

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

**USO DE MODELOS DE NICHOS ECOLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE
VARIABLES AMBIENTALES Y ECOLÓGICAS, RELACIONADAS CON LA
DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES**



TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

CON ESPECIALIDAD EN:

RECURSOS NATURALES TERRESTRES

PRESENTA:

ENRIQUE ALFONSO RETAMOZA GONZÁLEZ

Hermosillo, Sonora

Mayo de 2013

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

FORMATO DE APROBACIÓN

Los miembros del Comité de Tesis designado para revisar la Tesis de Enrique Alfonso Retamoza González la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito para obtener el Título de Licenciado en Biología con Opción en Recursos Naturales Terrestres.

Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas
Director de Tesis

Dr. Julio Cesar Rodríguez
Sinodal Secretario

Dr. José Raúl Romo León
Sinodal

Dr. Oswaldo Téllez Valdez
Suplente

DEDICATORIA

A mi familia, **Julio, Patricia, Ana y Mariana**

Simplemente, porque los amo

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Alejandro E. Castellanos Villegas**, por abrirme las puertas de su laboratorio y darme la oportunidad de equivocarme las veces necesarias para aprender.

Al **Dr. Oswaldo Téllez Valdez**, por adentrarme al mundo de los modelos de distribución de especies, disciplina donde encontré un nicho ecológico para mí.

Al **Dr. Julio Cesar Rodríguez**, por su apoyo total y por volver este trabajo un verdadero reto para mí.

Al **Dr. Raúl Romo León**, por brindarme su amistad de tiempo atrás y por el apoyo y motivación que me dio durante el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de laboratorio, **José, César, Marina, Arturo, Hernán, Chimo, Carola y Gustavo**, por hacer amenos los días de trabajo.

A los Acuicultores, **Dyanna, Ana Lucía, Caro, Angélica, Dabith, Diana, Javier, Ramón, Karime, Karina, Rodrigo, Álvaro, Lauro, Toño y Fernando**, por hacerme miembro honorario de su grupo.

A mis compañeros de galería y E.A., **David, Cali, Grecia, Claudia, Vero, Balta, Elsa, Profe Rozo†**, porque sin ustedes mi paso por la carrera y por mi vida, no hubiera sido lo mismo.

A mis amigos, **Salva, Chino, Aatzin, Haro, Moraga, Tavo, Mace, Carlos, Gil, Sergio, Mary, Ayerim, Dinorah, Adriana, Vianey**, por tantos años de amistad y empuje.

A los desvelados de **Juan, Miguel, Marisol, Rene, Jorge, Abigail**, por acompañarme en las horas en las que me llegaba la inspiración.

A los de la iglesia, el **padre Mario†, Margarita, Licha, don Reyes, Tere, Daniel, Dina, el padre Landgrave†, Fátima, Adrián y Celia** por empujarme a terminar este trabajo.

A mis Padres, **Patricia y Julio**, por hacer siempre, todo lo que estuvo en sus manos para que yo estuviera aquí y por tantos años de amor.

A mis hermanas, **Ana y Mariana**, por estar conmigo a pesar de todas las diferencias, al final, las únicas personas con las que se puede contar toda la vida son los hermanos, por eso hay que estar siempre unidos.

A mi hermano por amor, **Guillermo**, y mi sobrino **Santiago**, por recordarme siempre, cada uno en su momento, que jamás debes de dejar de preguntar cosas.

A mi familia toda, **Eva, Faby, Luz Elena, Andrea** mis tías **Chuya, Dora, Katy, Auxi, Ceci, panchita** y **Graciela**, tío **Avelino**, y todos los demás, donde me faltarían hojas para mencionarlos, gracias.

A todos los que me motivaron a no tirar la toalla y lograr este gran reto, amigos del alma, **Sra. Rosario, Abraham, Daniel, Emmanuel, Don David, Diana, Omar, Hiram, Marga, Profe. Reyna, profe Malena, profe Rubén, Ale. Adrián, Desi. Elyana, Tito, Bernardo.**

Y sobre todo, de una forma infinita, gracias al **Señor mi Dios**, sin el cual no podría haber hecho nada, en ningún momento de mi vida.

“Nada es difícil cuando se quiere”

Pbro. Mario Lorta Gálvez †

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. ANTECEDENTES	4
II.1. El Desierto Sonorense	4
II.2. Biodiversidad, Pérdida y Usos	5
II.3. Nicho Ecológico	6
II.4. Modelado de distribución de especies	8
II.5. Validación del Modelo	11
II.6. Maxent	13
III. JUSTIFICACIÓN	15
IV. HIPÓTESIS	16
V. OBJETIVOS	17
V.1. Objetivo General	17
V.2. Objetivos Específicos	17
VI. METODOLOGÍA	18
VI.1. Selección de Especies	18
VI.2. Bases de datos	18
VI.3. Modelos de Nicho Ecológico	19
VI.4. Post procesamiento de los datos	22
VI.4.1. Delimitación del área y reclasificación	22
VI.4.2. Valores Ambientales	23
VI.4.3. Capas temáticas	23
VII. RESULTADOS	24
VII.1. Modelos de Distribución	24
VII.2. Validación de los Modelos de Distribución Potencial	37
VII.3. Superficies Potenciales	41

VII.4. Variables Ambientales	42
VII.5. Rangos Climáticos	44
VII.6. Uso de Suelo y Vegetación	47
VII.6.1. Vegetación de zonas áridas.....	48
VII.7. Tipo de Suelo.....	50
VII. DISCUSIÓN	51
VIII. CONCLUSIONES	54
IX. LITERATURA CITADA	55

LISTA DE TABLAS

Tabla I	Tipos de Ecosistemas Presentes en Sonora. Modificada de Martínez-Yrizar et al., 2010	4
Tabla II	Matriz de confusión.	12
Tabla III	Lista de especies seleccionadas para modelar su distribución potencial.	19
Tabla IV	Listado de variables bioclimáticas utilizadas. Modificado de Villaseñor y Téllez, 2004.	21
Tabla V	Número de registros de presencia por especie.	24
Tabla VI	Valores de validación de los modelos.	41
Tabla VII	Superficie de distribución potencial dentro del Estado de Sonora.	42
Tabla VIII	Contribución de las variables ambientales en la generación de los modelos de distribución de especies.	43
Tabla IX	Proporción de coberturas de los tipos de vegetación con respecto al total de distribución potencial para el Estado de Sonora.	48
Tabla X	Porcentaje de los tipos de Vegetación Áridos en la Distribución Potencial dentro del Estado de Sonora.	49
Tabla XI	Relación del tipo de suelo para la distribución de cada una de las especies de estudio dentro del Estado de Sonora.	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de los diferentes conceptos de nicho ecológico.	7
Figura 2	Descripción gráfica de los diferentes componentes de un modelo de distribución de especies. Figura tomada de Benito, 2009.	9
Figura 3	Estaciones meteorológicas usadas para la interpolación de las capas climáticas. Tomada de Téllez et al. 2010.	11
Figura 4	Ejemplo de una curva Característica Operativa del Receptor (o curva ROC por sus siglas en inglés).	12
Figura 5	Modelo continuo de distribución de <i>Acacia cochliacantha</i> generado con Maxent.	25
Figura 6	Distribución potencial de <i>Acacia cochliacantha</i> dentro del Estado de Sonora.	25
Figura 7	Modelo continuo de distribución de <i>Agave angustifolia</i> generado con Maxent.	26
Figura 8	Distribución potencial de <i>Agave angustifolia</i> dentro del Estado de Sonora.	26
Figura 9	Modelo continuo de distribución de <i>Cucurbita digitata</i> generado con Maxent.	27
Figura 10	Distribución potencial de <i>Cucurbita digitata</i> dentro del Estado de Sonora.	27
Figura 11	Modelo continuo de distribución de <i>Cucurbita palmeri</i> generado con Maxent.	28
Figura 12	Distribución potencial de <i>Cucurbita palmeri</i> dentro del Estado de Sonora.	28
Figura 13	Modelo continuo de distribución de <i>Encelia farinosa</i> generado con Maxent.	29
Figura 14	Distribución potencial de <i>Encelia farinosa</i> dentro del Estado de Sonora.	29
Figura 15	Modelo continuo de distribución de <i>Jatropha cardiophylla</i> generado con Maxent.	30

Figura 16	Distribución potencial de <i>Jatropha cardiophylla</i> dentro del Estado de Sonora.	30
Figura 17	Modelo continuo de distribución de <i>Jatropha cinerea</i> generado con Maxent.	31
Figura 18	Distribución potencial de <i>Jatropha cinerea</i> dentro del Estado de Sonora.	31
Figura 19	Modelo continuo de distribución de <i>Jatropha cordata</i> generado con Maxent.	32
Figura 20	Distribución potencial de <i>Jatropha cordata</i> dentro del Estado de Sonora.	32
Figura 21	Modelo continuo de distribución de <i>Olneya tesota</i> generado con Maxent.	33
Figura 22	Distribución potencial de <i>Olneya tesota</i> dentro del Estado de Sonora.	33
Figura 23	Modelo continuo de distribución de <i>Pennisetum ciliare</i> generado con Maxent.	34
Figura 24	Distribución potencial de <i>Pennisetum ciliare</i> dentro del Estado de Sonora.	34
Figura 25	Modelo continuo de distribución de <i>Prosopis glandulosa</i> generado con Maxent.	35
Figura 26	Distribución potencial de <i>Prosopis glandulosa</i> dentro del Estado de Sonora.	35
Figura 27	Modelo continuo de distribución de <i>Prosopis velutina</i> generado con Maxent.	36
Figura 28	Distribución potencial de <i>Prosopis velutina</i> dentro del Estado de Sonora.	36
Figura 29	Análisis de ROC para las especies con importancia productiva.	39
Figura 30	Análisis de ROC para las especies con importancia ecológica.	40
Figura 31	Estacionalidad de la precipitación para el género <i>Jatropha</i> .	46
Figura 32	Oscilación diurna de la temperatura para el género <i>Jatropha</i> .	46
Figura 33	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido para el género <i>Jatropha</i> .	47

RESUMEN

El Desierto Sonorense (DS) es un área ecológicamente importante, la cual se encuentra ubicada en la región Noroeste del país. Dicho ecosistema ha sido transformado en parte de matorrales a un monocultivo de pastizal, presentando así pérdida de biodiversidad de la cual se tiene poco o nulo conocimiento. En ambos ecosistemas, cada una de las especies presenta un nicho ecológico característico que la diferencia del resto, y basándose en este principio, se han generado modeladores de distribución de especies (MDE), que utilizan registros de presencia y variables ambientales. Dado esto, se hipotetiza que los MDE pueden aportar información ecológica mediante un retroanálisis de los resultados, particularmente útil cuando no se tienen conocimientos mínimos para la especie. Para comprobar lo anterior, se generaron los MDE de 11 especies de plantas del DS y una especie introducida, y se obtuvieron los valores ambientales correspondientes para dicha distribución dentro del Estado de Sonora. Se modelaron las distribuciones usando Maxent 3.1, utilizando 19 variables bioclimáticas y registros de presencia obtenidos de diversas bases de datos en línea, se procesaron los modelos utilizando Quantum-GIS y Grass-GIS, y se analizó en el paquete estadístico R-Project. Los valores de validación (ROC) fueron superiores a 0.8. La especie con menor porcentaje de cobertura potencial dentro del Estado de Sonora fue *Cucurbita palmeri* con un 5.84% del total del estado, y la de mayor superficie fue *Prosopis glandulosa* con 94.94%, la variable ambiental más importante fue la Temperatura promedio del cuatrimestre más seco empleada en 11 de los 12 modelos, el tipo de vegetación más predominante fue el Matorral con valores de cobertura de 12.32% a 51.45% y el tipo de suelo más predominante fue el regosol. Se pudo diferenciar entre los nichos ecológicos y las áreas de distribución potencial entre las diferentes especies, algunos modelos generados en el presente estudio difieren con respecto a otros trabajos, lo cual puede significar diferentes grados de ajuste.

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la biología básica de las especies resulta de gran importancia dado que a partir de él, es posible dilucidar información de carácter más complejo, como la reconstrucción de su historia evolutiva, comprender su distribución histórica y actual, el poder predecir cambios a futuro, así como las interacciones que puede tener con otras especies y con su entorno, y así poder tomar decisiones adecuadas de conservación o el correcto aprovechamiento de los recursos ([Antaramian y Ortega, 2009](#); [Benito, 2009](#); [Bolívar, 2009](#); [González, 2010](#); [Longoria, 2008](#); [Kurman y Stohlgren, 2009](#)).

Sin embargo, para gran número de especies tanto vegetales como animales, este conocimiento básico no se tiene, por lo que el contar con herramientas que permitan inferir aspectos ecológicos, biogeográficos, y ecofisiológicos, de dichas especies será de gran utilidad. La generación de este tipo de conocimientos básicos es particularmente importante en un país megadiverso como México y para regiones en donde ese tipo de estudios ecogeográficos no han sido enfoque principal.

El modelado de distribución de especies es un área de la ecoinformática que se encuentra en amplio desarrollo. Basándose en los conceptos de nicho ecológico y nicho potencial, son capaces de estimar el espacio ecológico de una especie mediante un algoritmo matemático que, utiliza capas ambientales y temáticas, y puntos de presencia de las especies de interés como restrictores a las condiciones ambientales ([Benito, 2009](#); [Grinnel, 1917](#); [Martínez, 2010](#); [Phillips et al., 2006](#); [Ortega y Peterson, 2008](#)).

Estos modelos, son capaces de proyectar el espacio ecológico de las especie, dentro de un espacio geográfico, y obtener como resultado un gradiente de probabilidades de ocurrencia de la especie de estudio. Mediante diversos programas informáticos especializados, se pueden manipular los archivos en formato raster obtenidos que representan los resultados del modelo y utilizando las variables ambientales, así como variables temáticas no consideradas por el modelo, es posible determinar valores extremos de las condiciones ambientales a las que está sujeta una especie en su distribución potencial así como las relaciones ecológicas que sostiene con el medio.

Por lo anterior, se puede pensar que el uso de los modelos de nicho ecológico es un método plausible para la determinación de los rangos de las variables ambientales a las que se

encuentran sujetas las distribuciones de las especies, contribuyendo así al conocimiento ecofisiológico, ecológico y biogeográfico general de las mismas.

Es por esto que en el presente trabajo, se generarán los modelos de nicho ecológico de algunas especies de plantas con interés en sus procesos ecológicos o con potencial productivo, por ejemplo en áreas de la bioenergética. Para tales fines se generarán las distribuciones potenciales de dichas especies mediante modelos de nicho y se obtendrán los rangos de los valores ambientales presentes en dichas distribuciones, así mismo sus interacciones con otras variables como tipos de suelo y de vegetación en los que se encuentran presentes, con el fin de tratar de entender los procesos biológicos y ecofisiológicos ecológicos y biogeográficos a los que están sometidas.

II. ANTECEDENTES

II.1. El Desierto Sonorense

Sonora es un estado que cuenta con 13 ecosistemas ([Tabla I](#)), entre los que se encuentra el Desierto Sonorense, el cual abarca todas las subdivisiones reconocidas por Shreve y Wiggins ([1964](#)) y que se reconoce desde la región sur al norte de Sonora, continuándose hasta la parte central de Arizona y áreas importantes de Baja California Norte y Sur.

Al estar ubicado en los 30° de latitud norte, el Desierto Sonorense presenta condiciones de aridez debido a los efectos de las corrientes de aire descendentes, generando condiciones de cielos normalmente despejados, que causan altas temperaturas durante el día las cuales descienden drásticamente durante las noches ([Martinez-Yrizar et al, 2010](#)). Este desierto presenta un régimen de lluvias bimodal, con la mayor cantidad de la precipitación en verano (cerca de un 80% entre los meses de julio y septiembre) producto del monzón de verano y el resto en lluvias ligeras en invierno. ([Brito-Castillo et al, 2010](#); [Dimmitt, 2000](#)).

Tabla I. Tipos de Ecosistemas Presentes en Sonora. Modificada de Martínez-Yrizar et al., 2010

Ecosistema
Desierto Sonorense - Subdivisión Valle del Bajo Río Colorado(1)
Desierto Sonorense -Subdivisión Altiplano de Arizona (2)
Desierto Sonorense -Subdivisión Costa Central del Golfo (3) (incluye islas del Golfo y manglares)
Desierto Sonorense -Subdivisión Planicies de Sonora (4)
Matorral Espinoso de Piedemonte (5)
Matorral Espinoso Costero
Bosque Tropical Caducifolio (7)
Bosque Maderense - Encinar (8)
Bosque Maderense - Bosque de Pino-Encino (9)
Bosque Maderense - Bosque Mixto de Coníferas (10)
Pastizal de Altura (11)
Desierto Chihuahuense (12)
Pastizal de Zacate Buffel (13)

Además de los tipos de vegetación natural reconocidos, actualmente se puede considerar que en Sonora se encuentra una sabana de buffel (*Pennisetum ciliare*) introducida con la idea de aumentar la capacidad forrajera del estado ([Castellanos, 1992](#); [Martinez-Yrizar et al., 2010](#)). Dicha sabana, es producto de la transformación de diferentes tipos de vegetación desérticos los cuales fueron modificados utilizando apoyos económicos gubernamentales en los años 80's, donde se desmontaron grandes extensiones de matorrales, para sembrar un monocultivo de Buffel, un pasto exótico de origen africano ([Bravo-Peña et al, 2010](#)). Esta transformación de las comunidades naturales desérticas ha acelerado la pérdida de la biodiversidad del Desierto Sonorense ([Castellanos et al., 2010](#)) incluyendo especies de las que se tiene poco o nada de conocimiento básico en términos ecológicos, ecofisiológicos y biogeográficos.

