el mapa de distribución citado por De la Cerda-Suárez (2012), presenta una distribución continua en el 100% de la superficie de los cuatro municipios del norte de Zacatecas.

El programa MaxEnt, según Hirzel y Lay. (2008) y Mateo *et al.* (2011), puede cometer errores de comisión, adjudicando DP en sitios donde una especie no está presente (falso positivo), o errores de omisión, cuando adjudica la no presencia de la especie donde en verdad se encuentra (falso negativo). Para este trabajo, además de incluir registros propios, la presencia de la especie fue cotejada en todos los sitios, incluyendo los históricos, por lo que no hubo falsos registros que pudieran ocasionar sesgos (*i.e.* Varela *et al.*, 2014). Sin embargo, durante el cotejo, se confirmó su presencia sólo en 45.5% de los sitios donde el modelo de predijo la probabilidad de DP, lo cual puede ser un error de omisión, o que la especie ha desaparecido en esos puntos por motivos antrópicos (Castillo-Quiroz, 2013). En contraparte, también se encontró en 13.3% en los sitios de PA-ND, lo que se considera un error de comisión.

Las especies dependen de una combinación de factores ambientales, frecuentemente difíciles de predecir, a los que se suman los antrópicos. Por su parte, los modelos de DP están sujetos a sesgos y errores, pero siguen siendo herramientas útiles (Varela *et al.*, 2014). Estos resultados aportan información nueva y más precisa sobre la DP de la lechuguilla, así como sobre su abundancia y su talla, y la importancia de algunas variables del hábitat. Su área de DP resultó muy reducida y fragmentada, y su densidad poblacional menor a la reportado para Coahuila, por lo que se debe contar con planes de manejo que incluyan información actualizada y bien documentada para garantizar un aprovechamiento a largo plazo. Estos resultados aportan información actual sobre la distribución y la disponibilidad de esta especie en el norte de Zacatecas, pero es necesario que se realicen estudios mejor enfocados a otras zonas donde se distribuye y es utilizada.

2.5 CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelado robusto para obtener la DP de la lechuguilla en el norte de Zacatecas, sin embargo, hubo sesgos por falsos negativos y posibles falsos positivos al cotejar su presencia. Se confirmó su adaptabilidad a las condiciones del área de estudio, donde no mostró preferencias en su distribución entre tipos de vegetación y de suelo, ni en la pendiente del terreno y altitud.

Respecto al total del área de estudio, la DP fue muy reducida, su distribución no fue continua y su densidad poblacional fue baja. En este sentido, la disponibilidad de este recurso se consideró menor que la planteada por otros autores, por lo que se recomienda realizar estudios mejor enfocados en este tema y así garantizar su uso sustentable.

2.6 LITERATURA CITADA

Aramburu, M.P. y R. Escribano 2006. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Secretaria General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pp. 917.

- Castillo-Quiroz, D., J.T. Sáenz-Reyes, M. Narcia-Velasco y J.A. Vázquez Ramos. 2013. Propiedades físico-mecánicas de la fibra de Agave lechuguilla Torr. de cinco procedencias bajo plantaciones. *Revista mexicana de ciencias forestales* 4(19):78-91.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), United Nations Environment Program (UNEP), Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University & The World Bank. 2005. Latin American and Caribbean Population Data Base. Versión 3. <http://gisweb.ciat.cgiar.org/population/dataset.htm>.
- Cervantes-Zamora, Y., S.L. Cornejo-Olguín, R. Lucero-Márquez, J.M. Espinoza-Rodríguez, E. Miranda-Viquez y A. Pineda-Velázquez. 1990. Provincias Fisiográficas de México. Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV. 10. 2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía. UNAM. Ciudad de México.
- Cihlar, J., R. Latifovic, J. Beaubien, Z. Li and S. Magnussen. 2000. Selecting representative high resolution simple image for land cover studies. Part 2: Application to estimating land cover composition. *Remote Sensing of Environment* 72:127-138.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2009. Técnicas de producción de plantas de lechuguilla por semilla, estacas e hijuelos. Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx/ImasD/>.
- De la Cerda Suárez, P.C. 2012. Caracterización y aprovechamiento de residuos del tallado *A. lechuguilla* Torrey (guishe). Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- ESRI. 2010. ArcGIS Desktop 10.3. Environmental System Research Institute. Palm Springs, CA.
- GBIF. Global Biodiversity Information. www.gbif.org.
- González-Medrano, F. 2003. Las comunidades vegetales de México. Propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México. Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/421.pdf>.
- Gotfryd, A. and Hansell, R. I. 1985. The impact of observer bias on multivariate analyses of vegetation structure. *Oikos* 45:223-234.

- Gundale, M. J. and DeLuca, G. T. H. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management* 231(1):86–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.004>.
- Hansen, M., R. Defries, J.R.G. Townshend and R. Sohlberg. 2000. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing* 21:1331-1365.
- Hernandez, P.A., C.H. Graham, L.L. Master and D.L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29:773-785.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978.
- Hirzel A. and G. Lay. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology* 45:1372-1381.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2004. Guía para la interpretación de cartografía edafológica. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2005a. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000, Serie III, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ciudad de México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2005b. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de topografía. Escala 1:150,000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2007. Conjunto de datos Vectoriales Edafológicos. Escala 1:250,000, Serie II, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2008. Continuo de elevación nacional. Instituto Nacional de Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2012. Áreas geoestadísticas municipales. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

- Jonguitud, E. 2005. Vivir de la lechuguilla, una opción para los habitantes del semidesierto. México Forestal. Revista electrónica de la Comisión Nacional. <http://www.mexicoforestal.gob.mx>
- Kalan-Kaash, S.C. 2009. Consultoría: Estudio orientado a identificar los mercados y canales de comercialización internacionales para la oferta de productos de ixtle con valor agregado. Integradores de ixtleros de Zacatecas S.A. de C.V. SAGARPA. Zacatecas, México.
- López-Ibarra, J.C. y S.R. Mendoza-Moreno. 2000. Cuantificación de taninos condensados de corteza y madera en la especie sangre de drago (*Jatropha dioica*). Revista Chapingo: Serie Zonas Áridas 1:1-6.
- Martínez-Burciaga, O.U., D. Castillo-Quiroz y O. Mares Arreola. 2011. Caracterización y selección de sitios para plantaciones de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) en el estado de Coahuila. Folleto técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Experimental Saltillo. Saltillo, Coahuila, México.
- Martínez-Salvador, M. 2013. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias–Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Sitio Experimental La Campana. Aldama, Chihuahua, México.
- Martínez-Salvador, M., D. Hermosillo Rojas, A. Mojica Guerrero, J. Prieto Amparan. 2006. Potencial productivo y zonificación para el uso y manejo de especies forestales de zonas áridas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Centro Experimental La Campana. Chihuahua.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M. y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. Revista Chilena de Historia Natural 84(2):217–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>.
- Narcia-Velasco, M., D. Castillo-Quiroz, J.A. Vázquez-Ramos y C.A. Berlanga-Reyes. 2012. Turno técnico de la lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) en el noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 3(9):81-88.
- Nobel, P.S. 1998. Los incomparables Agaves y Cactus. Editorial Trillas. Ciudad de México.

- Pando-Moreno, M., O. Eufrazio, E. Jurado and E. Estrada. 2004. Post-harvest growth of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Agavaceae) in northeastern México. *Economic Botany* 58 (1):78-82.
- Pearson, R.G., C.J. Raxworthy, M. Nakamura and A.T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34:102-117.
- Pérez, C., Sáenz, A. y Barajas, L. 2008. La química verde como herramienta indispensable en el aprovechamiento integral y sustentable de los recursos del semidesierto mexicano. En: fitoquímicos sobresalientes del semidesierto mexicano: de la planta a los químicos naturales y a la biotecnología. Editorial Path Design S. A. México. Pp. 67-82.
- Phillips, S. J. 2013. A brief tutorial on Maxent. Versions: 3.3.1. Recuperado de: www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling in species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190:231-259.
- Pliscoff, P. and T. Fuentes-Castillo. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* 48:61-79.
- Reyes-Agüero, J.A, J.R. Aguirre y C.B. Peña. 2000. Biología y Aprovechamiento de *Agave lechuguilla* Torr. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 67:75-88.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. LIMUSA. Ciudad de México.
- SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales). 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.
- Sosa, M., J.L. Galarza, T. Lebgue, R. Soto y S. Puga. 2006. Clasificación de las comunidades vegetales en la región árida del estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada* 5:53-59.
- Soto C., R., C. Castañeda, L. Garibay y A. Parra. 2000. Manual de educación ambiental para comunidades del desierto Chihuahuense. Facultad de Zootecnia. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H. 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 2nd edition. McGraw-Hill. New Yor. 620 p.

- Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. 2014. Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas* 23(1):46–53. <https://doi.org/10.7818/831>.
- Vergura, S., Acciani, G., Amoruso, V., Patrono, G. E. and Vacca, F. 2009. Descriptive and Inferential Statistics for Supervising and Monitoring the Operation of PV Plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(11): 4456–4464. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.927404>.
- Vidal-Zepeda, R. 1990. Precipitación media anual en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Volumen II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Zárate, L.A., C.A. Berlanga-Reyes y H. Franco L. 1991. Análisis dimensional en lechuguilla. In: III Simposio Nacional sobre ecología, manejo y domesticación de plantas útiles del Desierto. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Saltillo. México.

CAPÍTULO III. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y ABUNDANCIA DE SOTOL (*Dasyllirion cedrosanum*) EN EL NORTE DE ZACATECAS

3.1 INTRODUCCIÓN

En México, 52% de su superficie continental corresponde a regiones áridas y semiáridas constituidas básicamente por lomeríos y grandes planicies, con montañas aisladas (INEGI, 2008) y la vegetación dominante es matorral xerófilo (González-Medrano, 2003). En estas regiones hay condiciones de precipitación restringidas y la sobrevivencia es difícil para los habitantes rurales (Cihlar *et al.*, 2000; Soto *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2006), y para los organismos silvestres, los cuales deben tener adaptaciones especiales a estas condiciones (Soto *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2006). Pese a esto, hay diversas especies vegetales susceptibles de aprovechamiento (López-Ibarra y Mendoza-Moreno, 2000; Soto *et al.*, 2000). Una de estas especies es *Dasyllirion cedrosanum*, conocida como sotol, el cual ha tenido especial relevancia por su uso en la fabricación de aguardiente (Melgoza-Castillo y Sierra-Tristán, 2003; Martínez-García, 2013), así como en la alimentación, medicina, productos ornamentales, elaboración de cestería, construcción de cercas, forraje para el ganado, así como la extracción de inulina para la industria farmacéutica (Martínez-Salvador, 2013; Martínez-García, 2013). Su principal importancia ecológica es el mantenimiento del suelo y como alimento para la fauna (Reyes-Valdés *et al.*, 2012; Martínez-Salvador, 2013).

En México, el sotol se distribuye desde los bordes orientales y valles intermedios de la Sierra Madre Occidental hasta y los bordes occidentales y valles de la Sierra Madre Oriental (Henrickson y Johnston, 1986; Bogler, 1994), donde es común en matorral rosetófilo espinoso (Marroquín *et al.*, 1981).

Para el norte de Zacatecas no hay registros de uso para la bebida fermentada (también llamada “sotol”), pero tiene otros usos, principalmente como forraje (Robles- Esparza *et al.*, 2012). Su uso no está regulado y no se conoce su situación poblacional; se cuenta con investigaciones sobre su distribución geográfica y taxonomía a nivel país (Reyes-Valdés *et al.*, 2012), pero el norte de Zacatecas ha sido poco estudiado. Los programas informáticos robustos, como MaxEnt,

permiten modelar la distribución potencial (DP) de las especies (Phillips *et al.*, 2006), y esto es una herramienta valiosa en la evaluación de la disponibilidad de un recurso.

Mediante sistemas de información geográficos y registros georreferenciados de presencia de la especie de interés, modela su distribución utilizando variables ambientales como predictores. Aporta información de las variables que mejor contribuyeron a explicar el modelado, así como un mapa de predicción de DP (Phillips y Dudík, 2009). El objetivo del presente trabajo fue estimar la distribución potencial del sotol en el norte de Zacatecas y, con base en el área de DP, estimar su disponibilidad mediante su densidad poblacional y su talla, así como determinar las principales variables de influencia.

3.1.1 Objetivo general

Estimar la distribución potencial de sotol (*Dasyilirion cedrosanum*) y con base en la distribución potencial, evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes en el norte de Zacatecas.

3.1.2 Objetivos particulares

- Modelar la distribución potencial de sotol en cuatro municipios del norte de Zacatecas y cotejar en campo esta distribución.
- Evaluar su disponibilidad mediante la estimación de su densidad poblacional y de su talla, así como las variables ambientales más relevantes con base en la distribución potencial.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Área de estudio

El trabajo se realizó en los municipios de Mazapil, Melchor Ocampo, Concepción del Oro y El Salvador, en el norte del estado de Zacatecas, que suman una extensión de 17,075 km² (Figura 3.1). Se incluye total o parcialmente a tres subprovincias fisiográficas (SPF): Sierras Transversales (ST), Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande (SLARG) y Sierras y Llanuras Occidentales (SLO) (Cervantes-Zamora *et al.*, 1990). Los tipos de clima son árido y semiárido, con la temperatura media anual entre de 18 a 22°C y precipitación de 125 a 400 mm; existen porciones reducidas de clima muy árido y templado (SNIARN, 2005). Predominan los tipos de vegetación xerófilos (Rzedowski, 1978) que, de acuerdo con su abundancia, son: 1) seca, compuesta por matorrales xerófilos (micrófilo, rosetófilo, crasicale, chaparral, mezquital) en su mayor extensión, así como pastizal natural, vegetación halófila, y pastizal gipsófilo y halófilo, 2) templada, compuesta por bosques de pino y, 3) antrópica, presente en áreas agrícolas (INEGI, 2005a). Los principales tipos de suelo son: Calcisol, Chernozem, Castañozem, Leptosol, Regosol, Phaeozem, Solonchak y Solonetz (INEGI, 2007). La altitud fluctúa entre 1,239 a 3,166 msnm, en terrenos que van desde planos a escarpados (INEGI, 2008).

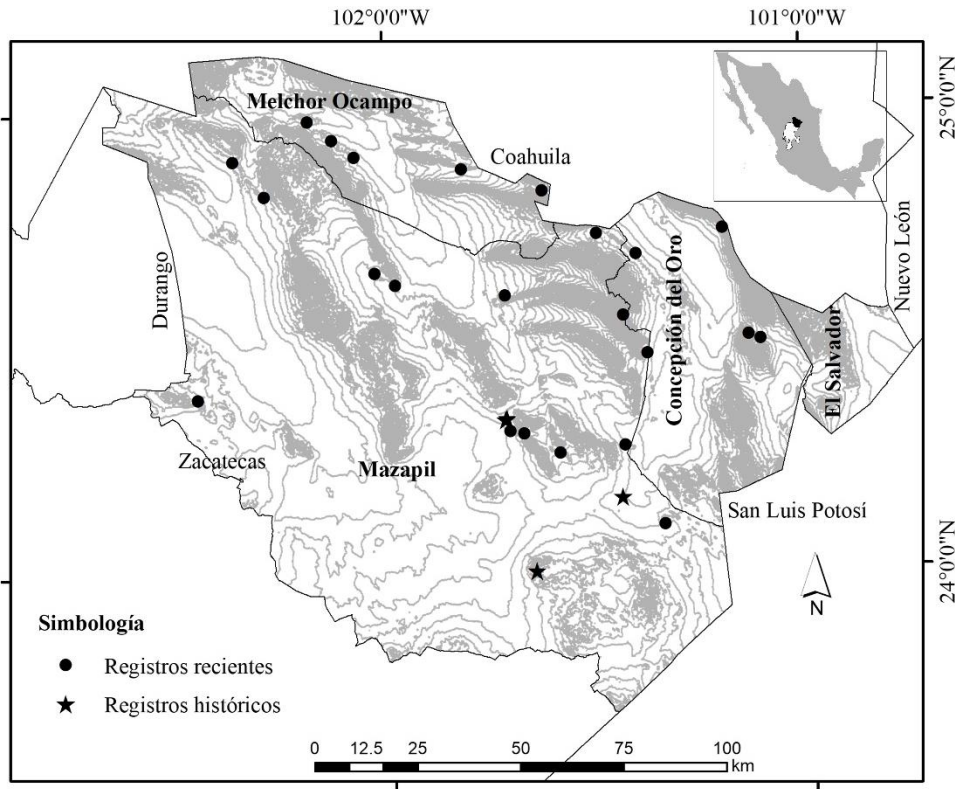


Figura 3.1. Área de estudio con límites estatales y municipales donde se muestran los registros de sotol, tanto históricos como recientes.