II.2. Biodiversidad, Pérdida y Usos

La biodiversidad del Desierto Sonorense se estima en aproximadamente 2000 especies de plantas superiores. Un gran porcentaje de estas especies poseen características adaptativas a condiciones ambientales extremas de temperatura y disponibilidad de agua, lo que se ha reconocido en el gran número de formas de vida que se han identificado en sus diferentes ecosistemas.

Desde la década de los 40's del siglo pasado, Shreve ([1942](#)) diferenció un gran número de formas de vida. Shreve reconoce alrededor de 40 diferentes formas de vida, algunas únicas al Desierto Sonorense. De la misma manera, Miranda y Hernández Xolocotzi ([1963](#)), reconocen la gran diversidad de formas biológicas diferenciables para las zonas áridas de México. Rzedowski ([1978](#)) por otro lado reconoce una gran cantidad de especies endémicas a las zonas áridas mexicanas y el Desierto Sonorense en particular.

Aunque no han sido totalmente dilucidadas las causas de esta gran diversidad de formas biológicas y endemismos, es probable que un factor determinante sea la confluencia y ecotono biogeográfico de la región Neártica y Neotropical en el territorio del Norte del país ([Rzedowski 1978](#), [Castellanos et al. 2010](#)). Por ejemplo en el Noroeste del país, dentro del Estado de Sonora, el ecotono de ambas regiones biogeográficas se establece hacia los 29°

latitud Norte, en la Región Central de Sonora ([Castellanos et al. 2010](#)). Tal vez como determinante de esta relación entre ecotono biogeográfico y endemismo puede citarse lo encontrado por Turner et al. ([1995](#)), quienes encuentran la mayor cantidad de especies leñosas endémicas en la región Central de Sonora

II.3. Nicho Ecológico

El concepto de Nicho Ecológico fue acuñado por [Grinnell](#) en 1917, quien lo definió como el área en la que se encuentra una especie, dadas sus características fisiológicas y su comportamiento ([Benito, 2009](#)). Este concepto establece que el nicho ecológico está determinado por el medio ambiente y no por las interacciones entre los organismos en sí, poniendo énfasis en los requerimientos de hábitat necesarios para cada especie, por lo tanto contempla conceptos como el nicho vacío o la exclusión competitiva.

En 1927, Elton (citado por [Benito, 2009](#)), redefine el concepto de Nicho Ecológico, poniendo énfasis en las relaciones bióticas inter-específicas, dictaminando que los rangos de distribución de una especie están en función de la presencia y/o ausencia de las presas y los depredadores y su rol exclusivo en los ecosistemas.

Uniando los conceptos de Grinnell y Elton, Hutchinson (1957) (citado por [Benito, 2009](#)) define el nicho ecológico como “un hipervolumen en un espacio ecológico multidimensional, determinado por los requerimientos de la especie para reproducirse y sobrevivir.” En concreto, es la suma de todos los factores ambientales y bióticos requeridos para la presencia y sostenimiento de la especie.

El concepto de Nicho Ecológico según Hutchinson, introduce conceptos nuevos, como el Nicho Fundamental. Éste se define como las condiciones bióticas y abióticas necesarias para mantener la sustentabilidad reproductiva de la especie.

En 2005, [Soberón y Peterson](#) determinaron que la distribución real de las especies es un subconjunto de las intersecciones de las condiciones ambientales óptimas (clima, temperatura media anual, topografía, precipitación media, etc.), de las relaciones bióticas (presas, depredadores, parásitos, mutualistas, etc.) y de los lugares que son accesibles para la dispersión de la especie ([Figura 1](#)).

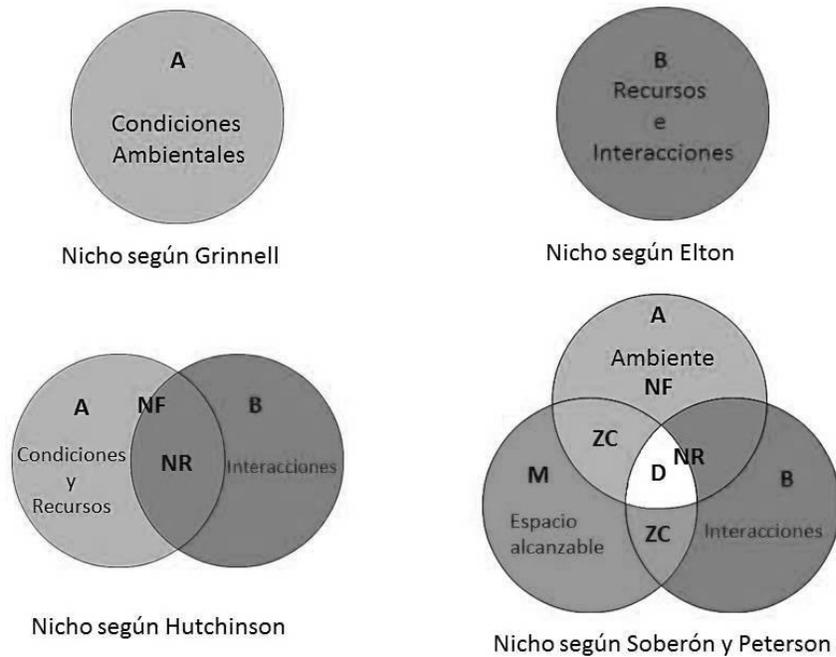


Figura 1. Diagrama de los diferentes conceptos de nicho ecológico. Tanto en el concepto de Grinnell como en el de Elton, se considera que el nicho está formado por un solo factor, Grinnell considera las condiciones ambientales (A) y Elton los recursos e interacciones bióticas (B), mientras que Hutchinson hace referencia a la intersección de ambos factores ($A \cap B$), considerando así el Nicho Fundamental (NF) y el Nicho Realizado (NR). En cambio, Soberón y Peterson, introducen un nuevo concepto, que es el espacio geográfico que es capaz de alcanzar la especie, considerando zonas donde la especie se encuentra presente por contribución de áreas más adecuadas, pero son espacios incapaces de mantener una población estable (ZC), y la intersección de todas estas áreas es la distribución real de la especie ($D = A \cap B \cap M$). Esquema modificado a partir de los esquemas de [Benito, 2009](#) y [Soberón y Peterson, 2005](#)

El Nicho Potencial, es la parte del Nicho Fundamental que realmente existe en un una región y tiempo determinado, es decir, es el espacio geográfico que presenta las condiciones descritas en el Nicho Fundamental. Por otro lado, el Nicho Realizado, es la parte del Nicho Potencial que realmente ha ocupado la especie, dados sus capacidades de colonización y las interacciones con el resto de los organismos ([Soberón y Nakamura, 2009](#)).

II.4. Modelado de distribución de especies

En términos de estudio de las plantas del Desierto Sonorense, se sabe poco de su biología y ecología, los trabajos más comunes hacen referencia a la taxonomía o nomenclatura de las especies, dando poca importancia a la distribución espacial total de las mismas, siendo el trabajo realizado por Shreve y Wiggins ([1964](#)) el que describe más ampliamente la distribución de varios grupos taxonómicos, sin embargo este estudio, a pesar de ser muy completo, se limita a la localización puntual de cada localidad de colecta donde se encuentra presente la especie en cuestión.

Desde hace aproximadamente 20 años, se han desarrollado modelos de distribución de especies en base a la teoría del nicho ecológico, específicamente en relación con el nicho fundamental. Dichos modelos se encargan de calcular mediante algoritmos matemáticos la probabilidad de ocurrencia de una especie en un lugar determinado. Estos modelos se les conoce de manera abreviada como modelos de nicho ([Benito, 2009](#); [Martínez, 2010](#)).

Benito ([2009](#)) define el Modelo de Distribución de Especies como “una construcción numérica que define en el espacio ecológico las relaciones que existen entre la presencia de una especie y los valores ambientales con influencia en su distribución. El resultado se expresa en el espacio geográfico como un mapa digital que representa la idoneidad del hábitat o la probabilidad de presencia de la especie”. Los programas diseñados para determinar la distribución de una especie se basan en diferentes algoritmos según el modelo, encontrando una relación entre puntos georeferenciados de la ubicación de la especie de estudio y capas temáticas, calculando las condiciones del espacio ecológico de la especie (Nicho Fundamental) y generando una proyección probabilística en el espacio geográfico donde se encuentren dichas condiciones (Nicho Potencial) ([Figura 2](#)).

En la actualidad existen diversos modeladores de nicho ecológico, los cuales, al utilizar algoritmos matemáticos y variables de entrada diferentes generan resultados diversos dependiendo de los modelos a que se refiera ([Ortega y Peterson; 2008](#)). Algunos de esos modeladores pueden utilizar regresión logística, máxima entropía, algoritmos genéticos; envolturas bioclimáticas, MARG (por sus siglas en inglés de Multivariate Adaptive Regression Splines), modelos generales aditivos (General Additive Models), así como redes neuronales artificiales y análisis de factores de nicho ecológico. Igualmente pueden existir

diferentes tipos de variables de entrada como puntos de presencia y ausencia o solo puntos de presencia, continuas y categóricas o solo continuas.

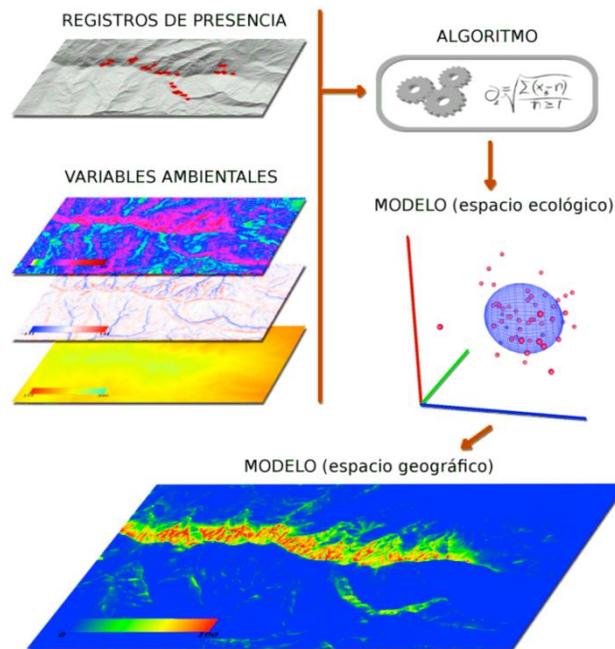


Figura 2. Descripción gráfica de los diferentes componentes de un modelo de distribución de especies. En la Figura se esquematizan los componentes de un modelo, 1- Los registros geográficos de presencia, 2- Las variables ambientales o capas bioclimáticas, 3- El algoritmo que combina y relaciona ambos archivos de entrada 4- El modelo dentro del espacio ecológico (NF) y 5- El modelo dentro del espacio geográfico real (NR). Figura tomada de [Benito, 2009](#).

Utilizando los diferentes modeladores y algoritmos, se han realizado diversos trabajos en modelado de distribución de especies, presentando así una amplia gama de utilizaciones. Arriaga et al. (2003) estimaron áreas de invasión potencial de *Cenchrus ciliaris* (sin: *Pennisetum ciliare*) para el Estado de Sonora. Ellos utilizaron el algoritmo genético de GARP, y utilizaron restrictores de altitud y precipitación anual para delimitar y acotar el área de invasión potencial de esta especie.

Los modelos de distribución de especies basados en la teoría del nicho ecológico han sido ampliamente utilizados en la actualidad, ya que generan un gradiente de probabilidad de ocurrencia de la especie, basándose en la relación estrecha de la presencia de un individuo (en este caso datos de herbarios) y las condiciones climáticas a las que se encuentra sometido.

Mediante dicha distribución de probabilidad, es posible conocer áreas donde la especie potencialmente está presente, o ha sido extirpada por un evento natural o antropogénico, así como posibles áreas de invasión o dispersión natural.

Los modelos de distribución de especies se generan utilizando variables ambientales, por lo que la correcta selección de dichas variables es sumamente importante. Las especies están restringidas por factores como la temperatura y la precipitación, los cuales son fácilmente representables en un mapa (de baja o alta resolución), sin embargo, otros factores como el pH del suelo o salinidad, presentan patrones a resoluciones muy altas, lo cual dificulta su incorporación. Hijmans et al. (2005) generaron capas climáticas de temperatura y precipitación para todo el planeta, interpolando valores ambientales obtenidos a partir de estaciones meteorológicas, las cuales se encuentran actualmente disponibles en el sitio web de Worldclim. Utilizando dichas capas climáticas de temperatura y precipitación mensual, Hijmans et al. (2005), también generaron 19 variables bioclimáticas, las cuales representan tendencias anuales, estacionales y extremas, más limitantes en las especies.

Basándose en las variables bioclimáticas de Hijman et al. (2005), Téllez et al. (2011) generaron para el territorio mexicano, capas bioclimáticas con mayor resolución espacial. Tellez et al. (2011) utilizó el paquete ANUSPLIN, el cual interpola de forma suave, no abrupta, mediante un algoritmo spline, con una resolución espacial de 30 segundos de arco, para valores ambientales de más de 7400 estaciones meteorológicas (Figura 3).

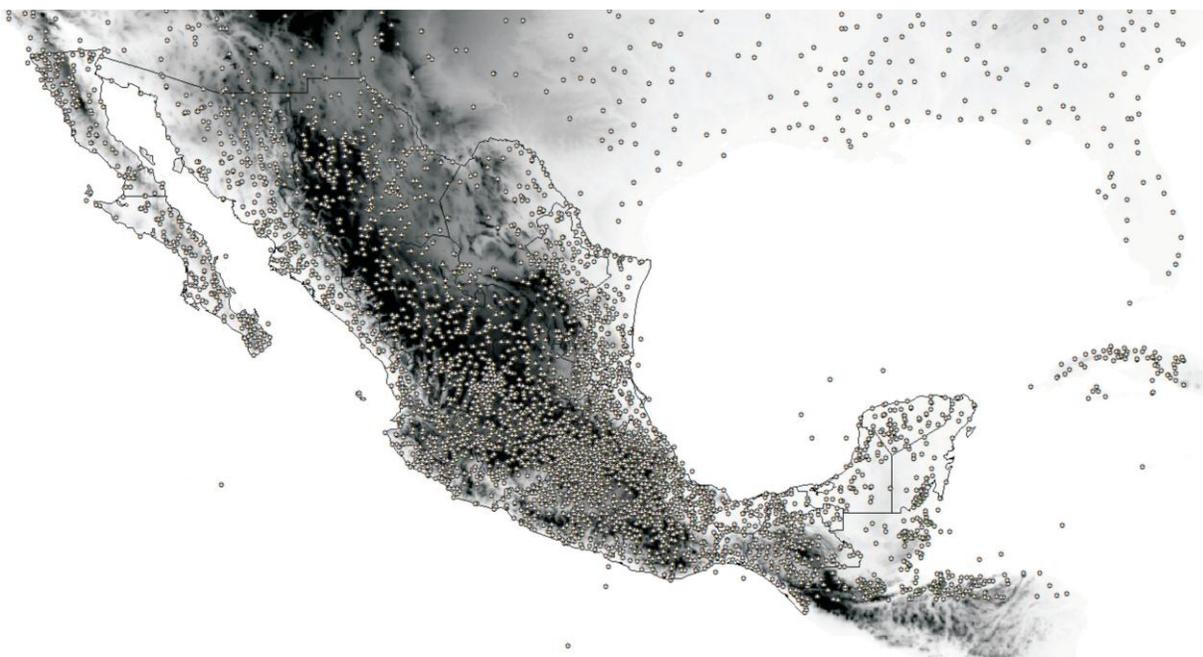


Figura 3. Estaciones meteorológicas usadas para la interpolación de las capas climáticas. Tomada de [Téllez et al. 2011](#)

II.5. Validación del Modelo

Los modelos de nicho son evaluados generalmente de dos formas. Los modelos de tipo booleano (solo de presencia-ausencia) son evaluados mediante una matriz de confusión (Tabla II), dando como resultado indicadores de Sensibilidad ($S=A/[A+C]$) y Especificidad ($E=D/[B+D]$) ([Phillips et al., 2004](#), [Benito, 2009](#); [Tabla II](#)). Los modelos continuos los cuales presentan un gradiente de probabilidad o de ocurrencia, como los generados por Maxent, son evaluados mediante la curva Característica Operativa del Receptor (o curva ROC por sus siglas en inglés, [Figura 4](#)). Esta curva muestra el grado de ajuste de un modelo y consiste de una gráfica con los valores de Sensibilidad contra 1-Especificidad, en donde el área bajo la curva generada va de 0.5 a uno. Dicho valor indica el grado de probabilidad en la que, al seleccionar de forma aleatoria un punto de presencia y uno de ausencia, el valor de idoneidad del punto de presencia será mayor que el valor de idoneidad del punto de ausencia. El valor de uno indica modelos con muy alto grado de ajuste, mientras que valores de 0.5 o cercanos a ese

valor indican que el modelo no puede distinguir si la presencia y ausencia es diferente a lo esperado por el azar ([Phillips et al., 2004](#), [Benito, 2009](#)).