3.2.2 Distribución potencial

En dos salidas de campo entre junio y agosto de 2016, contando con el apoyo de guías locales, se obtuvieron 23 registros nuevos de sotol. También se usó la información de 4 sitios anteriores a 2011 (registros históricos) obtenidos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF; www.gbif.org). Estos 27 puntos fueron georreferenciados in situ con un geoposicionador (GPS, Garmin © modelo Etrex 10). El algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k fue utilizado para estimar la distribución potencial (DP), según las especificaciones de Phillips (2013), con estos registros de presencia, y el uso de una serie de variables como predictores: 19 bioclimáticas (Hijmans *et al.*, 2005), modelo digital de elevación (MDE), pendiente y exposición (INEGI, 2008). También se incluyó la SPF tomadas de Cervantes-Zamora *et al.* (1990), índice topográfico (INEGI, 2005b), tipo de vegetación (INEGI, 2005a), cobertura vegetal (Hansen *et al.*, 2000) y densidad

poblacional humana (CIAT *et al.*, 2005). La escala utilizada fue 1: 250 000 y todas las capas se uniformizaron a resolución de 1 km².

Se obtuvo el área bajo la curva (AUC) (Hernandez *et al.*, 2006) y el mapa promedio generados por el algoritmo MaxEnt. Este mapa se reclasificó en ArcMap 10.3 (ESRI, 2010), considerando cuatro niveles de probabilidad: 1) alta, 2) media, 3) baja y 4) ausente o no detectada. Se consideró el umbral de corte del mínimo de presencia de los puntos de entrenamiento de 0.2983, aportado por el mismo modelo. Con este mapa y estos niveles se calculó el área porcentual de DP para el sotol para cada nivel de probabilidad.

3.2.3 Abundancia de sotol

Como aproximación para estimar la abundancia real del sotol en el norte de Zacatecas, el nuevo mapa de DP obtenido de MaxEnt ahora se usó como nueva área a explorar. Para aproximarse mejor al área real de distribución, en este nuevo mapa se eliminaron las zonas donde la vegetación nativa fue eliminada por motivos antrópicos, tales como apertura de fronteras agrícolas, urbanización, minería y vías de comunicación. Aleatoriamente, se obtuvieron 48 puntos que fueron usados para verificación en campo; de estos, 29 quedaron en las zonas donde hubo probabilidad de DP de la especie, y otros 19 en donde no la hubo. Todo lo anterior se realizó usando el programa informático ArcGIS 10.3 (ESRI, 2010). Estos nuevos sitios tuvieron una separación de al menos 5 km, y todos fueron localizados en campo mediante el uso de un geoposicionador Garmin© modelo Etrex 10 entre febrero y marzo de 2017, para corroborar o no la presencia de sotol.

En cada sitio donde la presencia de la especie fue corroborada, se procedió a realizar muestreos sobre su disponibilidad, estimando su abundancia mediante densidad poblacional (individuos km⁻²), y su talla media (en cm). La frecuencia de aparición se obtuvo en parcelas de 20x20 m (400 m²); la talla de los ejemplares se midió en dos subparcelas aleatorias de 5x5 m dentro de cada una de estas parcelas. La talla media fue dividida en cinco clases: muy pequeña (<110 cm), pequeña (110-129), mediana (130-149), grande (150-169) y muy grande (170-190).

En este nuevo muestreo se consideraron variables de posible influencia sobre la distribución, la abundancia y la talla de sotol. En campo se tomaron coordenadas geográficas (expresada en grados decimales) y la altitud del terreno (en msnm) obtenidas mediante el GPS, y la pendiente del terreno (en grados) con clinómetro Suunto, modelo PM-5. Para la altitud se propusieron dos clases (1,239 a 2,202, y 2,203 a 3,166 msnm), ajustándose a lo reportado para el área de estudio (INEGI, 2008). La pendiente del terreno fue distribuida en cinco clases, siguiendo los criterios de Aramburu y Escribano (2006) en: nula o suave (NS = $<3^\circ$), moderada (M= $3-10^\circ$), fuerte (F= $>10-20^\circ$), muy fuerte (MF= $>20-30^\circ$) y escarpada (E= $>30^\circ$). Adicionalmente se consideraron tipo de vegetación (INEGI, 2005a) y tipo de suelo (INEGI, 2007), las SPF (Cervantes-Zamora, *et al.*, 1990) y municipios (INEGI, 2012). La información tanto de las mismas variables de campo como de las cartográficas se tomó en todos los sitios donde se encontró la presencia del sotol, dentro y fuera del mapa de DP.

3.2.4 Análisis estadístico

La información de campo sobre la abundancia y la talla del sotol respecto a tipo de vegetación, tipo de suelo y pendiente fueron sometidas a análisis estadísticos. Para altitud no se realizaron estos análisis debido a que todos los datos, salvo uno, quedaron en la misma clase. En este sentido, los datos tuvieron una gran dispersión de valores y no se ajustaron a una distribución normal. Cuando la normalidad de los datos no puede ser asumida, se requiere el uso de pruebas no paramétricas (e.g. Gotfryd y Hansell, 1985; Gundale y Deluca, 2006), tales como Kruskal–Wallis (KW), que prueba la diferencia entre varios grupos de muestras independientes, o de resultados de muestreo de grupos independientes, la U de Mann-Whitney (MW) entre dos grupos (e.g. Gundale y Deluca, 2006; Vergura *et al.*, 2009). Para esto se usó el programa InfoStat versión 2016 (Di *et al.*, 2016), a un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$.

3.3 RESULTADOS

El modelo obtenido, de acuerdo con el análisis de la curva ROC, presentó una buena predicción para la especie (AUC = 0.936 ± 0.024). Las variables que más contribuyeron (87.7%) a explicar

el modelo fueron: pendiente, tipo de vegetación, cobertura vegetal, índice topográfico, exposición, estacionalidad de la precipitación, isotermalidad, modelo digital de elevación, precipitación total anual, precipitación del trimestre más húmedo, estacionalidad de la temperatura y rango de temperatura anual (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Porcentaje de contribución relativa de las variables más importantes para el modelo de distribución potencial del sotol en el norte de Zacatecas.

Variable	Contribución (%)
Pendiente	23
Tipo de vegetación	15.8
Cobertura vegetal	8.2
Índice topográfico	8
Exposición	7.4
Estacionalidad de la precipitación	6.7
Isotermalidad	4
Modelo digital de elevación	3.6
Precipitación total anual	3
Precipitación del trimestre más húmedo	2.9
Estacionalidad de temperatura	2.8
Rango de temperatura anual	2.3

El área con DP del sotol se encontró en 19.4% del área de estudio, abarcando 3,286 km²; en esta nueva área resultante, en 80.6% se encontró probabilidad de DP ausente o no detectada (PA-ND), 13.9% correspondió a probabilidad baja (PB), 5% a probabilidad media (PM) y 0.5% a probabilidad de DP alta (PA) de distribución potencial. El municipio de Melchor Ocampo tuvo la mayor superficie proporcional de probabilidad de distribución de la especie, con 661 km², que correspondió al 35% de su superficie. En Concepción del Oro abarcó 558 km², correspondiente al 23% del área total; en Mazapil fue de 2,052 km², 17% del área del municipio, mientras que,

para El Salvador, el modelado detectó la probabilidad de distribución potencial en 15 km², 2.3% de su superficie (Figura 3.1).

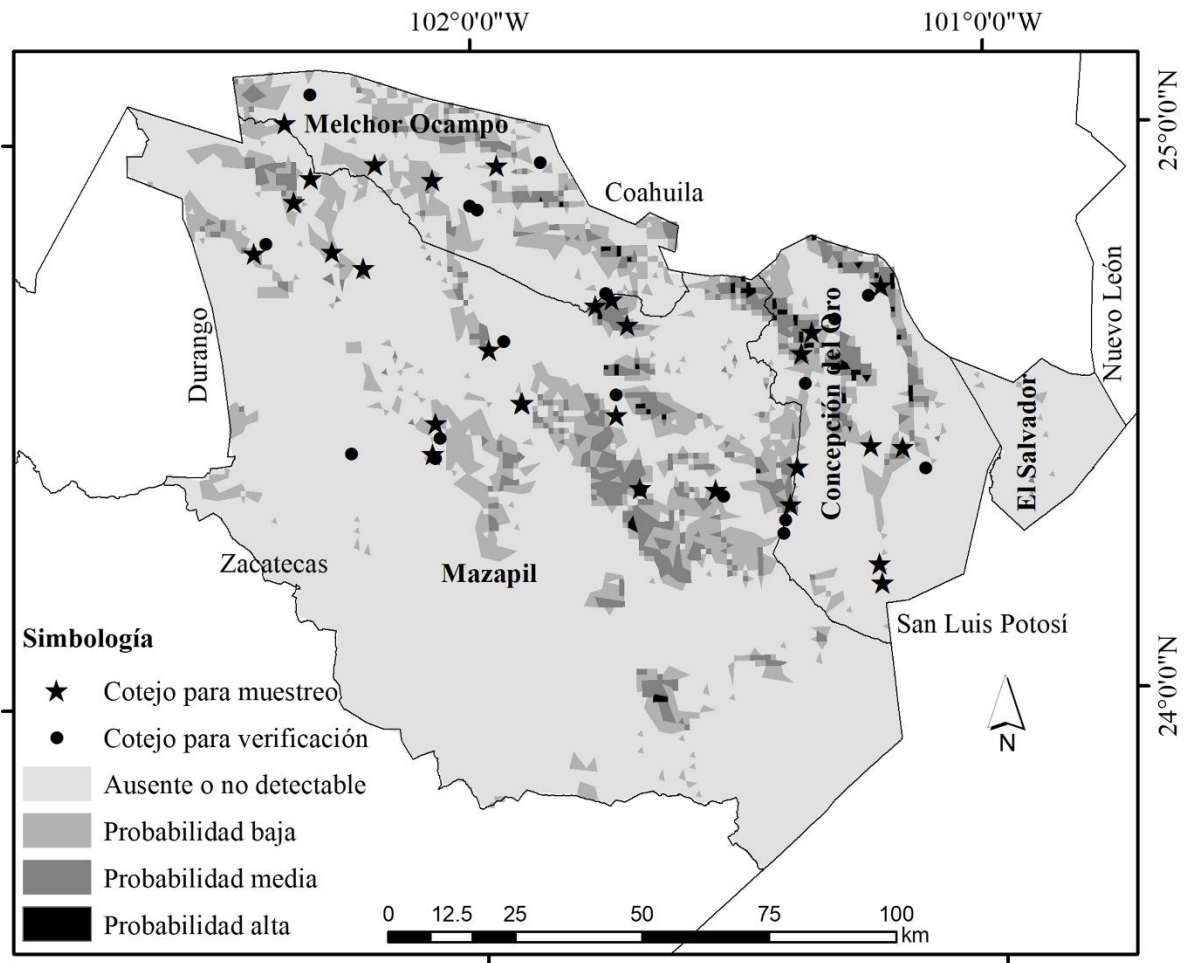


Figura 3.2. Municipios del norte de Zacatecas donde se muestran cuatro clases de probabilidad de distribución potencial de sotol. También se muestran los 48 sitios de cotejo, donde se señalan los sitios de muestreo y los de solo verificación.

Con base en los 27 sitios de registro inicial del sotol, este se encontró mayoritariamente en Mazapil (18 registros) seguido de Melchor Ocampo (5); Concepción del Oro obtuvo 4 registros y el Salvador no se presentó ninguno (Cuadro 3.2). Respecto a las variables del hábitat, 21 registros se ubicaron en la SPF Sierras Transversales (77.8%) y 6 en Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande (22.2%). De los tipos de vegetación, fue más frecuente en matorral rosetófilo (63.0%) con 17 registros, seguido de matorral micrófilo (33.3%) con 9 y bosque de

pino (3.7%), con 1 registro. Para el tipo de suelo, 11 registros se encontraron en Leptosol (40.7%), 10 en Calcisol (37.1%) y 6 en Phaeozem (22.2%). En cuanto a la exposición, ocho sitios (29.6%) se encontraron en orientación norte y otros ocho en noreste, nueve (33.3%) noroeste, y uno (3.7%) para oeste y para sureste. Respecto a la pendiente del terreno, la mayor frecuencia (40.7%) se encontró en M, con 11 registros; E (29.7%) con 8, F (18.5%) con 5, MF (7.4%) con 2, y NS (3.7%) con 1 registro. En cuanto a altitud, 26 registros (96.3%) se encontró en el rango 1,239 a 2,202 msnm, por lo que un solo registro (3.7%) se encontró entre 2,203 y 3,166 msnm (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Ubicación geográfica de los registros históricos y recientes de sotol en el norte de Zacatecas. Se especifica el tipo (TR) y número de registro (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de suelo (TS), tipo de vegetación (TV), altitud (Alt, en msnm), pendiente (Pend, en grados) y exposición (Exp).

TR	NR	Mun	Longitud	Latitud	SPF	TS	TV	Alt	Pend	Exp
R	1	Maz	-102.288	24.82	ST	Phaeozem	MR	1843	F	N
R	2	Maz	-102.362	24.896	ST	Leptosol	MR	1734	F	N
R	3	MO	-102.181	24.981	ST	Phaeozem	MM	1477	F	NE
R	4	MO	-102.124	24.939	ST	Calcisol	MR	1590	E	NW
R	5	MO	-102.071	24.902	ST	Phaeozem	MM	1596	M	NW
R	6	Maz	-102.026	24.65	ST	Leptosol	MR	1830	M	NW
R	7	Maz	-101.978	24.624	ST	Calcisol	MR	1771	E	NW
R	8	Maz	-101.716	24.598	ST	Leptosol	MR	1848	M	N
R	9	Maz	-101.434	24.55	ST	Leptosol	BP	2315	M	NE

Abreviaturas: Tipo de registro: H = histórico, R = reciente; Número del registro; Municipio: CdO = Concepción del Oro, Maz = Mazapil, MO = Melchor Ocampo; Subprovincia fisiográfica: ST = Sierras Transversales, SLARG = Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande; Tipo de vegetación: MR = matorral rosetófilo, MM = matorral micrófilo, BP = bosque de pino; Pendiente del terreno: nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E; Exposición del terreno: N = norte, NE = noreste, NW = noroeste, SW = suroeste, W = oeste.

Cuadro 3.2. (Continuación) Ubicación geográfica de los registros históricos y recientes de sotol en el norte de Zacatecas. Se especifica el tipo (TR) y número de registro (NR), municipio (Mun), coordenadas geográficas (en grados decimales), subprovincia fisiográfica (SPF), tipo de suelo (TS), tipo de vegetación (TV), altitud (Alt, en msnm), pendiente (Pend, en grados) y exposición (Exp).