Tabla II. Matriz de confusión. Sensibilidad: $S = A/(A+C)$, Especificidad: $E = D/(B+D)$

Modelo	Muestra	
	Presencia	Ausencia
Presencia	A	D
Ausencia	C	B

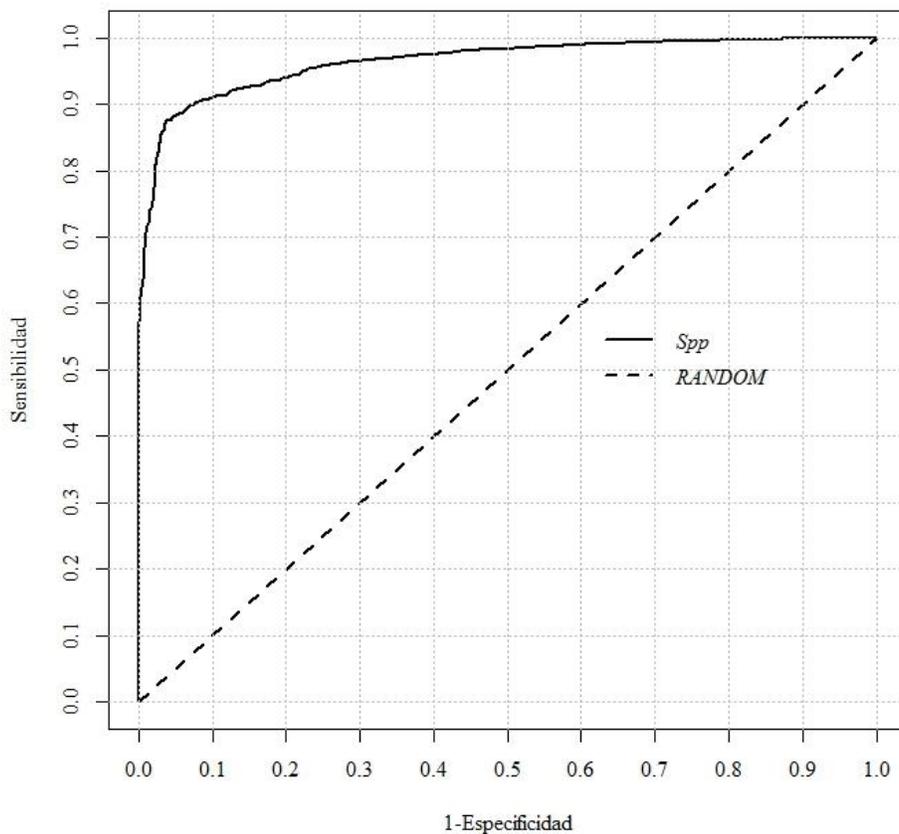


Figura 4. Ejemplo de una curva Característica Operativa del Receptor (o curva ROC por sus siglas en inglés).

II.6. Maxent

Maxent es un programa de modelado de distribución de especies que utiliza sólo datos de presencia referenciados en un sistema de coordenadas. Esto representa una ventaja sobre otros modelos ya que algunos requieren también datos de ausencia, los cuales son escasos para muchas localidades y especies. Utiliza además, capas bioclimáticas que pueden ser continuas o discretas. Maxent está basado en un algoritmo de Máxima Entropía, lo cual genera una distribución de probabilidad más cercano a lo uniforme de manera aleatoria, utilizando restricciones para determinar los valores predictivos ([Phillips et al., 2004](#), [Phillips et al., 2006](#); [Martínez, 2010](#)).

Maxent proporciona un mapa de gradiente continuo de probabilidad de ocurrencia o idoneidad, donde cada pixel cuenta con un valor entre cero y uno, el cual indica que tan probable es la presencia potencial de la especie, dadas las condiciones ambientales del lugar.

Este modelo ha sido utilizado en una amplia gama de trabajos. Longoria ([2008](#)) determinó que a pesar de algunas limitaciones de información, este algoritmo fue capaz de predecir de manera confiable la distribución hipotética de algunas especies enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2001 para el estado de Durango, proponiendo así el uso de estos modelos en la planeación de una reserva ecológica en la Sierra Madre Occidental.

González-Uribe ([2010](#)) presenta avances sobre la descripción del nicho ecológico de *Cynomys mexicanus*, contribuyendo así con el conocimiento básico de la biología de la especie y actualizando el área de distribución potencial conocida, con fines de conservación.

Bolívar-Cimé ([2009](#)) utilizó Maxent para modelar la distribución potencial del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el estado de Veracruz, con fines de conservación. Mediante el modelo de distribución o de nicho ecológico, determinó que su área de estudio no presenta las condiciones apropiadas para el desarrollo de *O. virginianus* y que mediante este tipo de modelos pudo inferir que la temperatura es un factor que delimita ampliamente la distribución de dicha especie.

Martínez-Alvarez ([2012](#)) modeló con Maxent, la distribución de 14 especies de zonas áridas en México y dos especies introducidas, todas ellas de interés productivo con fines bioenergéticas. Martínez-Alvarez ([2012](#)) determinó áreas dentro de México donde la agricultura de especies adaptadas a condiciones de aridez no compita por recursos con

especies de interés alimenticio, ni se tenga la necesidad de introducir especies exóticas a dichas áreas.

El uso de Maxent como modelador de distribución de especies no se limita a la conservación ecológica, sino que también es utilizado en la determinación de áreas para la restauración ([Kumar y Stohlgren, 2009](#)). Benito ([2009](#)) modeló la distribución de especies de plantas amenazada, bajo escenarios de cambio climático, y condiciones de cambio de uso de suelo. Cabe destacar la gran cantidad de información conceptual y marco teórico que presenta dicho trabajo para su utilización con fines de incrementar el conocimiento ecológico de especies en particular.

Dado que los modeladores permiten conocer la distribución potencial de las especies en una región y rango de hábitats posibles, y dado el gran desconocimiento de la ecología de un gran número de especies de los ecosistemas del Desierto Sonorense, es posible que su uso permita establecer una primera aproximación a la ecología de especies con poco o nulo conocimiento.

III. JUSTIFICACIÓN

El conocimiento de los requerimientos de hábitat de las especies, es indispensable no solo para entender su distribución, sino también para comprender algunas de sus variables ambientales limitantes (ecofisiológicas), así como posibles interacciones que permitan entender el funcionamiento y papel que desempeñan dentro de los ecosistemas. Es por esto que se propone utilizar las tecnologías modernas de ecoinformática, entre las que se encuentran los modeladores de nicho ecológico y los sistemas de información geográfica, los cuales son frecuentemente utilizados para determinar las condiciones ambientales a las que se encuentran sujetas las especies estudiadas. Así, al utilizar este tipo de herramientas se incrementa el conocimiento básico de las especies, se reducen tiempo y costos económicos de esfuerzos de muestreo, al no tener que realizar experimentos in vivo o in situ para determinar los rangos ecológicos que son capaces de soportar las especies, lo cual puede ser utilizado para el conocimiento ecológico, la conservación y/o el aprovechamiento de las especies bajo estudio.

IV. HIPÓTESIS

El uso de modelos de nicho utilizando variables climáticas para determinar la distribución potencial de especies, permitirá esclarecer determinantes e interacciones ecológicas explicativas de su distribución, para especies de las cuales existe poco o nulo conocimiento ecológico y fisiológico previo.

V. OBJETIVOS

V.1. Objetivo General

Determinar las áreas de distribución potencial de especies carismáticas o con posible uso dentro del Desierto Sonorense así como las condiciones ambientales y ecológicas presentes en sus rangos de distribución mediante herramientas de ecoinformática capaces de modelar nicho potencial.

V.2. Objetivos Específicos

Determinar la distribución potencial de 12 especies carismáticas o de interés partir de modelos de nicho ecológico, utilizando el modelador Maxent.

Desarrollar una Base de datos visible en un Sistema de Información Geográfica para las especies de interés.

Determinar las variables ambientales y ecológicas que delimitan la distribución potencial de cada una de las especies, y los rangos de valores para dichas variables utilizando Sistemas de Información Geográfica.

Establecer ejemplos de conocimiento ecológico básico e inicial para especies poco o nada estudiadas de la región árida y semiárida sonorense.

VI. METODOLOGÍA

VI.1. Selección de Especies

Las especies a trabajar fueron seleccionadas entre una amplia lista de especies de las zonas áridas y semiáridas de Sonora, ya sea por su gran importancia en los procesos ecológicos de la región dentro de sus diferentes ecosistemas, o porque son consideradas como recursos naturales importantes por su potencial, para uso en la producción de bioenergía sin competir por recursos como espacio y agua, o con especies de cultivo utilizadas para la alimentación.

Se seleccionaron 12 especies pertenecientes a 6 familias y a 8 géneros, las especies por potencial productivos seleccionadas fueron: *Acacia cochliacantha*, *Agave angustifolia*, *Cucurbita digitata*, *Cucurbita palmeri*, *Encelia farinosa*, *Jatropha cardiophylla*, *Jatropha cinerea* y *Jatropha cordata*, y las especies de interés que se seleccionaron por su importancia ecológica fueron: *Olneya tesota*, *Prosopis glandulosa*, *Prosopis velutina* y además se seleccionó una especie exótica (*Pennisetum ciliare*) por su importancia como responsable de cambios de gran importancia ecológica dentro del Desierto Sonorense. ([Tabla III](#))

VI.2. Bases de datos

Se revisaron diferentes bases de datos en línea para obtener registros de presencia para las especies seleccionadas. Las coordenadas de los puntos de presencia para cada una de las especies de estudio, fueron obtenidos de las bases de datos en línea de Southwest Environmental Information Network (SEINet), la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB), y la de Global Biodiversity Information Facility (GBIF), descargando todos los registros que se encontraron en dichas bases de datos. Las coordenadas fueron manipuladas en una hoja de cálculo para estandarizar el formato a coordenadas geográficas (grados decimales).

Los puntos de presencia de las especies, fueron guardados en un archivo de texto delimitado por comas para su uso en Maxent, donde la primera columna contiene el nombre o

clave previamente asignada para cada una de las especies, la segunda el valor de la coordenada en Longitud, y el tercera el valor de la coordenada en Latitud, ambas coordenadas en formato decimal.

Tabla III. Lista de especies seleccionadas para modelar su distribución potencial.

Espece	Criterio de selección
<i>Acacia cochliacantha</i>	Arbustiva con potencial energético. Potencial invasora.
<i>Agave angustifolia</i>	Importancia económica como bebida. Potencial bioenergético.
<i>Cucurbita digitata</i>	Potencial bioenergético.
<i>Cucurbita palmeri</i>	Potencial bioenergético.
<i>Encelia farinosa</i>	Potencial bioenergético. Potencial invasora.
<i>Jatropha cardiophylla</i>	Potencial bioenergético. Comparativo ecofisiológico utilizando modelos bioclimáticos.
<i>Jatropha cinerea</i>	Potencial bioenergético. Comparativo ecofisiológico utilizando modelos bioclimáticos.
<i>Jatropha cordata</i>	Potencial bioenergético. Comparativo ecofisiológico utilizando modelos bioclimáticos.
<i>Olneya tesota</i>	Importancia ecológica. Espece bajo status de protección.
<i>Prosopis glandulosa</i>	Importancia ecológica. Comparativo ecofisiológico utilizando modelos bioclimáticos.
<i>Prosopis velutina</i>	Importancia ecológica. Comparativo ecofisiológico utilizando modelos bioclimáticos.
<i>Pennisetum ciliare</i>	Importancia económica y ecológica. Exótica introducida. Potencial invasora.

VI.3. Modelos de Nicho Ecológico

La metodología del algoritmo de máxima entropía utilizado por Maxent está ampliamente descrito en el trabajo de Phillips et al. (2006). En breve, Maxent utiliza un algoritmo de máxima entropía, el cual se encarga de generar una distribución de probabilidad más extendida

o cercana a la uniforme en el área de estudio (píxeles de las capas temáticas empleadas) mediante una serie de restricciones provenientes de información incompleta de la distribución de la especie (los puntos georeferenciados, donde se tiene registro de presencia de la especie) y complementada con información ambiental (las capas climatológicas y/o temáticas del área de estudio) ([Phillips et al., 2006](#); [Longoria-Quiroz, 2008](#); [Antaramián y Ortega, 2009](#)).

Las capas climáticas ([tabla IV](#)) en formato ASCII y en coordenadas geográficas, que se usaron para generar los modelos de distribución de especies, fueron proporcionadas por el Dr. Oswaldo Téllez de la Universidad Nacional Autónoma de México, y corresponden a la superficie total de la República Mexicana, la parte sur de Estados Unidos de Norteamérica y algunos países de Centroamérica y del Caribe. Dichas capas fueron generadas mediante un proceso de interpolación utilizando datos obtenidos de las estaciones meteorológicas del país y regiones aledañas para tener un mejor ajuste, se utilizó el algoritmo “spline” para generar la interpolación mediante el paquete ANUCLIM ([Téllez et al., 2011](#)).

Tabla IV. Listado de variables bioclimáticas utilizadas. Modificado de [Villaseñor y Téllez, 2004](#).

Variables Ambientales	Siglas	Bioclim
Temperatura Promedio Anual	TPA	BIO1
Oscilación Diurna de la Temperatura	ODT	BIO2
Isotermalidad (°C) (Coeficiente entre parámetros 2/7)	ISO	BIO3
Estacionalidad de la temperatura (Coeficiente de variación, %)	ET	BIO4
Temperatura máxima promedio del periodo más caliente (°C)	TMPPC	BIO5
Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C)	TMPPF	BIO6
Oscilación anual de la temperatura (°C) (cociente entre parámetros 5/6)	OAT	BIO7
Temperatura promedio del cuatrimestre lluvioso (°C)	TPCLL	BIO8
Temperatura promedio del cuatrimestre seco (°C)	TPCS	BIO9
Temperatura promedio del cuatrimestre cálido (°C)	TPCC	BIO10
Temperatura promedio del cuatrimestre frío (°C)	TPCF	BIO11
Precipitación anual (mm)	PA	BIO12
Precipitación del periodo más lluvioso (mm)	PPLL	BIO13
Precipitación del periodo más seco (mm)	PPS	BIO14
Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)	EP	BIO15
Precipitación del cuatrimestre lluvioso (mm)	PCLL	BIO16
Precipitación del cuatrimestre seco (mm)	PCS	BIO17
Precipitación del cuatrimestre cálido (mm)	PCC	BIO18
Precipitación del cuatrimestre frío (mm)	PCF	BIO19

Al programa se le indica la ruta del archivo con los puntos de presencia, la ruta con las capas climatológicas y la ruta donde guardan los archivos resultantes y esto se repite para cada especie. A pesar de que Maxent tiene la capacidad de generar todos los modelos al mismo tiempo a partir de un único archivo de presencia donde se encuentren todas las especies, los modelos fueron generados uno por uno para poder variar el porcentaje de puntos usados para evaluar el modelo, dependiendo de la cantidad de puntos totales con los que se cuente para cada una de las especies.

Maxent, proporciona un archivo en formato HTML con los datos estadísticos generados y calculados para las variables que más influyeron en el ajuste del modelo, y el porcentaje de aporte de cada una de ellas. Se determinaron las variables que más influyeron para cada especie y se tomaron en cuenta todas las que contribuyeron a que su sumatoria fuera

un valor superior al 90%, para posteriormente volver a realizar el modelo tomando en cuenta únicamente esas variables.

El modelo resultante de la segunda prueba in silico, fue evaluado mediante el área bajo la curva ROC generada por el modelo, la cual es una prueba para medir la eficiencia de un modelo binario de presencia-ausencia. Dicha área bajo la curva se mide en un rango de cero a uno, donde un valor igual o inferior a 0.5 indica que el modelo tiene un ajuste igual o peor que uno generado al azar, por lo que se busca que dicho valor sea lo más cercano a uno, aunque un valor de 0.70 o superior es aceptable, ya que indica que el 70% de las veces el modelo tendrá un valor de probabilidad superior de modelar un punto de presencia con mayor certeza que uno de ausencia. ([Phillips et al., 2004](#), [Benito, 2009](#)).

VI.4. Post procesamiento de los datos

VI.4.1. Delimitación del área y reclasificación

Los modelos con un gradiente continuo de probabilidad de distribución aportan mayor información y son más manipulables que los modelos booleanos, sin embargo con el fin de generar un límite geográfico marcado, los modelos fueron reclasificados a modelos booleanos para lo cual, después de evaluar los modelos de distribución de especies, se procesó el archivo ASCII generado por Maxent, mediante el uso de software de Sistemas de Información Geográfica Quantum GIS (<http://www.qgis.org/>) y GRASS GIS (<http://grass.osgeo.org/>). Las capas resultantes del modelado de nicho ecológico, fueron delimitadas a la superficie correspondiente al Estado de Sonora, posteriormente fueron sometidos a un proceso de reclasificación en modelos booleanos, de presencia-ausencia. Se tomó como punto de corte la probabilidad en la que se encontraron el 90% de todos los puntos (dato que proporciona Maxent en el archivo de reporte), y para cada pixel que se encontró por debajo de dicho valor fue reclasificado con un valor de cero, como ausencia de la especie o valor no deseado, y a cada pixel con un valor superior se le asignó un valor de uno, indicando presencia de la especie o valor deseado.

VI.4.2. Valores Ambientales

Para obtener los valores ambientales presentes en las distribuciones potenciales de las especies, se utilizaron los valores de uno de los archivos booleanos para enmascarar las capas de las variables ambientales y se realizó un corte del archivo raster, posteriormente se extrajeron los datos de cada pixel.

Los rangos de los valores bioclimáticos obtenidos para cada una de las especies fue analizado mediante el paquete estadístico R-Project (<http://www.r-project.org/>) con el fin de determinar la diferenciación ecológico-ambiental para cada una de las especies.