TR	NR	Mun	Longitud	Latitud	SPF	TS	TV	Alt	Pend	Exp
R	10	CdO	-101.4	24.682	ST	Phaeozem	MR	1818	M	NE
R	11	MO	-101.814	24.872	ST	Leptosol	MR	1849	E	NE
R	12	MO	-101.622	24.822	ST	Leptosol	MR	2009	MF	NE
R	13	Maz	-101.494	24.728	ST	Calcisol	MM	1886	M	NE
R	14	CdO	-101.106	24.494	ST	Phaeozem	MM	2050	M	N
R	15	CdO	-101.135	24.504	ST	Leptosol	MR	2057	E	N
R	16	CdO	-101.198	24.734	ST	Phaeozem	MR	1845	M	NW
R	17	Maz	-101.378	24.468	ST	Leptosol	MM	1890	M	NE
R	18	Maz	-101.436	24.27	ST	Leptosol	MR	1904	E	NW
R	19	Maz	-101.345	24.098	SLARG	Calcisol	MM	1922	MF	NW
R	20	Maz	-101.591	24.256	ST	Leptosol	MR	2159	E	N
R	21	Maz	-101.676	24.299	ST	Calcisol	MR	2024	F	NW
R	22	Maz	-101.71	24.304	SLARG	Calcisol	MR	1934	E	W
R	23	Maz	-102.455	24.383	SLARG	Calcisol	MR	1820	M	NW
H	24	Maz	-101.717	24.333	ST	Calcisol	MM	1954	M	NE
H	25	Maz	-101.72	24.33	SLARG	Calcisol	MM	1942	NS	SW
H	26	Maz	-101.445	24.159	SLARG	Calcisol	MM	1857	F	N
H	27	Maz	-101.654	24.003	SLARG	Leptosol	MR	2162	E	N

Abreviaturas: Tipo de registro: H = histórico, R = reciente; Número del registro; Municipio: CdO = Concepción del Oro, Maz = Mazapil, MO = Melchor Ocampo; Subprovincia fisiográfica: ST = Sierras Transversales, SLARG = Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande; Tipo de vegetación: MR = matorral rosetófilo, MM = matorral micrófilo, BP = bosque de pino; Pendiente del terreno: nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E; Exposición del terreno: N = norte, NE = noreste, NW = noroeste, SW = suroeste, W = oeste.

Respecto a los puntos de cotejo (Cuadro 3.3), cuando hubo DP positiva se numeran del 1 al 29, y los de PA-ND del 30 al 48. Sólo en 11 de los 29 sitios (37.9%), donde el modelo predijo probabilidad de DP baja, media o alta se confirmó la presencia de sotol. En contraparte, en 1 de los 19 sitios (5.3%) en donde la probabilidad de DP fue PA-ND, también fue encontrado. En este nuevo muestreo no hubo puntos en el municipio de El Salvador ni en las SPF: SLO y SLARG.

Respecto a los sitios de cotejo, en el área donde hubo DP positiva, 52.1% de la superficie está ocupado por matorral rosetófilo, 41.7% por matorral micrófilo, pastizal inducido (4.2%) y matorral crasicaule en 2.1% (INEGI, 2005a). La frecuencia en la aparición del sotol no siguió directamente esta disponibilidad y en los puntos de cotejo (Cuadro 3.3) sólo se distribuyó en matorral rosetófilo (90.9%) y micrófilo con (9.1%). Los tipos de suelo Chernozem, Castañozem, Regosol, Solonetz y Solonchak fueron escasos para esta misma área (INEGI, 2007). Sin embargo, para los 48 puntos de cotejo (Cuadro 3.3), los suelos más frecuentes fueron Calcisol (39.6%), seguido de Phaeozem (37.5%) y Leptosol (12.5%). Solonchak y Regosol, aunque escasos, estuvieron respectivamente en 8.3% y 2.1% de los sitios, pero la presencia del sotol se encontró sólo en Phaeozem (54.5%), Leptosol (36.4%) y Calcisol (9.1%). En el área con DP predominó el terreno plano a ondulado, donde la frecuencia de las clases de pendiente, en estos puntos de cotejo, fueron, 48 sitios (75.0%) en NS, M (18.8%) con 9 registros, F (4.2%) con 2 y E (2.1%) con un solo registro. Pese a esta disponibilidad, el sotol se distribuyó más en M (54.5%) con 6 registros, NS y F (18.2%) con dos registros cada uno, y E (9.1%) con un solo registro. Referente a la distribución altitudinal, ahora el 100% de la frecuencia de aparición se registró entre 1,285 a 2,046 msnm.

Respecto a la abundancia del sotol en el norte de Zacatecas, particularmente en el área con DP, se encontró una densidad media de $33,103.4 \pm 12,747.4$ ind km², donde hubo gran dispersión y la densidad poblacional fluctuó de cero a una máxima de 160,000 ind km². Respecto a su abundancia entre las variables del hábitat, la densidad poblacional de esta planta fue significativamente mayor (MW: $p=0.0000$) en el matorral rosetófilo respecto al micrófilo (Cuadro 3.4), pero no se encontró diferencia respecto al tipo de suelo (KW: $H=1.70$, $p=0.1337$) ni a la pendiente del terreno (KW: $H=0.67$, $p=0.6621$).

Respecto a la influencia del tipo de vegetación respecto a la talla del sotol (Cuadro 3.5), las plantas significativamente más altas se encontraron en el matorral desértico rosetófilo (KW: $p=0.0000$). Para tipo de suelo no hubo diferencia (KW: $H=0.88$, $p=0.6417$) mientras que para la pendiente del terreno las plantas fueron significativamente mayores (KW: $H=10.52$, $p=0.0142$) en NS, F y M respecto a E, aunque M no fue diferente de E. Respecto a la altitud, todos los valores quedaron dentro de la misma clase.

Cuadro 3.3. Puntos de cotejo y muestreo para sotol en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Alt	Pend
1	-102.428	24.803	MAZ	No	MR	Phaeozem	1689	NS
2	-102.348	24.894	MAZ	Si	MR	Leptosol	1690	F
3	-102.364	25.033	MO	No	MR	Calcisol	1416	NS
4	-102.078	24.927	MO	Si	MR	Calcisol	1416	M
5	-101.952	24.95	MO	Si	MM	Leptosol	1612	M
6	-102.276	24.804	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1830	NS
7	-101.705	24.663	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1931	M
8	-101.974	24.625	MAZ	No	MR	Leptosol	1743	NS
9	-101.765	24.698	MAZ	Si	MR	Phaeozem	1810	M
10	-101.346	24.642	CdO	Si	MR	Phaeozem	1783	M
11	-101.21	24.721	CdO	No	MR	Phaeozem	1785	NS
12	-102.246	24.447	MAZ	No	MR	Solonetz	1620	NS
13	-101.397	24.339	CdO	No	MR	Phaeozem	1620	M
14	-101.73	24.541	MAZ	Si	MR	Calcisol	1779	M
15	-102.081	24.497	MAZ	Si	MR	Leptosol	1964	F
16	-102.088	24.442	MAZ	No	PI	Phaeozem	1886	NS
17	-101.54	24.367	MAZ	No	MR	Calcisol	1949	NS
18	-101.381	24.405	CdO	No	MM	Calcisol	1841	NS
19	-101.227	24.23	CdO	Si	MR	Phaeozem	1946	E
20	-101.176	24.434	CdO	Si	AT	Phaeozem	1856	NS
21	-101.688	24.374	MAZ	No	MM	Calcisol	1951	NS
22	-101.912	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	1911	M
23	-101.368	24.605	CdO	No	MC	Regosol	1921	NS
24	-102.189	24.957	MO	Si	MR	Leptosol	1682	M
25	-102.406	24.821	MAZ	No	MM	Calcisol	1652	NS
26	-102.315	24.935	MAZ	No	MM	Phaeozem	1542	NS

Abreviaturas: Coordenadas: Long = longitud, Lat = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación: matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de distribución potencial: Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 3.3. (Continuación) Puntos de cotejo y muestreo para sotol en el norte de Zacatecas. Se aporta información sobre el número del sitio (N), las coordenadas geográficas (expresadas en grados decimales), el municipio (Mun), la presencia o ausencia de la especie (Pres), el tipo de vegetación (TV), el tipo de suelo (TS), las clases de pendiente (Pend), la altitud (Alt, en msnm) y la probabilidad de distribución potencial (PDP).