VI.4.3. Capas temáticas

Los polígonos vectorizados catalogados como presencia de las especies, sirvieron para enmascarar y cortar las capas de Edafología y Tipo de Suelo y Vegetación, obtenidas del portal de internet de INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>). A partir de ese corte se determinaron los tipos y superficies para cada clase en ambas capas y la relación con la cobertura total de todo el Estado de Sonora.

VII. RESULTADOS

VII.1. Modelos de Distribución

Se generó una base de datos con las distribuciones potenciales de especies de importancia para uso energético para las especies *Acacia cochliacantha*, *Agave angustifolia*, *Cucurbita digitata*, *Cucurbita palmeri*, *Encelia farinosa*, *Jatropha cardiophylla*, *Jatropha cinerea*, *Jatropha cordata*, y de importancia ecológica por su dominancia en diferentes ecosistemas desérticos como *Olneya tesota*, *Pennisetum ciliare*, *Prosopis glandulosa* y *Prosopis velutina*. Se estudiaron 12 especies de interés, pertenecientes a 8 géneros y a 6 familias. Con un total de 6,176 registros de presencia ([Tabla V](#))

Tabla V. Número de registros de presencia por especie. Obtenidas de las bases de datos de la REMIB, SEINet, y GBIF.

Espece	Número de Registros
<i>Acacia cochliacantha</i>	692
<i>Agave angustifolia</i>	516
<i>Cucurbita digitata</i>	215
<i>Cucurbita palmeri</i>	24
<i>Encelia farinosa</i>	992
<i>Jatropha cardiophylla</i>	355
<i>Jatropha cinerea</i>	223
<i>Jatropha cordata</i>	329
<i>Olneya tesota</i>	582
<i>Pennisetum ciliare</i>	492
<i>Prosopis glandulosa</i>	807
<i>Prosopis velutina</i>	949

Utilizando los registros de bases de datos y el modelador Maxent se obtuvieron los polígonos referentes a la distribución potencial dentro del Estado de Sonora para las especies seleccionadas para este trabajo. Aquéllos modelos de especies de interés productivo se muestran en las Figuras 5 a 20, y modelos de distribución para las especies de interés ecológico en la Figuras 21 a 28.

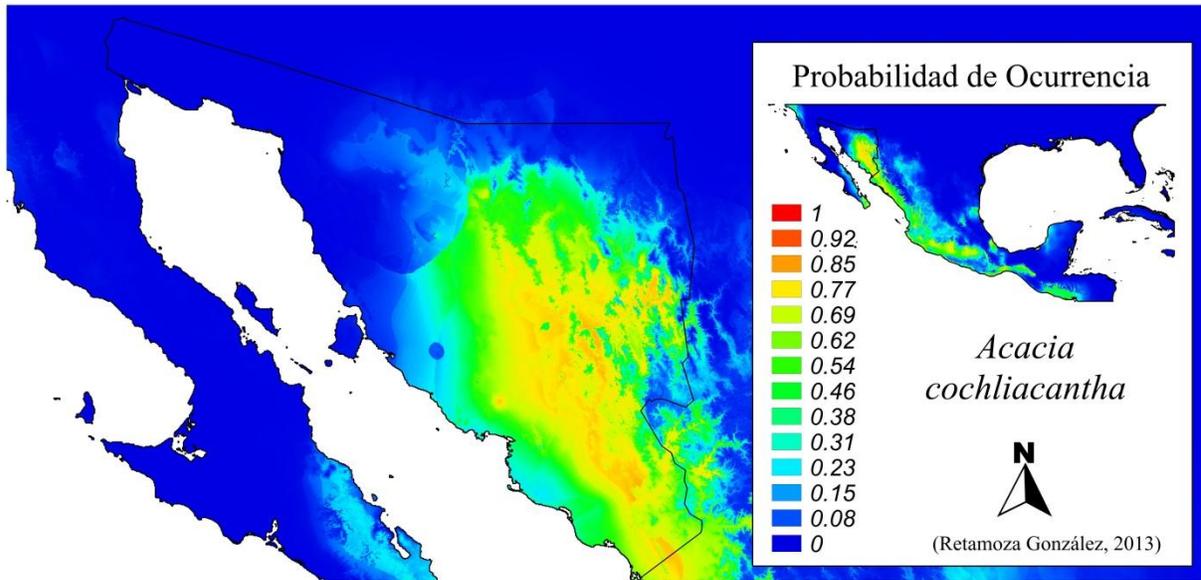


Figura 5. Modelo continuo de distribución de *Acacia cochliacantha* generado con Maxent.

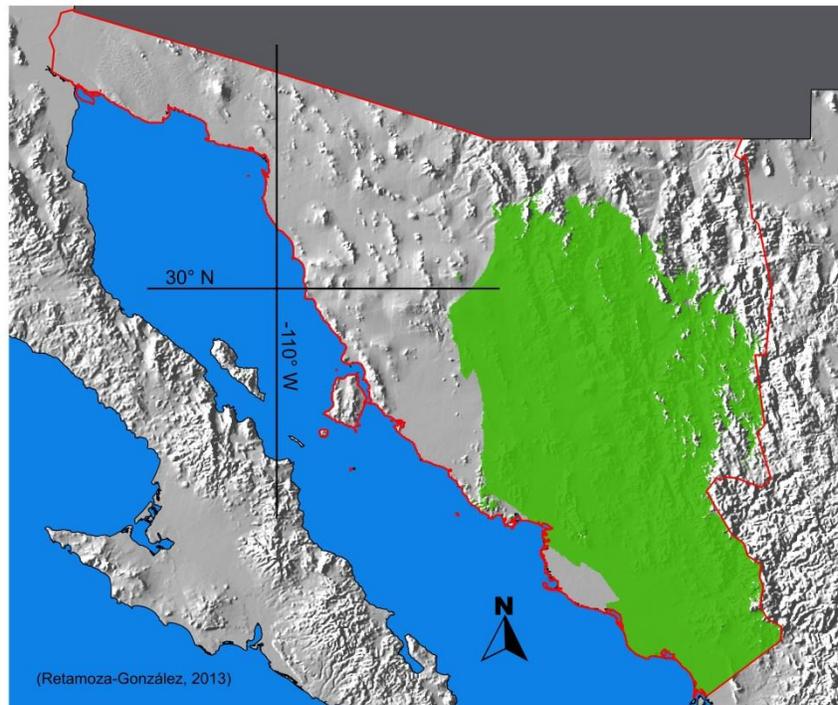


Figura 6. Distribución potencial de *Acacia cochliacantha* dentro del Estado de Sonora.

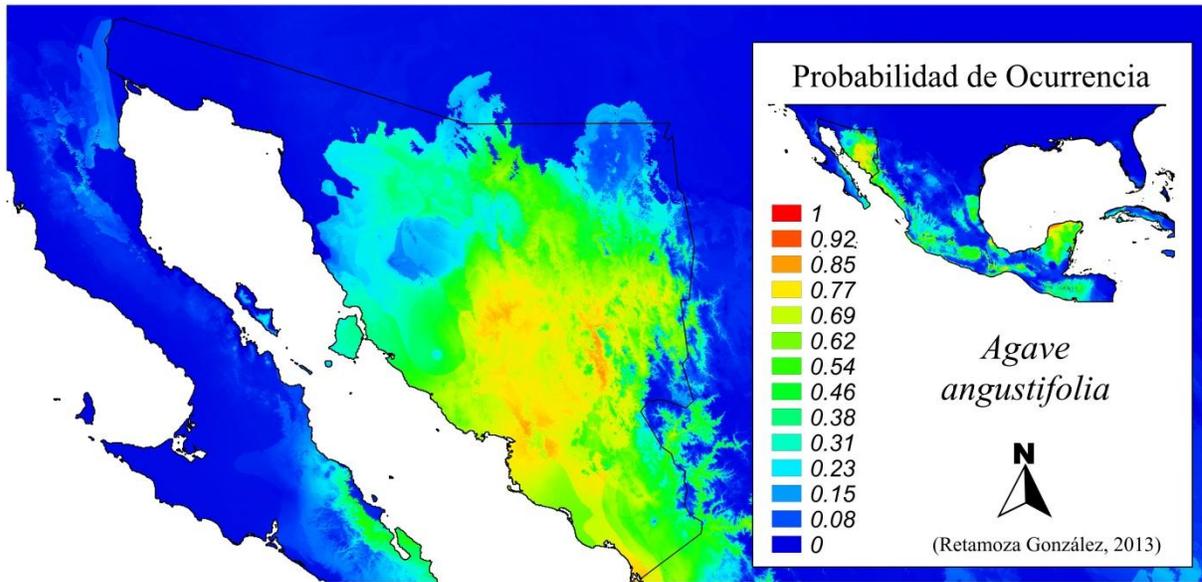


Figura 7. Modelo continuo de distribución de *Agave angustifolia* generado con Maxent.

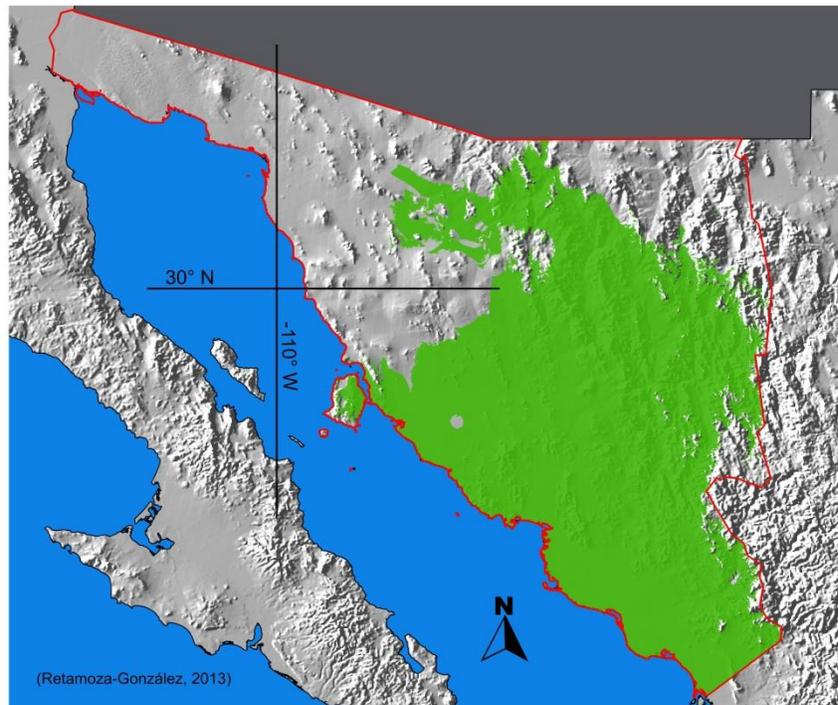


Figura 8. Distribución potencial de *Agave angustifolia* dentro del Estado de Sonora.

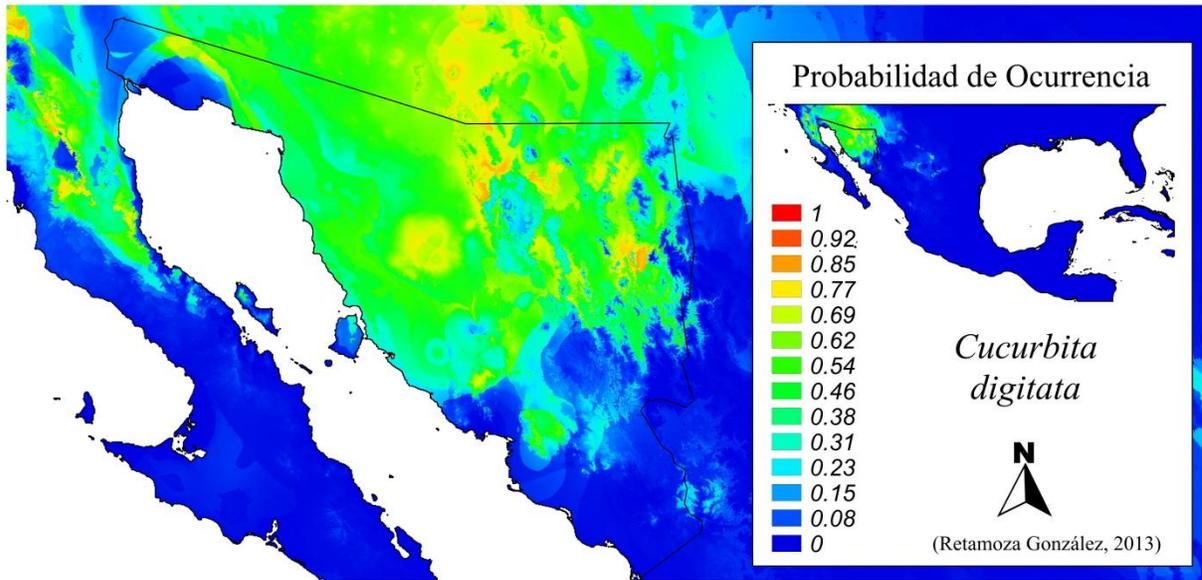


Figura 9. Modelo continuo de distribución de *Cucurbita digitata* generado con Maxent.

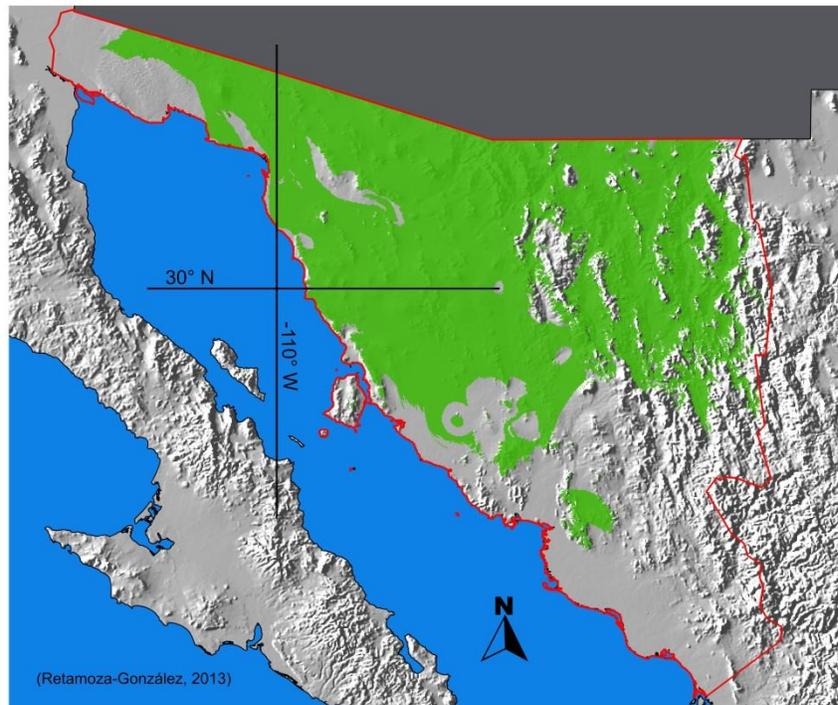


Figura 10. Distribución potencial de *Cucurbita digitata* dentro del Estado de Sonora.

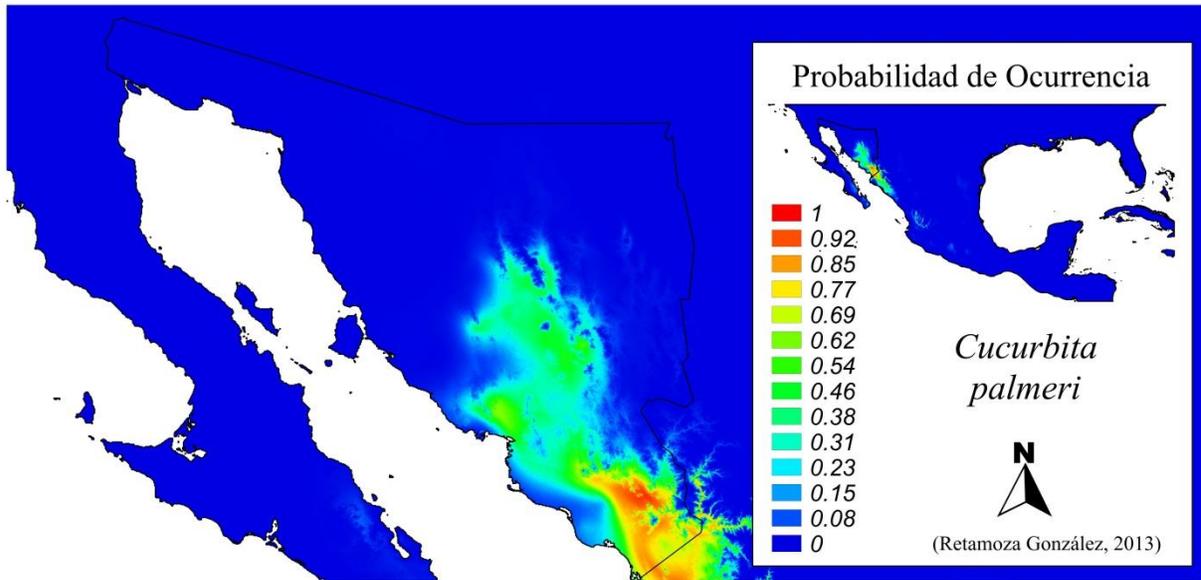


Figura 11. Modelo continuo de distribución de *Cucurbita palmeri* generado con Maxent.