N	Long	Lat	Mun	Pres	TV	TS	Alt	Pend
27	-102.314	25.083	MO	No	MM	Solonchak	1285	NS
28	-102.007	24.88	MO	No	MM	Solonchak	1529	NS
29	-101.992	24.873	MO	No	MM	Solonchak	1530	NS
30	-102.215	24.774	MAZ	No	MR	Leptosol	2012	NS
31	-101.746	24.72	MO	No	MM	Calcisol	1847	NS
32	-101.946	24.64	MAZ	No	MM	Calcisol	1707	NS
33	-101.734	24.709	MAZ	No	MM	Phaeozem	1901	NS
34	-101.302	24.665	CdO	No	MM	Calcisol	1683	NS
35	-101.235	24.705	CdO	No	MM	Calcisol	1689	NS
36	-101.237	24.439	CdO	No	MM	Calcisol	1786	NS
37	-101.407	24.312	MAZ	No	MM	Calcisol	1821	NS
38	-101.73	24.504	MAZ	No	MM	Calcisol	1778	NS
39	-102.074	24.471	MAZ	No	MR	Phaeozem	1973	NS
40	-102.084	24.435	MAZ	No	PI	Phaeozem	1889	NS
41	-101.526	24.357	MAZ	No	MM	Calcisol	1924	NS
42	-101.411	24.288	CdO	No	MR	Calcisol	1811	NS
43	-101.222	24.196	CdO	No	MR	Phaeozem	2046	NS
44	-101.133	24.398	CdO	No	MM	Calcisol	1964	NS
45	-101.687	24.372	MAZ	No	MM	Calcisol	1946	NS
46	-101.914	24.529	MAZ	No	MR	Phaeozem	1908	NS
47	-101.362	24.553	CdO	No	AT	Calcisol	1925	NS
48	-101.867	24.954	MO	No	MM	Solonchak	1635	NS

Abreviaturas: Coordenadas: Long = longitud, Lat = latitud; Municipio: Concepción del Oro = CdO, Mazapil = Maz, Melchor Ocampo = MO; Tipo de vegetación: matorral rosetófilo = MR, matorral micrófilo = MM, pastizal inducido = PI, matorral crasicaule = MC; Clases de pendiente: Nula o suave = NS, moderada = M, fuerte = F, escarpada = E. Probabilidad de distribución potencial: Ausente o no detectada = A-ND, probabilidad baja = PB, probabilidad media = PM, probabilidad alta = PA.

Cuadro 3.4. Densidad poblacional media y desviación estándar (ind km⁻²) de sotol para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte del estado de Zacatecas.

Variable		Densidad poblacional (ind km ²)		P
General		33,103.4	± 12,747.4	-
Tipo de vegetación	MM	1,379.3 _b	± 0.0	0.0000
	MDR	18,661.3 _a	± 11,886.5	
Tipo de suelo	Calcisol	6,363.6	± 3,481.6	0.1337
	Leptosol	21,818.2	± 17,814.5	
	Phaeozem	21,818.2	± 0.0	
Pendiente	Nula o suave	7,272.7	± 0.0	0.6621
	Moderada	27,768.6	± 14,109.2	
	Fuerte	14,545.5	± 12,596.7	
	Escarpada	3,636.4	± 0.0	

^{a,b}Literales diferentes muestran diferencias significativas.

Abreviaturas: Tipo de vegetación: Matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM.

Respecto a las clases de talla de estas plantas, como una aproximación a clases de talla, no se encontró una distribución balanceada. Hubo gran porcentaje (66.7%) de plantas con talla pequeña y, con cierta desproporción, le siguieron la muy grande (16.7%) y la muy pequeña (12.5%). La talla grande fue escasa (4.2%) y no se encontraron plantas en talla mediana. El mayor ejemplar encontrado fue de 190 cm.

Cuadro 3.5. Talla media y desviación estándar del sotol para la generalidad del área de estudio (General) y entre los tipos de vegetación, tipo de suelo y pendiente del terreno en el norte de Zacatecas.

Variable		Talla media (cm)			P
General		128.8	±	29.8	-
Tipo de vegetación	MM	110.0 _b	±	0.0	0.0000
	MDR	129.6 _a	±	30.2	
Tipo de suelo	Calcisol	124.1	±	24.3	0.6417
	Leptosol	138.3	±	33.7	
	Phaeozem	122.0	±	30.3	
Pendiente	Nula o suave	154.5 _a	±	50.2	0.0142
	Moderada	120.4 _{ab}	±	17.6	
	Fuerte	151.3 _a	±	34.7	
	Escarpada	94.0 _b	±	5.7	

^{a,b}Literales diferentes muestran diferencias significativas.

Abreviaturas: Tipo de vegetación: matorral desértico rosetófilo = MDR; matorral desértico micrófilo = MDM.

3.4 DISCUSIÓN

Para un modelado de DP mediante el programa MaxEnt, el uso de pocos registros (5-6) puede ocasionar una sobrepredicción en los modelos generados (Pearson *et al.*, 2007). En el presente trabajo se usaron 27 registros, que se considera un número apropiado que no tiene este problema, pero tampoco subestima (Phillips *et al.*, 2006). Otras fuentes de error o de sesgo pueden derivarse de imprecisión en la cartografía base, pero también mala información derivada de cambios en el uso del suelo; ante esto, es recomendable incluir registros propios actualizados (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011; Pearson *et al.*, 2007; Phillips *et al.*, 2006). Respecto a la contribución de las variables ambientales en la construcción del modelo, la pendiente, el tipo de vegetación, la cobertura vegetal, el índice topográfico, la exposición, la estacionalidad de la precipitación, la isothermalidad, el modelo digital de elevación, la precipitación total anual, la

precipitación del trimestre más húmedo, la estacionalidad de la temperatura y el rango de temperatura anual explicaron 87.7% de la distribución del sotol, donde el modelo presentó una predicción robusta ($AUC = 0.936 \pm 0.024$).

El sotol habita en condiciones variadas en cuanto a la humedad ambiental, desde ambientes secos hasta los semihúmedos de algunos bosques de pino Martínez-Salvador (2013). Respecto a su distribución, los resultados encontrados en los puntos iniciales para la obtención de los registros originales difirieron de los encontrados en los puntos aleatorios para cotejo. En estos resultados se confirmó esta adaptación, aunque sólo se le encontró relacionado a pinos en el muestreo dirigido a los registros iniciales. También se confirmó su presencia en lo referente los tipos de vegetación, de suelo y de altitud reportados por Bogler (1994) y Martínez-Salvador (2013). El matorral desértico micrófilo es el tipo de vegetación más abundante en la zona, principalmente en llanos (Sosa *et al.*, 2006), al que le sigue el rosetófilo (Rzedowski, 1978). Sin embargo, la presencia y abundancia del sotol no siguió esta disponibilidad, y fue significativamente más abundante en el rosetófilo, lo que coincide con Martínez-Salvador (2013), aunque este autor no especifica esta proporción, además que incluye otros tipos de vegetación no presentes en el área de estudio.

Marroquín (1981) menciona que el sotol prefiere suelos tipo Xerosol, Rendzina y Regosol, ricos en carbonato de calcio, someros y bien drenados, sin embargo, aquí no se encontró a esta especie en ninguno de estos. En los sitios de registro fue más frecuente en Leptosol, Calcisol y Phaeozem, en ese orden; en los sitios de cotejo apareció en estos mismos sin diferencia en su densidad poblacional. Este último fue el suelo menos frecuente en los sitios de cotejo y a la vez, fue el que menos densidad de sotol registró. Marroquín (1981) y Martínez-Salvador (2013) mencionan que el sotol tiene preferencias por pendientes prolongadas, con lomeríos y, en términos generales, la topografía del nuevo mapa de DP se ajustó bien a estas características, donde la especie se encontró, sin diferencias, en pendiente desde NS hasta E. En cuanto a la altitud, se encontraron registros por encima del rango mencionado por Henrickson y Johnston (1986).