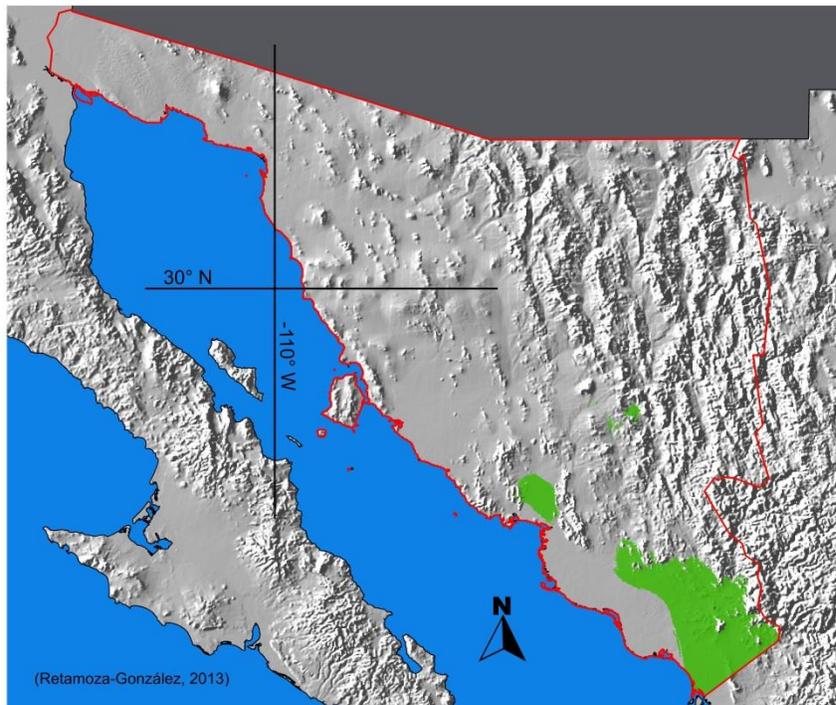


Figura 12. Distribución potencial de *Cucurbita palmeri* dentro del Estado de Sonora.

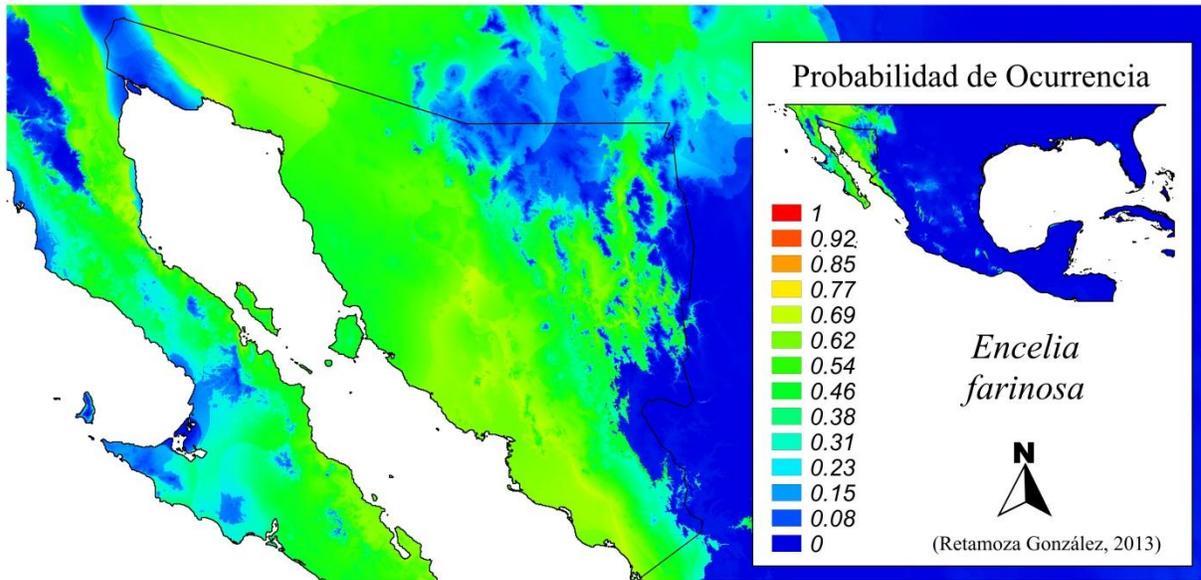


Figura 13. Modelo continuo de distribución de *Encelia farinosa* generado con Maxent.

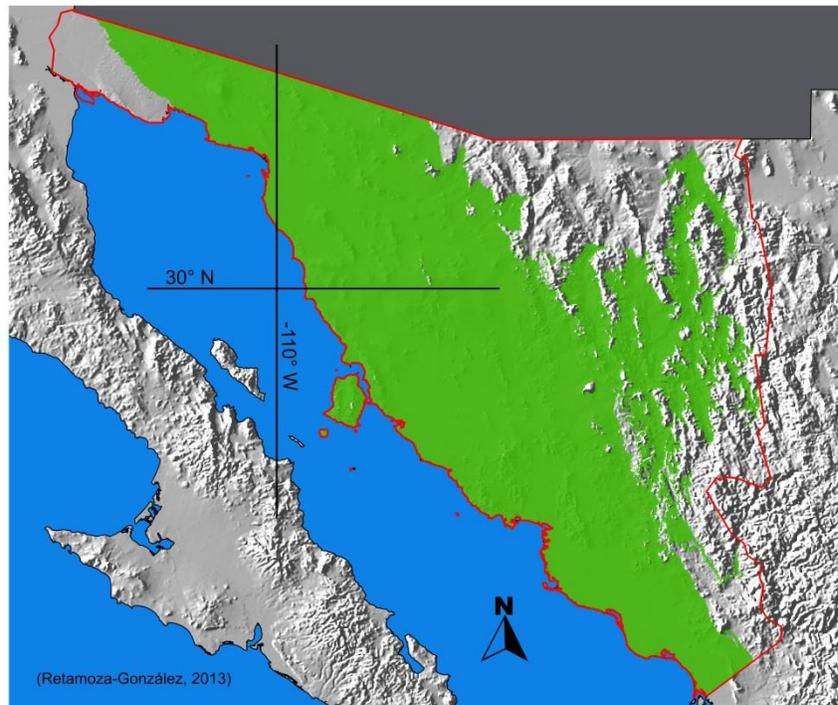


Figura 14 Distribución potencial de *Encelia farinosa* dentro del Estado de Sonora.

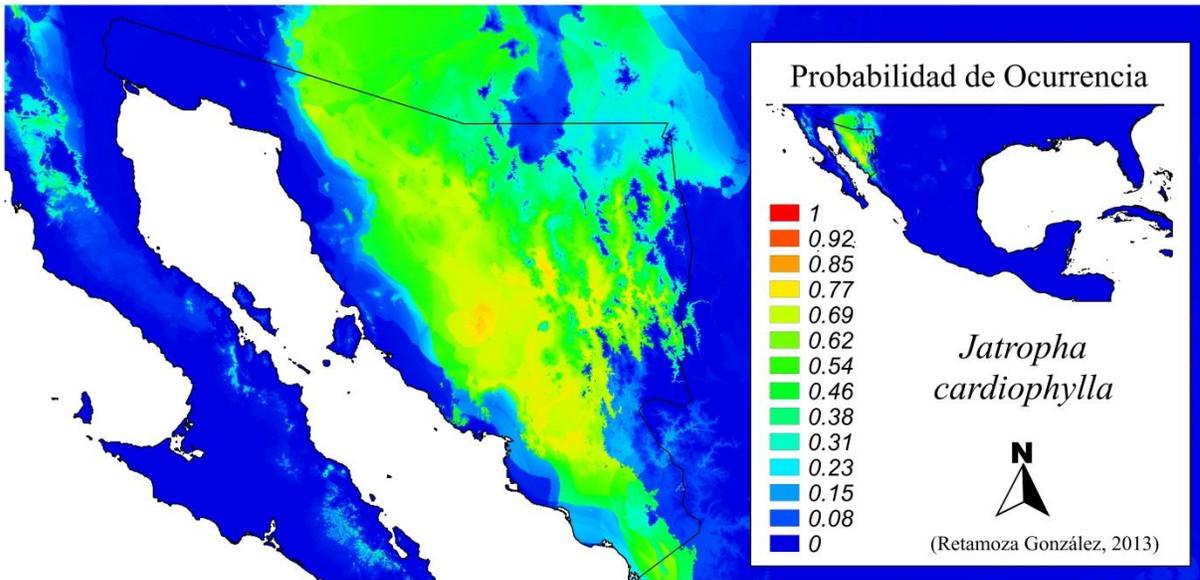


Figura 15. Modelo continuo de distribución de *Jatropha cardiophylla* generado con Maxent.

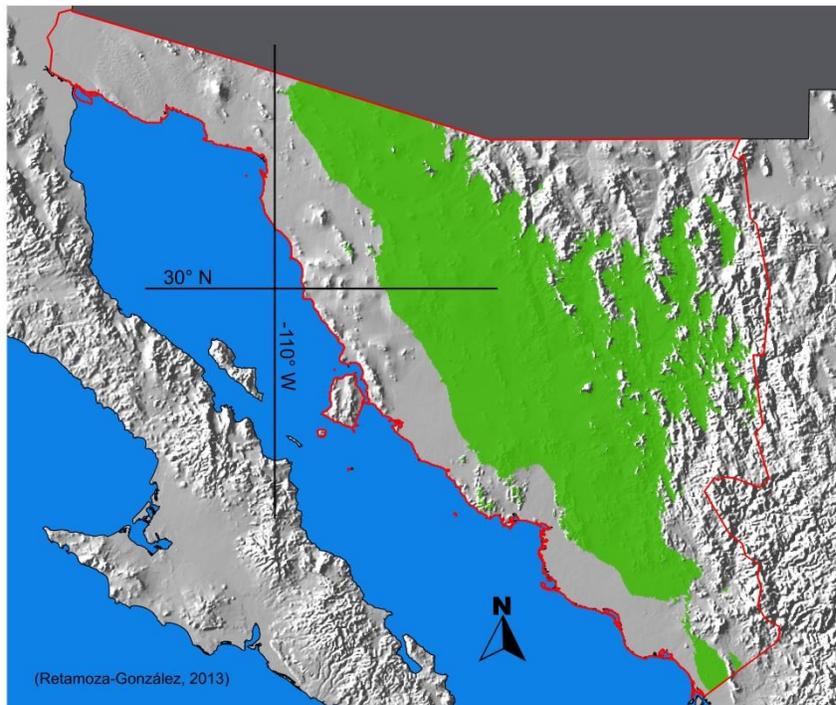


Figura 16. Distribución potencial de *Jatropha cardiophylla* dentro del Estado de Sonora.

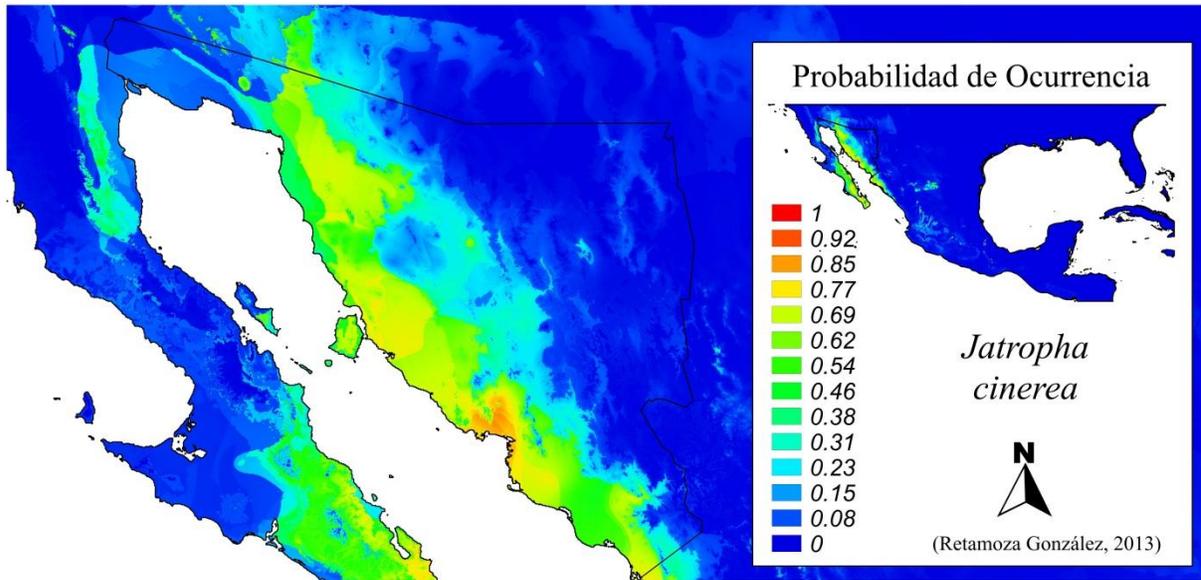


Figura 17 Modelo continuo de distribución de *Jatropha cinerea* generado con Maxent.

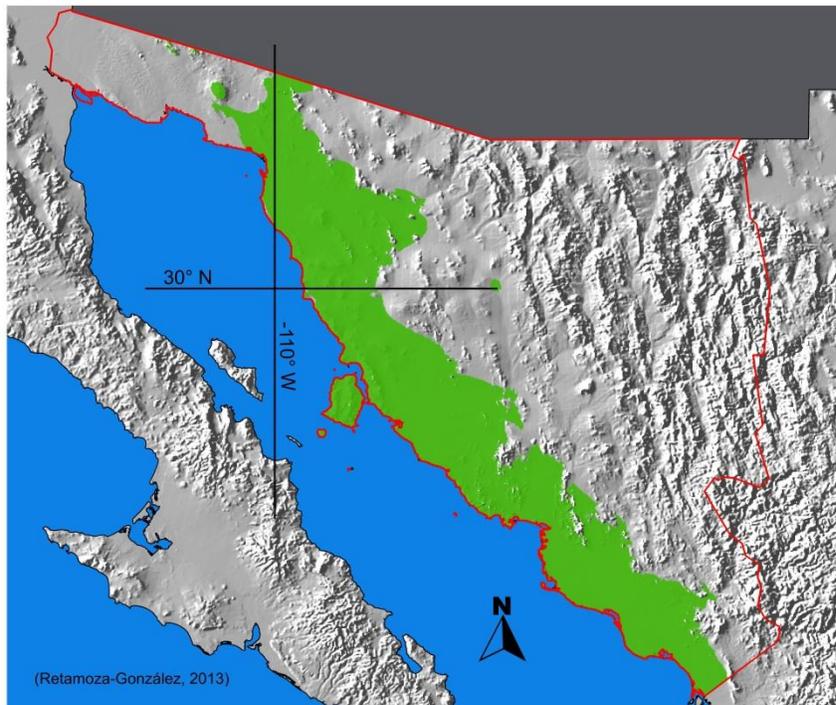


Figura 18. Distribución potencial de *Jatropha cinerea* dentro del Estado de Sonora.

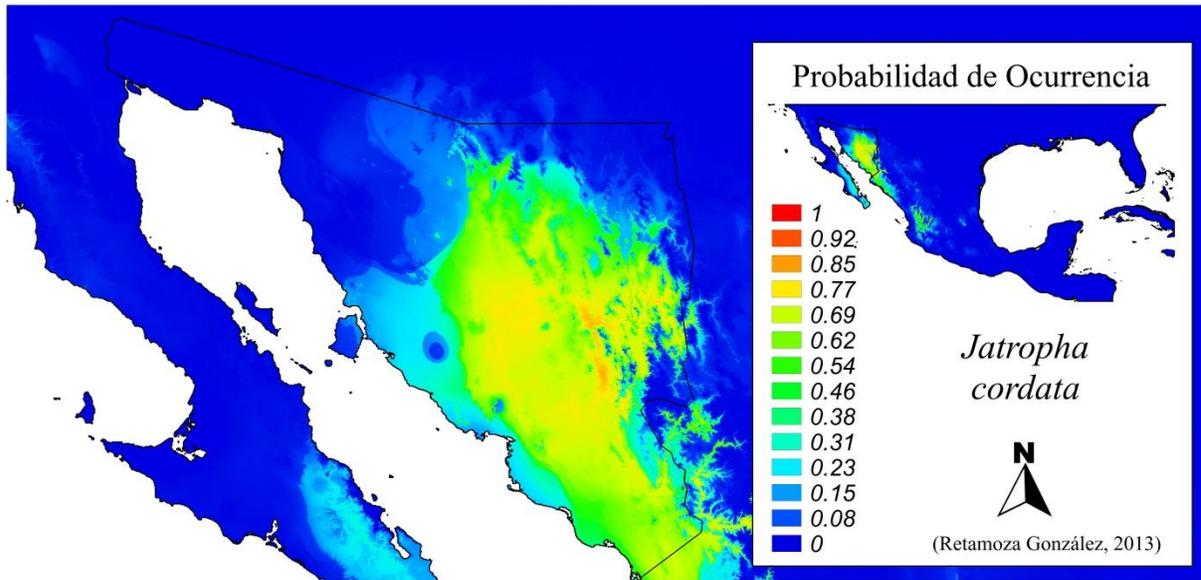


Figura 19. Modelo continuo de distribución de *Jatropha cordata* generado con Maxent.