En resumen, el sotol se encontró en una gama de combinaciones entre las variables del hábitat, sin embargo, su distribución no fue continua. La densidad máxima encontrada fue de 160,000 ind km² en una parcela en matorral rosetófilo, en suelo Leptosol y en pendiente M. Sin embargo, su densidad media, considerando sólo el área con DP, fue 33,103.4 ind km⁻². Tanto la densidad máxima como la media fueron muy bajas en comparación con 701,000 ind km² reportados por Cano-Pineda *et al.* (2011) en el estado de Coahuila. No se encontró información en la literatura que relacione la influencia de las variables del hábitat sobre la talla de las plantas de sotol. Olhagaray-Rivera *et al.* (2007) y Pinales-Quero *et al.* (2017) le adjudican un tamaño de hasta 150 cm, aunque aquí se encontró un ejemplar de 190 cm. Respecto a las variables analizadas, el tipo de suelo no tuvo implicación significativa, sin embargo, tipo de vegetación y la pendiente del terreno sí la tuvieron. Se encontraron las plantas de mayor tamaño en el matorral rosetófilo y en pendiente de NS a F, con talla significativamente menor en E. No hay gran información previa respecto a su distribución, y nada respecto a su abundancia dentro del área de estudio. El mapa realizado por Martínez-Salvador (2013) ubica, al igual que estos resultados, muestra parches aislados de distribución, sin embargo, este autor ubica a esta especie más en el municipio El Salvador, mientras que en este trabajo es lo contrario, y no se aporta información sobre el área de DP. En general, estos resultados contribuyen con nueva información sobre la caracterización de esta especie.

Para el modelado con MaxEnt se usó una gran mayoría de registros recientes, propios (23, contra 4 históricos), y se corroboró la presencia de la especie en todos ellos, por lo que no hubo falsos registros que pudieran ocasionar sesgos (e.g. Varela *et al.*, 2014). Sin embargo, durante el cotejo, se confirmó su presencia sólo en 37.9% de los sitios donde el modelo de predijo la probabilidad de DP, lo cual puede ser un error de omisión (Hirzel *et al.*, 2008), o que la especie ha desaparecido en esos puntos por motivos antrópicos (Castillo-Quiroz, 2013). En contraparte, también se encontró en 5.3% en los sitios de PA-ND, lo que se considera un error de comisión (Hirzel *et al.*, 2008; Mateo *et al.*, 2011), pero, aun cuando los modelos de DP están sujetos a sesgos y errores, siguen siendo herramientas útiles (Varela *et al.* 2014).

El sotol es fundamental para la producción de la bebida alcohólica que lleva su nombre, cuya demanda se está incrementando al igual que la presión sobre sus poblaciones naturales para los

estados de Durango, Chihuahua y Coahuila. Aun cuando esta especie no tiene ese uso en la zona de estudio, hay planes de incremento en el área general de explotación, que puede llegar a incluir el norte de Zacatecas (Martínez-Salvador, 2013).

En general, para su supervivencia y mantenimiento a largo plazo, las especies dependen de una combinación de factores ambientales, frecuentemente difíciles de predecir. Además de la degradación natural por sobrepastoreo y otros usos antrópicos, el sotol es una especie con diferentes usos, los cuales se llevan a cabo sin control (Cano-Pineda *et al.*, 2011). Su área de DP se encontró muy reducida y fragmentada, su densidad poblacional baja, menor a la reportado para Coahuila y su distribución de tallas no fue balanceada (e.g. Morlans, 2004). Es importante contar con planes de manejo que incluyan información actualizada y bien documentada para garantizar un uso sustentable a largo plazo. Estos resultados aportan información actual y más precisa sobre distribución y la disponibilidad del sotol, así como sobre su abundancia y su talla, y la importancia de algunas variables del hábitat en el norte de Zacatecas.

3.5 CONCLUSIONES

El modelado para obtener la distribución potencial del sotol en el norte de Zacatecas, aunque fue robusto, al cotejar su presencia, se encontraron sesgos por falsos negativos y posibles falsos positivos.

Esta especie se encontró en una gama de condiciones dentro del área de estudio, donde mostró preferencias en su distribución entre tipos de vegetación, no así para tipo de suelo ni pendiente del terreno. Respecto a su talla, el tipo de vegetación y la pendiente tuvieron implicaciones significativas, con plantas más grandes en el matorral desértico rosetófilo, donde también fue más abundante; las plantas de menor talla media se encontraron en pendiente escarpada.

El área con distribución potencial fue muy reducida y, particularmente, para probabilidad de DP alta fue del 0.5% del área de estudio. Su distribución se encontró en parches discontinuos donde su densidad poblacional fue baja y sus clases de talla no se encontraron balanceadas. La distribución y la abundancia de este recurso forestal no maderable fue menor que la planteada

por otros autores. Para garantizar un uso sustentable del sotol en el norte de Zacatecas, es necesario incorporar la información de estudios mejor orientados y conducidos a este tema particular en los planes de manejo.

3.6 LITERATURA CITADA

- Aramburu, M.P. y R. Escribano 2006. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Secretaria General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pp. 917.
- Bogler, D.J. 1994. Systematics of *Dasyliirion*: Taxonomy and molecular phylogeny. Boletín de la Sociedad Botánica de México 56:69-76.
- Cano-Pineda A., C.A. Martínez-Burciaga, E. Berlanga-Reyes, E. Villavicencio-Gutiérrez y D. Castillo Quiroz. 2011. Guía para la evaluación de existencias de sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) en poblaciones naturales del estado de Coahuila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrarias y Pecuarías – Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Saltillo, Saltillo, Coahuila, México.
- Castillo-Quiroz, D., J.T. Sáenz-Reyes, M. Narcia-Velasco y J.A. Vázquez Ramos. 2013. Propiedades físico-mecánicas de la fibra de *Agave lechuguilla* Torr. de cinco procedencias bajo plantaciones. Revista mexicana de ciencias forestales 4(19):78-91.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), United Nations Environment Program (UNEP), Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University & The World Bank. 2005. Latin American and Caribbean Population Data Base. Version 3. <http://www.na.unep.net/datasets/datalist.php3>.
- Cervantes-Zamora, Y., S.L. Cornejo-Olguín, R. Lucero-Márquez, J.M. Espinoza-Rodríguez, E. Miranda-Viquez y A. Pineda-Velázquez. 1990. Provincias Fisiográficas de México. Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV. 10. 2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía. UNAM. Ciudad de México.
- Cihlar, J., R. Latifovic, J. Beaubien, Z. Li and S. Magnussen. 2000. Selecting representative high resolution simple image for land cover studies. Part 2: Application to estimating land cover composition. Remote Sensing of Environment 72:127-138.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- ESRI. 2010. ArcGIS Desktop 10.3. Environmental System Research Institute. Palm Springs, CA.
- GBIF. Global Biodiversity Information. www.gbif.org.
- González-Medrano, F. 2003. Las comunidades vegetales de México. Propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/421.pdf>.
- Gotfryd, A. and Hansell, R. I. 1985. The impact of observer bias on multivariate analyses of vegetation structure. Oikos 45:223-234.
- Gundale, M. J. and DeLuca, G. T. H. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. Forest Ecology and Management 231(1):86–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.004>.

- Hansen, M., R. Defries, J.R.G. Townshend and R. Sohlberg. 2000. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing* 21:1331-1365.
- Henrickson, J. and M.C. Johnston. 1986. Vegetation and community types of the Chihuahuan Desert. In: Barlow JD Editors. *Second Symposium on Resources of the Chihuahuan Desert Region: United States and Mexico*. Chihuahuan Desert Research Institute, Sul Ross State University. Alpine. Pp. 20-39.
- Hernandez, P.A., C.H. Graham, L.L. Master and D.L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29:773-785.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978.
- Hirzel, A. and G. Lay. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology* 45:1372-1381.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2005a. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000, Serie III, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ciudad de México, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2005b. Conjunto de datos Vectoriales de la Carta de topografía. Escala 1:150,000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2007. Conjunto de datos Vectoriales Edafológicos. Escala 1:250,000, Serie II, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2008. Continuo de Elevación Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática). 2012. Áreas geoestadísticas municipales. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- López-Ibarra, J.C. y S.R. Mendoza-Moreno. 2000. Cuantificación de taninos condensados de corteza y madera en la especie sangre de drago (*Jatropha dioica*). *Revista Chapingo: Serie Zonas Áridas* 1:1-6.
- Marroquín, J.S., L.G. Borja, C.R. Velásquez y J.A. De la Cruz. 1981. Estudio ecológico dasonómico de las zonas áridas del norte de México. *Publicación Especial Núm. 2*. 2ª Edición. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Ciudad de México. 166 p.
- Martínez-García, N. 2013. Evaluación del efecto quimioprotector de la decocción de la raíz de *Jatropha dioica* en ratones albinos suizos cepa ICR mediante ensayo cometa in vivo. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ciencias de la Salud. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo. México. 117 pp.
- Martínez-Salvador, M. 2013. Ecología y usos de especies forestales de interés comercial de las zonas áridas de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrarias y Pecuarias–Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Sitio Experimental La Campana. Aldama, Chihuahua, México.

- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M. y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84(2):217–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>.
- Melgoza-Castillo, A. y J. Sierra-Tristán. 2003. Contribución al conocimiento y distribución de las especies de *Dasyliirion* spp. (sotol) en Chihuahua, México. *Revista Ciencia Forestal en México* 28(93):25-40.
- Morlans, M.C. 2004. Introducción a la ecología de poblaciones. Área de Ecología. Editorial Científica Universitaria. Universidad Nacional de Catamarca. Argentina.
- Olhagaray-Rivera, E.C., G. Esparza-Chávez y F. Vega-Sotelo. 2002. Producción y comercialización de licores de sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) en Durango México. *Revista Ciencia Forestal en México* 29:83-89.
- Pearson, R.G., C.J. Raxworthy, M. Nakamura and A.T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34:102-117.
- Phillips, S. J., M. Dudík, J. Elith, C. H. Graham, A. Lehmann, J. Leathwick y S. Ferrier. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications* 19:181-197.
- Phillips, S.J. 2013. A brief tutorial on Maxent. Versions: 3.3.1. www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/. Consultada el 29 de mayo de 2015.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling in species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190:231-259.
- Pinales-Quero, Irma; V.M. González-Vázquez, F. Castillo-Reyes, N. C.N. Aguilar, M.H. Reyes-Valdés y R. Rodríguez-Herrera. 2017. Genetic diversity of sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) at different elevations. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 201-211.
- Plissock, P. y T. Fuentes-Castillo. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* 48:61-79.
- Reyes-Valdés, M.H., A. Benavides-Mendoza, H. Ramírez Rodríguez, J.A. Villarreal-Quintanilla. 2012. Análisis comparativo de caracteres genéticos y fisiológicos hipotéticamente relacionados con la determinación sexual en sotol (*Dasyliirion cedrosanum*). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Proyecto CONACYT CB 154682. Saltillo, Coahuila.
- Robles-Esparza, A., H. Robles-Berumen, F. Blanco-Macías, M. Martínez-Salvador y R.D. Valdez-Cepeda. 2012. *Dasyliirion cedrosanum* Trelease (Nolinaceae) Density varies depending on elevation and slope in the Northeast of Zacatecas, Mexico. *Ekoloji* 22:412-424.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. LIMUSA. Ciudad de México.
- SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales). 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.
- Sosa, M., J.L. Galarza, T. Lebgue, R. Soto y S. Puga. 2006. Clasificación de las comunidades vegetales en la región árida del estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada* 5:53-59.
- Soto C., R., C. Castañeda, L. Garibay y A. Parra. 2000. Manual de educación ambiental para comunidades del desierto Chihuahuense. Facultad de Zootecnia. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.

- Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. 2014. Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas* 23(1):46–53. <https://doi.org/10.7818/831>.
- Vergura, S., Acciani, G., Amoroso, V., Patrono, G. E. and Vacca, F. 2009. Descriptive and Inferential Statistics for Supervising and Monitoring the Operation of PV Plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(11): 4456–4464. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.927404>.

CONCLUSIONES GENERALES

Para la distribución y abundancia en el norte de Zacatecas de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y sotol (*Dasyllirion cedrosanum*), así como factores ambientales y paisajísticos que influyen en estos parámetros, la información preexistente fue escasa. Se encontraron grandes concordancias con la información bibliográfica, pero también algunas discordancias, por lo que el presente trabajo aportó información relevante para estos recursos forestales no maderables.

En este trabajo, el programa informático MaxEnt fue robusto en lo que respecta al modelado de las plantas, con un valor de AUC de 0.920 ± 0.039 para candelilla, 0.921 ± 0.021 para lechuguilla y 0.936 ± 0.024 para sotol. También se obtuvieron mapas de distribución potencial de cada una de las especies, así como listado de variables relevantes que explicaron de manera confiable cada distribución. Sin embargo, al cotejar la presencia de la especie, hubo sesgos por errores de comisión y posibles errores de omisión en los tres casos. Se encontró la presencia de candelilla en 10.5% de sitios donde el mapa mostró probabilidad de ausente o no detectado (errores de comisión), 13.3% para lechuguilla y 5.3% en el caso del sotol. En contraparte, en 37.9% de los sitios donde el mapa mostró probabilidad de distribución potencial, no se encontró la presencia de candelilla, 45.5% para lechuguilla y 37.9% para sotol, lo que se considera posibles errores de omisión.

Las tres especies se encontraron en una gama de condiciones dentro del área de estudio, donde algunas de las variables tuvieron o no implicación sobre la distribución, la densidad poblacional o la talla de las plantas. En general, se encontraron en similitud de variantes, todas presentes en matorral desértico rosetófilo y micrófilo, aunque lechuguilla también en crasicuale y sotol en bosque de pino. Esto en los tipos de suelo Calcisol, Leptosol, Phaeozem, y lechuguilla también en Regosol, y en pendiente desde nula o suave hasta escarpada. Cabe resaltar que la distribución y la densidad fue amplia entre las variables, aunque hubo preferencias en tipo de vegetación, y el matorral desértico rosetófilo fue significativamente importante para la densidad poblacional de candelilla y sotol. En el área de estudio hubo más tipos de vegetación y de suelo y, respecto a su frecuencia de aparición observada en los sitios de cotejo, la presencia y la densidad de las tres

especies no fue acorde a su disponibilidad. Las tres estuvieron ausentes en los demás tipos de vegetación y de suelo presentes en el área de estudio, lo que resalta que hubo preferencias.

Para la talla de las plantas, las más altas significativamente se encontraron en matorral rosetófilo para el caso de la lechuguilla y del sotol, y en Calcisol para lechuguilla. Para la pendiente del terreno escarpada, en las tres especies, se encontraron las plantas más pequeñas. En resumen, el matorral rosetófilo fue muy importante para todos los casos, así como la pendiente desde nula o suave hasta fuerte; respecto al tipo de suelo, hubo más dispersión.

Las tres especies tuvieron un área de distribución potencial muy reducida respecto al área total de estudio. Para el caso de candelilla fue de 19.2%, 20% para lechuguilla y 19.4% para el sotol y, sólo 0.6% fue de probabilidad de distribución potencial alta para candelilla, y 0.5% tanto para lechuguilla como para sotol. Como recursos forestales no maderables, su abundancia real se encontró más restringida en cuanto a su extensión territorial; adicionalmente, se encontraron mapas de distribución para candelilla y para lechuguilla que marcan una distribución continua de estas especies en todo el norte de Zacatecas. Respecto a esto, la distribución potencial en los tres casos se encontró en parches y, dentro de estos, las especies tampoco aparecieron de manera continua y, al menos para el sotol, sus clases de talla no se encontraron balanceadas, por lo que su población actual podría no ser estable.

En el norte de Zacatecas, como en muchas otras regiones, hay sobrepastoreo y otras amenazas naturales y antrópicas para las especies nativas, que pueden poner en riesgo sus poblaciones, y es un proceso en constante cambio. Cuando un recurso va a ser utilizado, es fundamental que las evaluaciones enfocadas a su disponibilidad sean bien dirigidas y realizadas, y que existan planes de manejo bien informados. Con base en los resultados de este trabajo, la abundancia de estas tres especies y su potencial de explotación es restringida, menor a la reportada por otros autores.