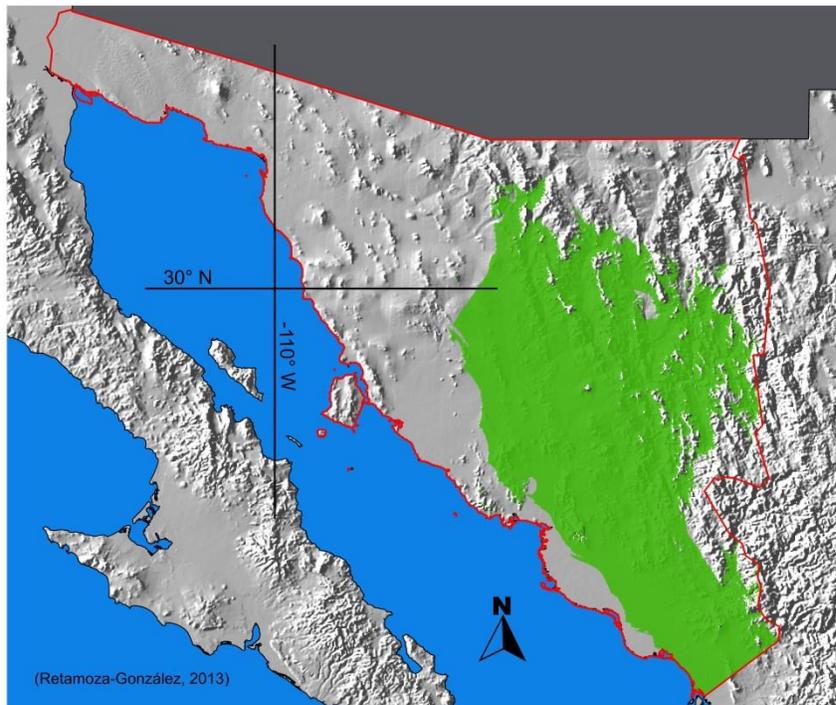


Figura 20. Distribución potencial de *Jatropha cordata* dentro del Estado de Sonora.

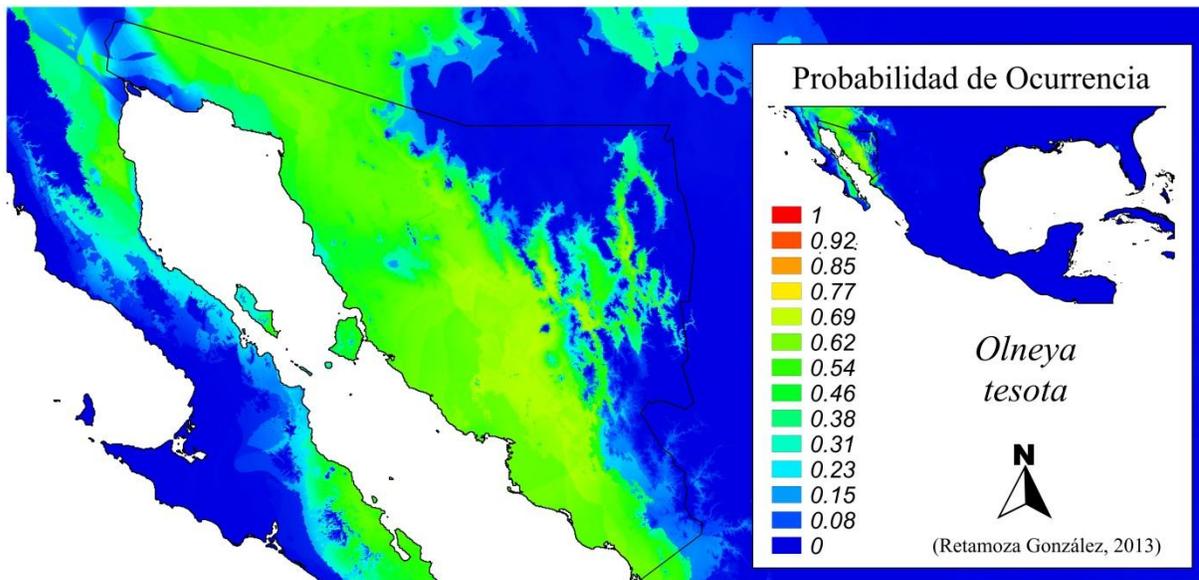


Figura 21. Modelo continuo de distribución de *Olneya tesota* generado con Maxent.

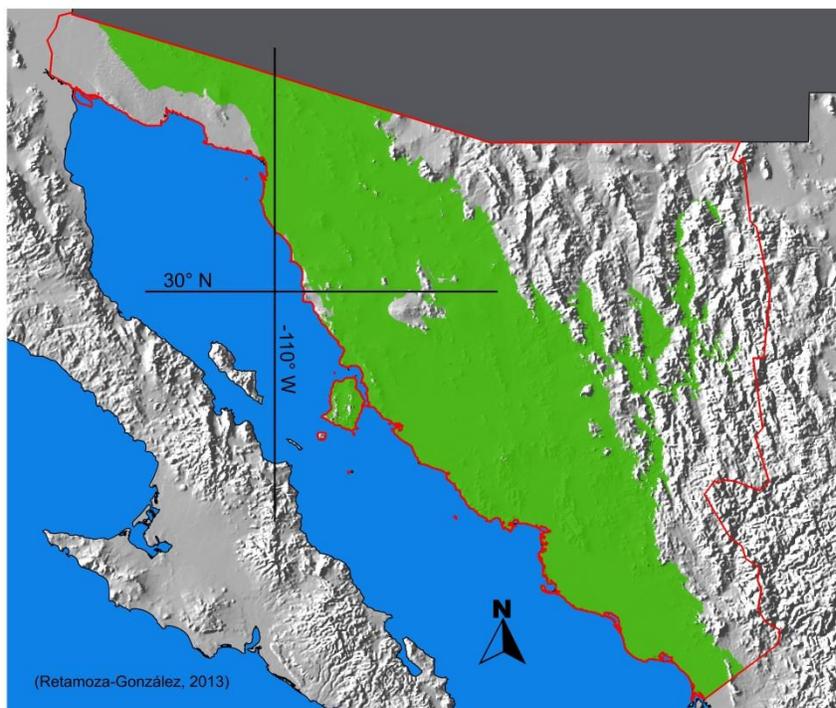


Figura 22. Distribución potencial de *Olneya tesota* dentro del Estado de Sonora.

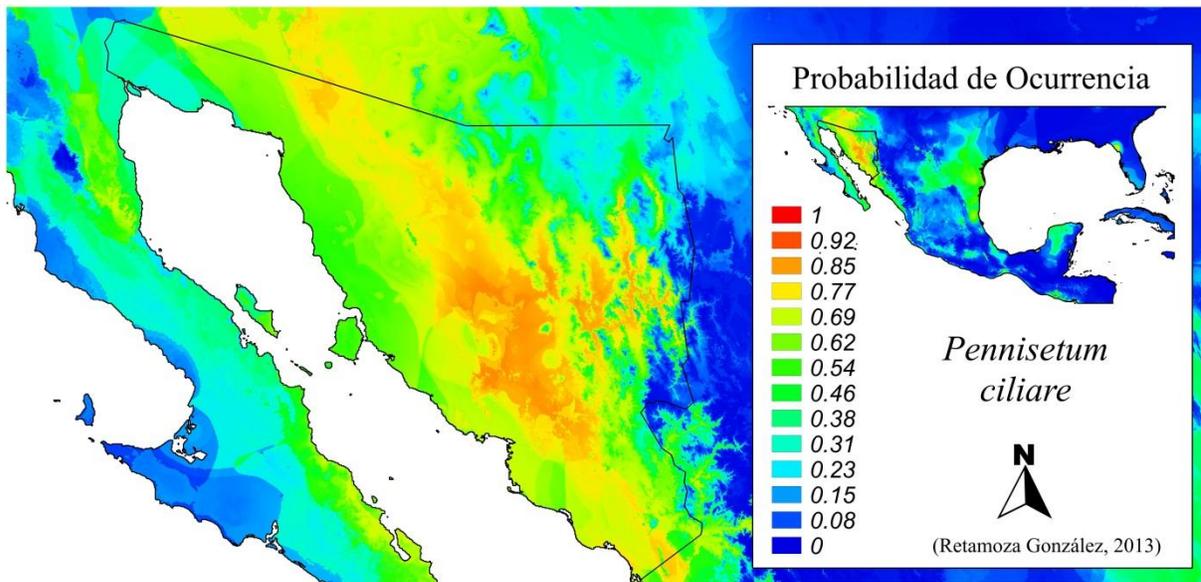


Figura 23. Modelo continuo de distribución de *Pennisetum ciliare* generado con Maxent.

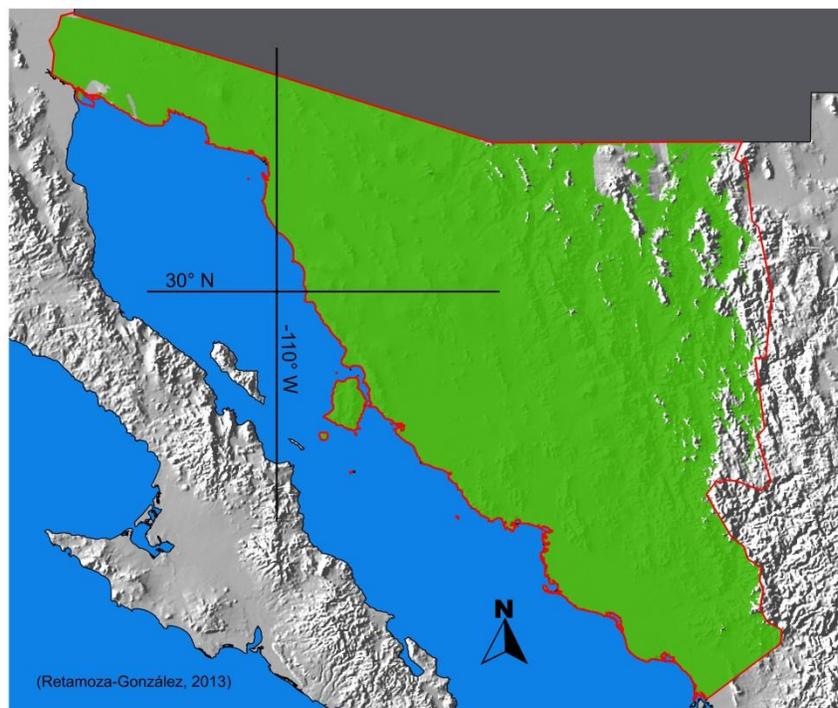


Figura 24. Distribución potencial de *Pennisetum ciliare* dentro del Estado de Sonora.

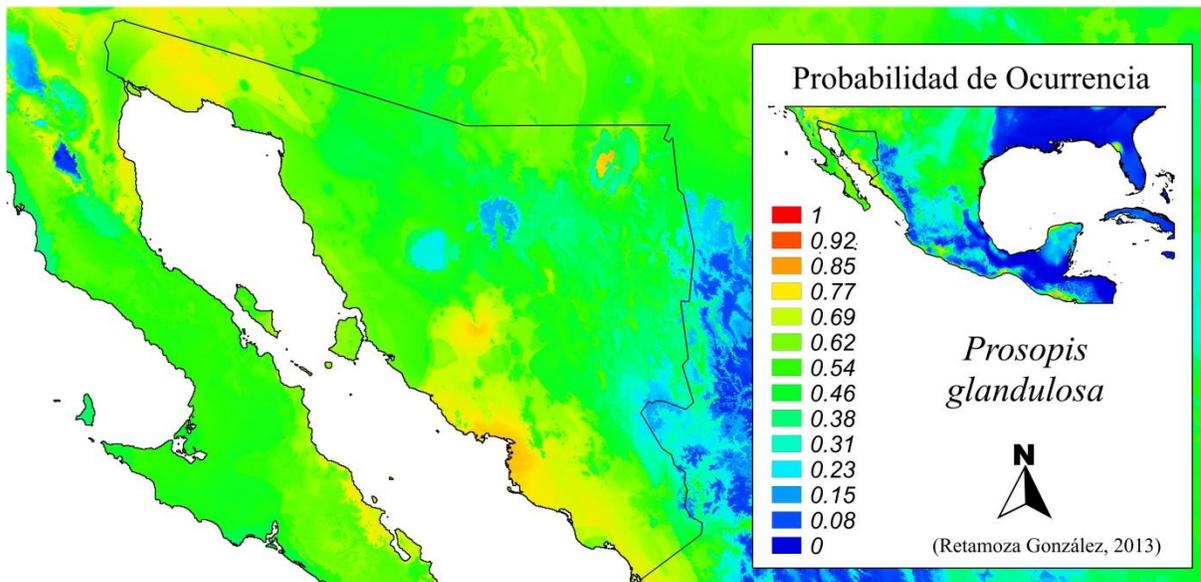


Figura 25. Modelo continuo de distribución de *Prosopis glandulosa* generado con Maxent.

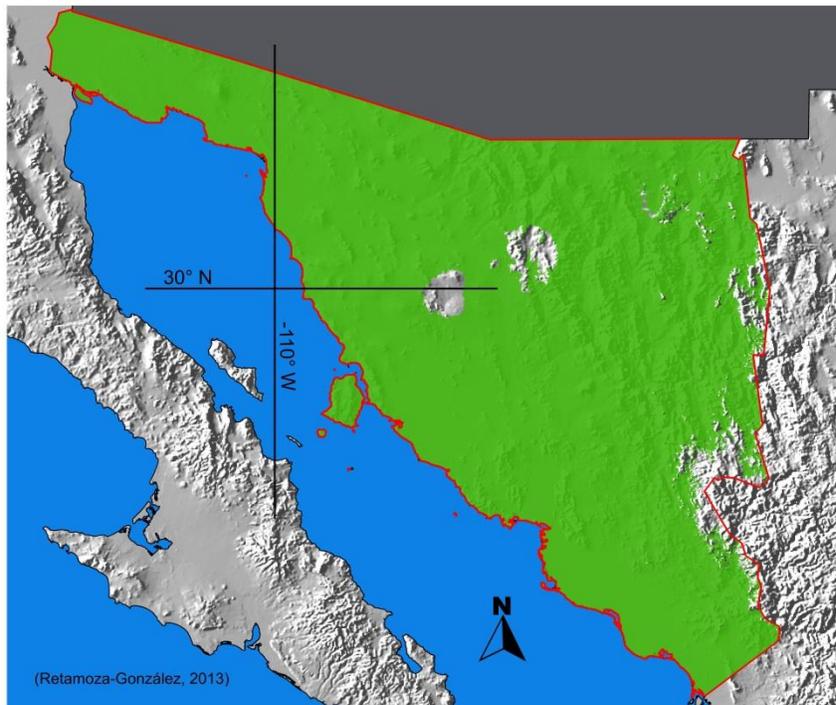


Figura 26. Distribución potencial de *Prosopis glandulosa* dentro del Estado de Sonora.

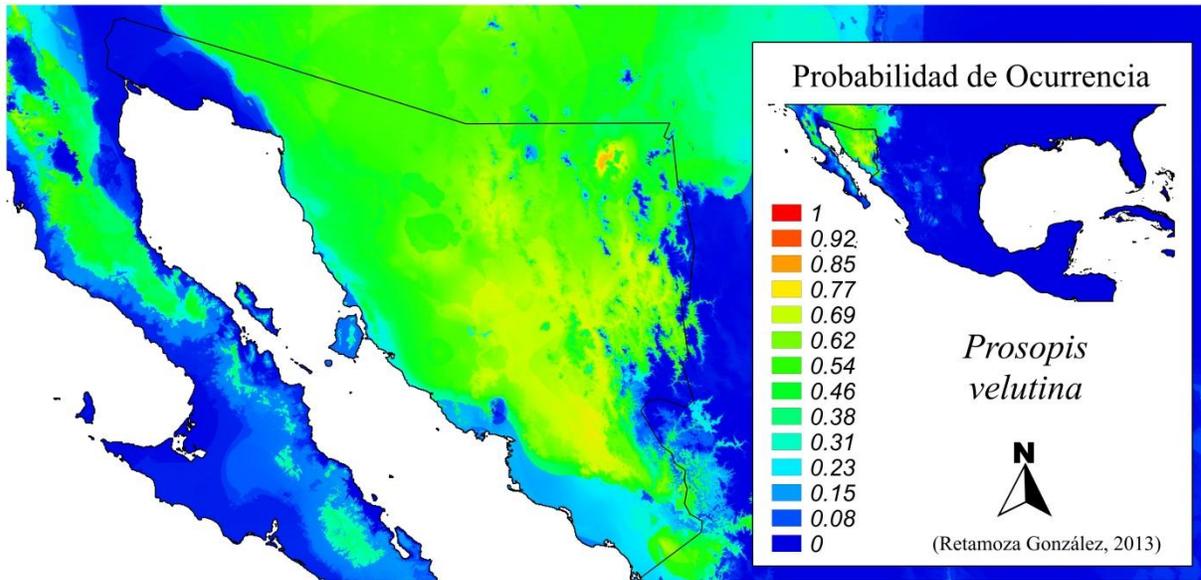


Figura 27. Modelo continuo de distribución de *Prosopis velutina* generado con Maxent.

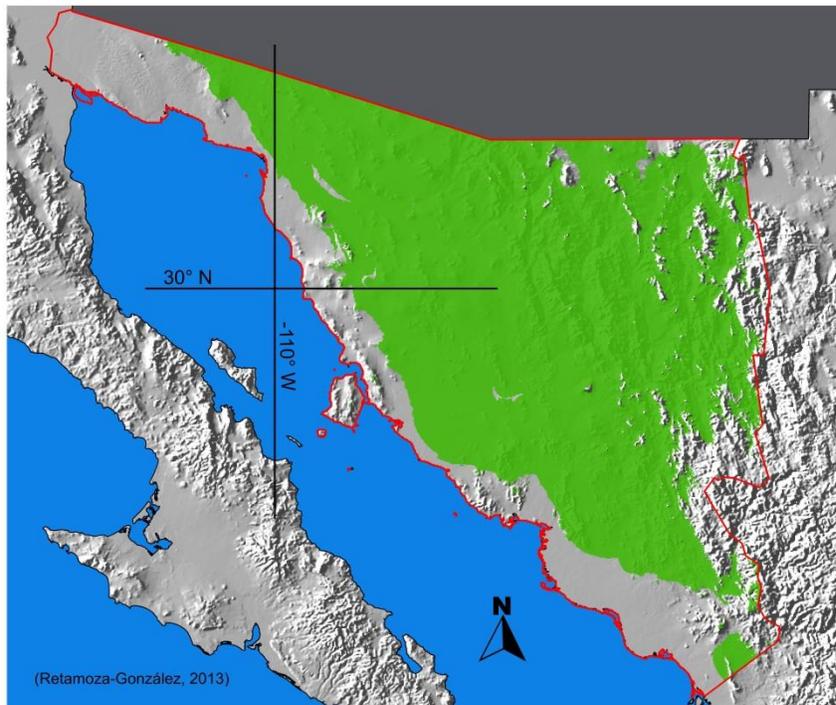


Figura 28. Distribución potencial de *Prosopis velutina* dentro del Estado de Sonora.

Las distribuciones potenciales muestran que algunas especies tienen distribución biogeográfica restringida como en el caso de *Cucurbita palmeri* ([Figuras 11 y 12](#)), principalmente a la región sur y más tropical del estado. Igualmente para algunas otras especies, entre ellas la misma *Cucurbita palmeri*, *Jatropha cordata* ([Figuras 19 y 20](#)), *Acacia cochliacantha* ([Figuras 5 y 6](#)) y *Agave angustifolia* ([Figuras 7 y 8](#)), tienen límites de distribución septentrionales dentro de las colindancias del Estado de Sonora.

Considerando las distribuciones potenciales de otras especies de importancia ecológica como *Prosopis velutina* ([Figuras 27 y 28](#)), *Prosopis glandulosa* ([Figura 25 y 26](#)) y la exótica introducida *Pennisetum ciliare* ([Figuras 23 y 24](#)), es claro en los modelos, su amplia distribución potencial dentro del Estado de Sonora.

Un aspecto ecológico observado dentro de los ecosistemas del Estado de Sonora es el hecho de la gran invasibilidad que presenta *Acacia cochliacantha* en sitios donde el pasto introducido *Pennisetum ciliare* se ha debilitado o degradado, ya sea por enfermedades o sobrepastoreo ([Miranda-Zarazúa et al., 2004](#)). Considerando los modelos de distribución potencial generados para ambas especies, es posible visualizar que sería esperable que esta invasibilidad sucesional de *A. cochliacantha* en sabanas de *P. ciliare* solo se presente en las porciones centrales (alrededor de los 30° N) y sur del estado, no así en la región más árida hacia la porción Oeste del estado.

Además de la generación de la distribución geográfica potencial de cada especie, se determinaron las variables ambientales que más influyeron en la distribución ecológica de cada una de las especies, así como los valores, rangos y frecuencias de cada variable ambiental. Mediante el uso de software especializado en sistemas de información geográfica y las capas de vegetación y tipo de suelo procedentes de INEGI, se obtuvieron los valores categóricos a los cuales se encontró asociada cada una de las especies, así como el porcentaje de cobertura potencial para cada especie, dentro de cada una de las categorías.

VII.2. Validación de los Modelos de Distribución Potencial

Los modelos fueron validados mediante el análisis de Característica Operativa del Receptor, o curva ROC (por sus siglas en inglés Receive Operating Characteristic), la cual determina el

grado de ajuste del modelo resultante a los datos de entrada, donde el valor óptimo del área bajo la curva es de uno, los valores por debajo de 0.5 reflejan modelos peores que los modelos generados al azar ([Figura 29](#) y [Figura 30](#))

Para las especies con interés productivo ([Figura 29](#)), los valores más altos en el análisis de validación fueron para *C. palmeri*, *J. cinerea* y *J. cordata*, con valores de 0.999, 0.987 y 0.987 respectivamente y los valores más bajos fueron para *A. angustifolia* y *E. farinosa*, con valores de 0.959 y 0.955 respectivamente. La especie con mejor ajuste (*C. palmeri*), es la que menor número de registros presenta, con tan solo 24 registros.

Los valores de validación para las especies con importancia ecológica ([Figura 30](#)), *O. tesota*, *P. velutina*, *P. ciliare*, *P. glandulosa*, fueron de 0.976, 0.968, 0.909 y 0.847 respectivamente. Siendo los valores de *Pennisetum ciliare* y de *Prosopis glandulosa* los dos valores de ajuste más bajos de todo el experimental, de la misma manera, estas dos especies son las que presentan un patrón de distribución potencial más amplio.

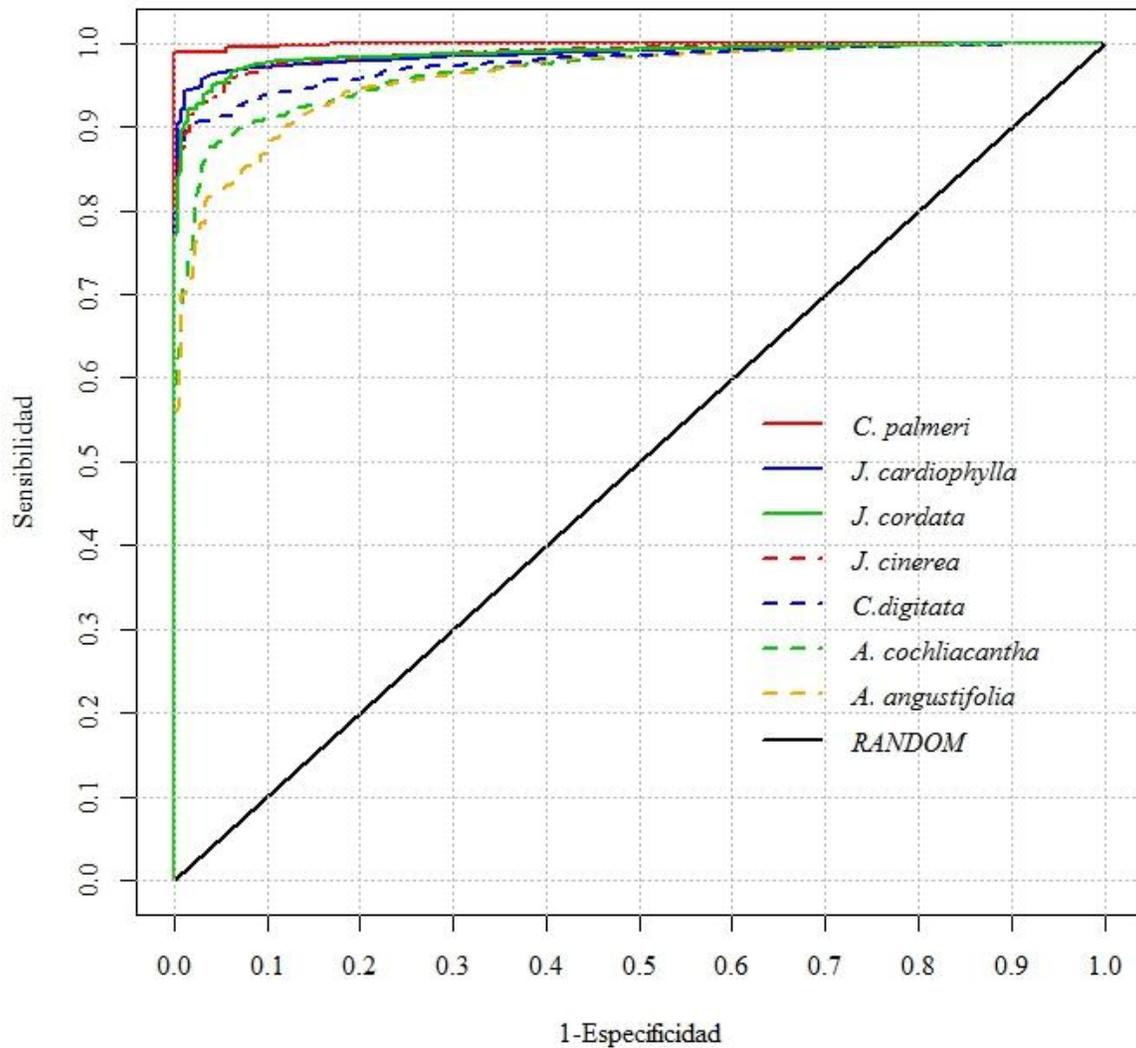


Figura 29. Análisis de ROC para las especies con importancia productiva. Gráfica que muestra el análisis de validación de los modelos de distribución de especies con importancia productiva, utilizando la curva de Característica Operativa del Receptor o Receive Operating Characteristic (ROC).

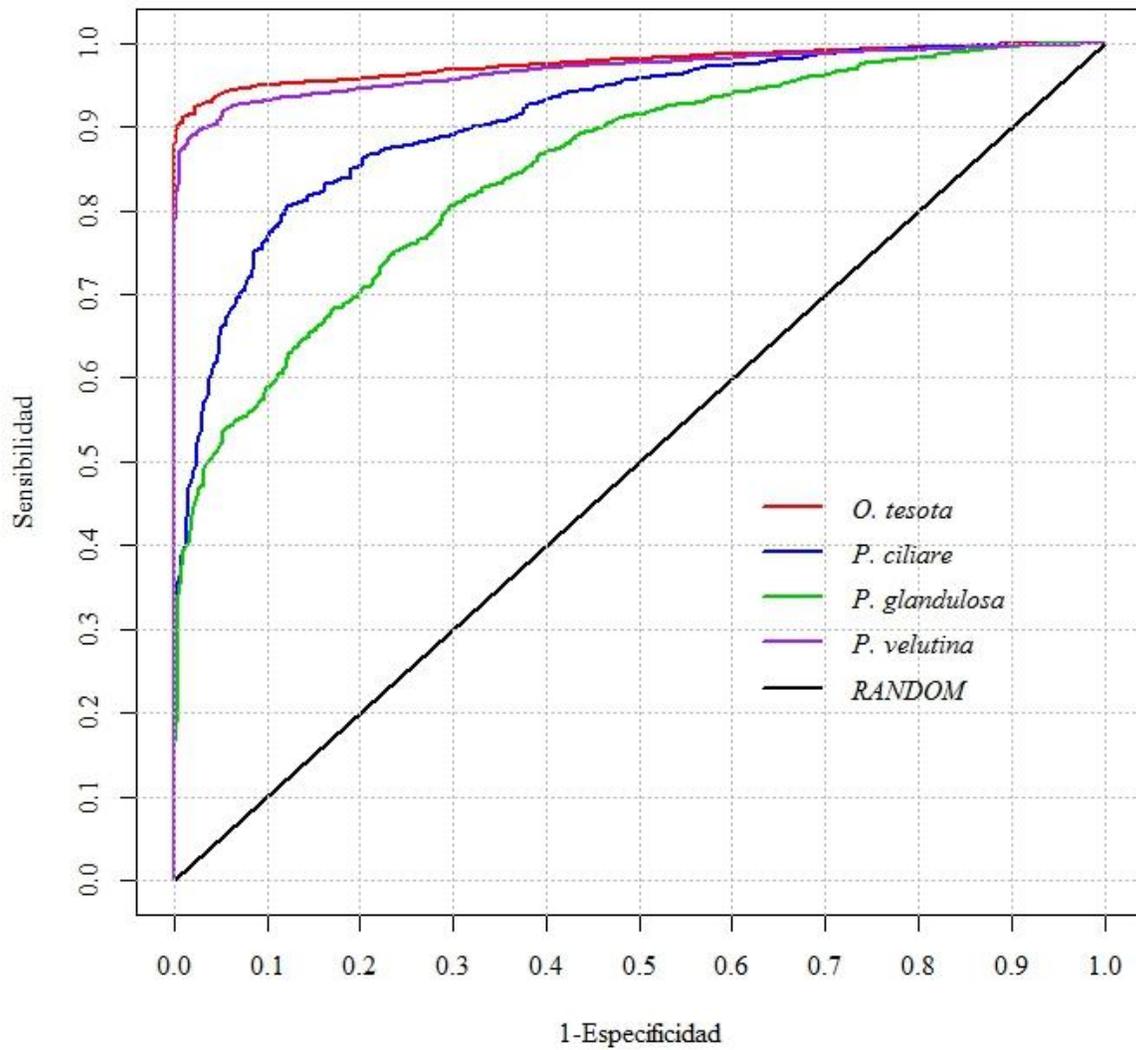


Figura 30. Análisis de ROC para las especies con importancia ecológica. Gráfica que muestra el análisis de validación de los modelos de distribución de especies de importancia ecológica utilizando la de Característica Operativa del Receptor o Receive Operating Characteristic (ROC).

En total, todos los valores de validación de los modelos son superiores a 0.8, indicando que todos los modelos resultantes presentan un buen ajuste a los datos de entrada ([Tabla VI](#)).

Tabla VI. Valores de validación de los modelos. Valores del área bajo la curva en el análisis de Característica Operativa del Receptor (ROC) utilizado para la validación de los modelos de distribución de especies.

Importancia Productiva		Importancia Ecológica	
Especie	Valor de la AUC	Especie	Valor de la AUC
<i>Cucurbita palmeri</i>	0.999	<i>Olneya tesota</i>	0.976
<i>Jatropha cinerea</i>	0.987	<i>Prosopis velutina</i>	0.968
<i>Jatropha cordata</i>	0.987	<i>Pennisetum ciliare</i>	0.909
<i>Jatropha cardiophylla</i>	0.986	<i>Prosopis glandulosa</i>	0.847
<i>Cucurbita digitata</i>	0.976		
<i>Acacia cochliacantha</i>	0.964		
<i>Agave angustifolia</i>	0.959		
<i>Encelia farinosa</i>	0.955		

VII.3. Superficies Potenciales

Se obtuvieron polígonos de distribución potencial para cada una de las especies utilizando una reclasificación del modelo continuo a un modelo booleano de presencia-ausencia; *Cucurbita digitata* fue la especie que presentó una menor distribución potencial dentro de los límites del Estado de Sonora, con una superficie de 1,056,294 Ha, representando un 5.84% de la superficie total del estado, seguido de *Jatropha cinerea*, la cual ocupa la franja costera, presentando una superficie potencial de 5,174,201 Ha, significando un 28.6% de la superficie estatal. Mientras que las dos especies que ocupan una mayor cobertura potencial son *Pennisetum ciliare* y *Prosopis glandulosa*, con 16,533,514 Ha y 17,173,898 Ha respectivamente, correspondiendo a 91.4% y 94.9% de la superficie estatal. ([Tabla VII](#)).

Tabla VII. Superficie de distribución potencial dentro del Estado de Sonora. Cálculo de superficie de distribución potencial dentro del Estado de Sonora y su proporción con respecto a la superficie total del estado

Especie	Superficie Potencial (Ha)	Cobertura del Estado (%)
<i>Cucurbita palmeri</i>	1,056,295	5.84
<i>Jatropha cinerea</i>	5,174,201	28.61
<i>Jatropha cordata</i>	7,106,910	39.29
<i>Jatropha cardiophylla</i>	8,183,781	45.24
<i>Acacia cochliacantha</i>	8,264,085	45.69
<i>Cucurbita digitata</i>	9,841,381	54.41
<i>Agave angustifolia</i>	10,174,827	56.25
<i>Encelia farinosa</i>	12,741,266	70.44
<i>Olneya tesota</i>	10,072,712	55.69
<i>Prosopis velutina</i>	12,601,886	69.67
<i>Pennisetum ciliare</i>	16,533,514	91.40
<i>Prosopis glandulosa</i>	17,173,898	94.94

VII.4. Variables Ambientales

A partir de los resultados obtenidos de la primera serie de modelados, se determinaron las variables ambientales que fueron utilizadas para la generación de los modelos de distribución finales, ya que solo se utilizaron las variables que aportaran el 90% de la construcción del modelo, el número de variables ambientales empleadas por especie fue distinto entre sí.

La variable ambiental más utilizada fue la temperatura promedio del cuatrimestre seco (TPCS) siendo utilizada en 11 de los 12 modelos, sin embargo en ninguno de los modelos en los que se utilizó fue la variable de mayor aporte, aunque si fue mayormente la segunda variable más importante, con aportaciones que van desde el 15.4% al 42.1%. Los valores de la contribución de cada variable ambiental para todas las especies de interés se detallan en la [tabla VIII](#)

Tabla VIII. Contribución de las variables ambientales en la generación de los modelos de distribución de especies. Ac-cooc: *Acacia cochliacanta*, Ag-an: *Agave angustifolia*, Cu-di: *Cucurbita digitata*, Cu-pa *Cucurbita palmeri*, En-fa: *Encelia farinosa*, Ja-ca: *Jatropha cardiophylla*, Ja-ci: *Jatropha cinerea*, Ja-co: *Jatropha cordata*, Ol-te: *Olneya tesota*, Pr-gl: *Prosopis glandulosa*, Pr-ve: *Prosopis velutina*, Pe-ci: *Penicetum ciliare*.

Variables bioclimáticas	Porcentaje de contribución para cada especie												
	Ac- coc	Ag- an	Cu- di	Cu- pa	En- fa	Ja- ca	Ja- ci	Ja- co	Ol- tr	Pr- gl	Pr- ve	Pe- ci	
Temperatura Promedio Anual													
Oscilación Diurna de la Temperatura		2.3	1.5			24.2		23.2			1.3	15.8	
Isotermalidad	3.4	35.7								5			
Estacionalidad de la temperatura	2.9	9.5	9.9	15.7		3.2		8.2	8.3	2.8			
Temperatura máxima promedio del periodo más caliente	7			17.8		17.3		12.6		8.5			
Temperatura mínima promedio del periodo más frío			11.8							6.8	5		
Oscilación anual de la temperatura			28.7	8.8		15.3					1.7	34.7	
Temperatura promedio del trimestre lluvioso		6.2					17.7		16.8	17.6	1.3		
Temperatura promedio del trimestre seco	15.4	21.8	22.9		42.1	14.4	11.1	15.7	28.9	13.9	13.4	27.6	
Temperatura promedio del trimestre cálido											8.7		
Temperatura promedio del trimestre frío							8.3				4.1		
Precipitación anual	3.2	13.5	8.1		45.9	11.5	16.7		32.7	34	51.5	10.2	
Precipitación del periodo más lluvioso													
Precipitación del periodo más seco													
Estacionalidad de la precipitación	63.2			32.4			12.9	32.1					
Precipitación del trimestre lluvioso	4.9												
Precipitación de trimestre seco		4.9	9.3	12.6	12		23.6		13.3			2.8	
Precipitación del trimestre cálido		6		8.5				4.4					
Precipitación del trimestre frío			7.8	4.3		14	9.7	3.8		11.4	13	8.9	

La otra variable ambiental que más se utilizó en la generación de los modelos de distribución potencial de especies fue la precipitación anual (PA), empleándose en un total de 10 modelos de distribución. Fue la variable con mayor aporte para cuatro especies con valores superiores al 32%, en menor grado para 2 especies.

El resto de las variables que presentaron un mayor grado de aporte en la generación de los modelos, fueron la estacionalidad de la precipitación (EP) para tres especies, la oscilación anual de la temperatura (OAT), para dos especies y la isothermalidad, la oscilación diurna de la temperatura (ODT) y la precipitación del cuatrimestre lluvioso (PCLL) para una especie cada una.

La estacionalidad de la temperatura (ET) fue la tercer variable más utilizada, interviniendo en la generación de ocho de los doce modelos, sin embargo, es una variable de poco aporte a los modelos, ya que aporta entre el 2.9% y el 15.7% a la explicación de los modelos. Isothermalidad (ISO) obtuvo para una especie un valor alto el cual fue de 35.7%, siendo este valor la variable más explicativa en la distribución de *Agave angustifolia*.

Las variables de precipitación del periodo más lluvioso (PPLL), La precipitación del periodo más seco (PPS) y la temperatura promedio anual (TPA), no fueron utilizadas para la generación de los modelos de ninguna de las especies de estudio.

La precipitación del cuatrimestre lluvioso (PCLL) y la temperatura promedio del cuatrimestre cálido (TPCC), solo intervinieron en la generación de un modelo cada uno. La temperatura promedio del cuatrimestre frío (TPCF), se utilizó en la generación de dos modelos y la isothermalidad (ISO), y la precipitación del cuatrimestre cálido (PCC) fueron utilizadas en la generación de tres modelos respectivamente, aunque la aportación de todas estas variables es baja, ya que van desde 3.4% hasta 8.5%.

VII.5. Rangos Climáticos

Los rangos de los valores ambientales y sus frecuencias se determinaron para las variables con las que se generaron los modelos finales, sin embargo, se estimaron para otras variables con el fin de comparar entre especies del mismo género o de interés.

Para las especies del género *Jatropha*, se determinaron los rangos y frecuencias de los valores de la estacionalidad de la precipitación, la oscilación diurna de la temperatura y la temperatura máxima promedio del periodo cálido.

Las tres especies de *Jatropha* se diferenciaron a lo largo de un gradiente de estacionalidad de la precipitación, *J. cinerea* se distribuyó con mayor frecuencia en sitios con menor estacionalidad de la precipitación, mientras que *J. cardiophylla* se encontró en regiones intermedias y *J. cordata* se ubicó con mayor frecuencia en hábitat con estacionalidad de la precipitación más alta. La diferenciación de los nichos obtenida para estas tres especies simpátricas de *Jatropha* mediante los modelos de distribución potencial, permiten visualizar las posibles diferencias ecológicas y ecofisiológicas en los mecanismos de soporte a la sequía entre las especies del mismo género, la naturaleza de los cuales podrían esclarecerse en el futuro con estudios específicos en esas área. ([Figura 31](#)).

Igualmente, las tres especies muestran una diferencia importante en la oscilación diurna de la temperatura, con *Jatropha cinerea* desplazada hacia hábitats con menor oscilación, lo cual probablemente se debe a la influencia marítima sobre las regiones costeras del estado en donde se le ubica con mayor frecuencia, lo cual parece ser igualmente confirmado con la menor temperatura máxima promedio para el periodo más cálido (TMPPC) encontrado con mayor frecuencia a lo largo de la distribución potencial de *J. cinerea*. Un mayor solapamiento de nicho en relación a esta variable presentaron *J. cardiophylla* y *J. cordata* ([Ver Figuras 32 y 33](#)).

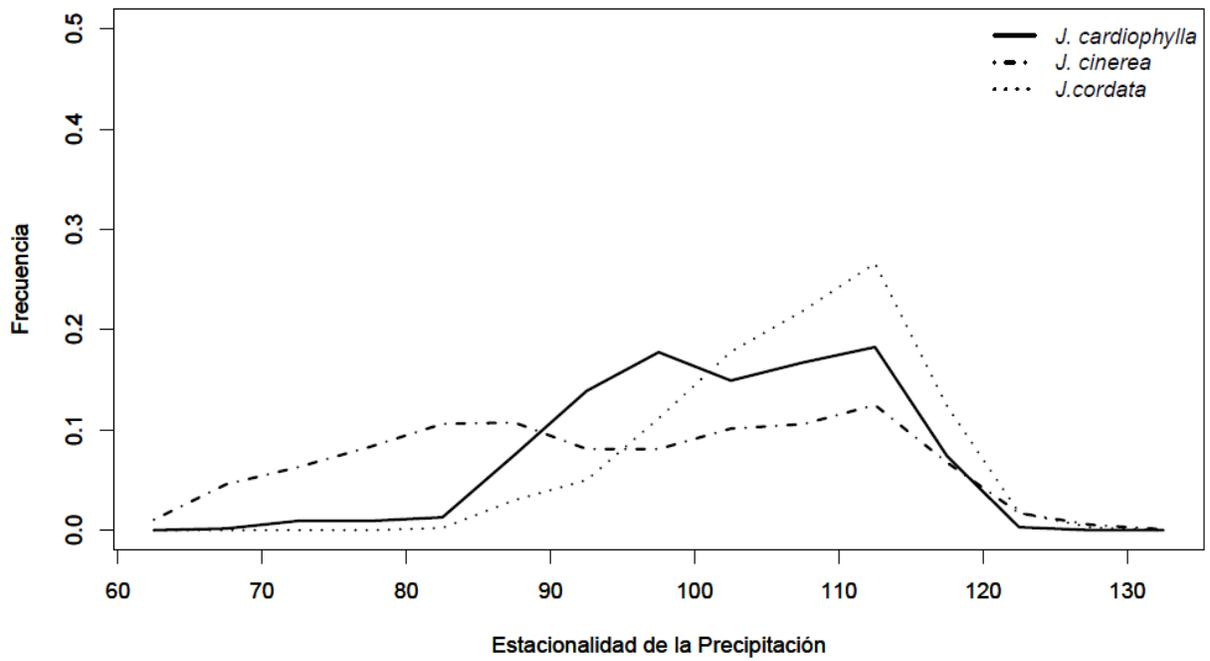


Figura 31. Estacionalidad de la precipitación para el género *Jatropha*.

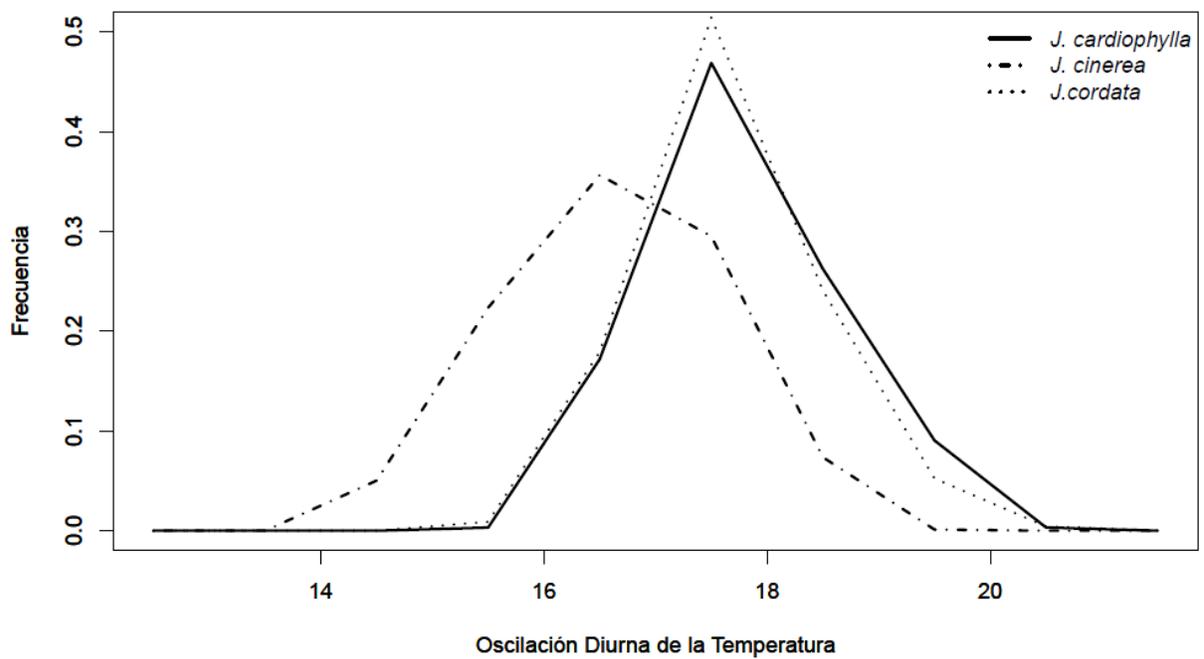


Figura 32. Oscilación diurna de la temperatura para el género *Jatropha*.

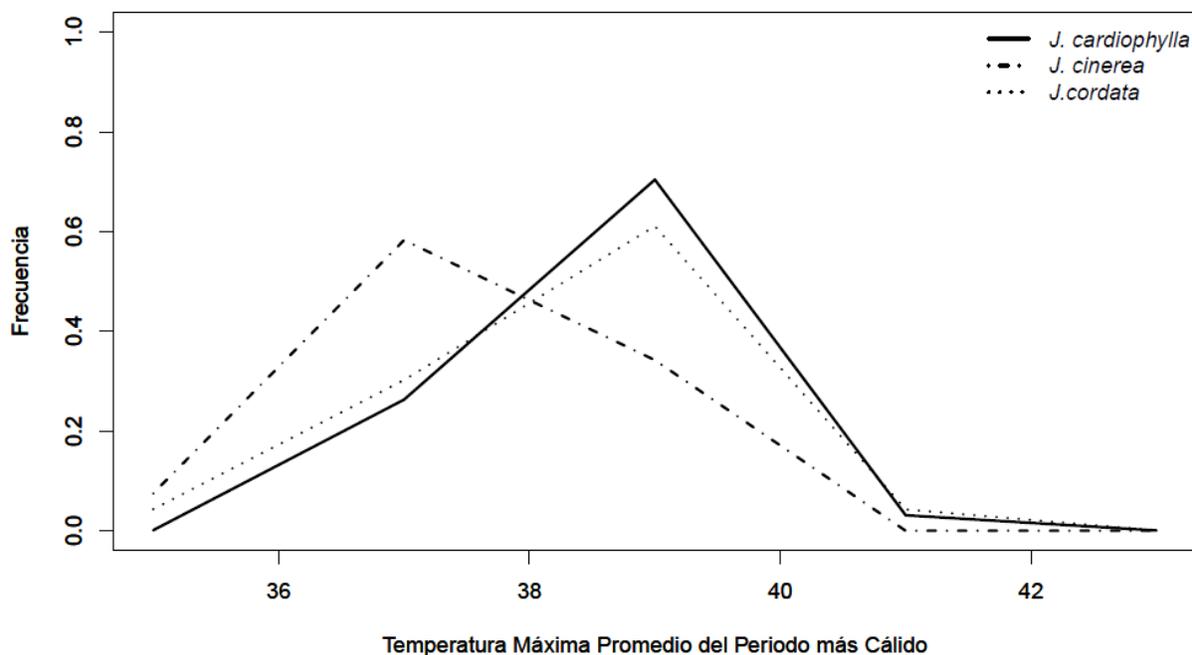


Figura 33. Temperatura máxima promedio del periodo más cálido para el género *Jatropha*.

VII.6. Uso de Suelo y Vegetación

Dentro de la superficie del Estado de Sonora, el matorral es el tipo de vegetación en el que se encuentran mayormente distribuidas las especies seleccionadas, ya que las doce especies están presentes en este tipo de cubierta vegetal, y es el tipo de vegetación con mayor porcentaje de presencia para once de las especies, exceptuando únicamente a *Cucurbita palmeri*, la cual está principalmente restringida a selvas bajas o hábitats ribereños. Las otras dos clases de vegetación donde se ubicaron mayormente las distribuciones potenciales generadas, son la selva y “otros tipos de vegetación” según la clasificación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Las especies se encontraron también en pastizales y en bosques, aunque en menor medida. Un total de nueve especies están presentes en el pastizal y los rangos de superficie están entre el 10 y el 17% de la superficie potencial total. En total, solo cuatro especies están presentes en Bosque, presentando rangos de superficie del 6% al 8.5%.

En la [Tabla IX](#) se presenta las proporciones de tipos de vegetación en los cuales se encuentran cada una de las especies, según los modelos de distribución potencial.

Tabla IX. Proporción de coberturas de los tipos de vegetación con respecto al total de distribución potencial para el Estado de Sonora.

Especies	Área Agrícola	Bosque	Matorral	Otros tipos de vegetación	Pastizal	Selva	Otros
<i>A. cochliacantha</i>	7.68%	7.32%	30.64%	14.98%	10.94%	27.49%	0.93%
<i>A. angustifolia</i>	9.64%	8.72%	30.80%	17.44%	10.27%	22.09%	0.87%
<i>C. digitata</i>	4.98%	6.40%	50.41%	19.05%	17.01%	1.63%	0.30%
<i>C. palmeri</i>	11.43%	0.24%	12.37%	6.10%	15.17%	53.62%	0.99%
<i>E. farinosa</i>	9.05%	1.01%	48.52%	23.51%	6.28%	10.52%	0.70%
<i>J. cardiophylla</i>	4.51%	1.65%	49.34%	18.68%	10.15%	14.87%	0.80%
<i>J. cinerea</i>	17.59%	0.00%	47.51%	27.45%	3.25%	2.89%	0.92%
<i>J. cordata</i>	7.15%	4.98%	32.74%	15.46%	10.73%	27.89%	1.02%
<i>O. tesota</i>	10.89%	0.03%	51.45%	25.73%	3.04%	7.84%	0.84%
<i>P. ciliare</i>	7.75%	5.54%	39.69%	20.43%	11.64%	13.73%	0.63%
<i>P. glandulosa</i>	7.48%	8.89%	37.91%	19.61%	12.21%	12.59%	0.63%
<i>P. velutina</i>	5.11%	8.00%	41.90%	15.86%	15.47%	13.08%	0.56%

VII.6.1. Vegetación de zonas áridas

Se realizó un análisis de la cobertura de vegetación, eliminando los bosques y las selvas, ponderando de esta manera las diferentes categorías de vegetaciones presentes para las zonas áridas y semiáridas del Estado de Sonora. Los análisis de cobertura posteriores se encuentran en proporción a superficie tipos de vegetación desérticos y no a la superficie de distribución potencial total.

Dentro de los matorrales, el más representativo es el Matorral Desértico Micrófilo, ya que es el tipo de vegetación más abundante en la distribución de *C. digitata*, *E. farinosa*, *J. cardiophylla*, *J. cinerea*, *O. tesota*, *P. ciliare*, *P. glandulosa* y *P. velutina*, seguidos en su mayoría por el Mezquital. En lo que refiere a *J. cordata* y *A. cochliacantha*, están mayormente distribuidas en Matorral Subtropical, Mezquital y Pastizal Natural. *Cucurbita digitata* en cambio, esta mayormente distribuida en Pastizales Cultivados, Matorral Sarcocauléscente y Pastizal Inducido ([Tabla X](#))

Tabla X. Porcentaje de los tipos de Vegetación Áridos en la Distribución Potencial dentro del Estado de Sonora.

Msub (Matorral Subtropical), Mez(Mezquitil), PN (Pastizal Natural), AR (Agricultura de Riego), MDM (Matorral Desértico Microfilo), MSa (Matorral Sarcocaula), MSc (Matorral Sarcocrasicaule), VegHal (Vegetación Halofita) Mcr (Matorral Crasicaule), VDA (Vegetación de Desiertos Arenosos), PC (Pastizal cultivado), PI (Pastizal inducido), ATyPC (Agricultura de Temporal, Pastizal cultivado).

Especies	Msub	Mez	PN	AR	MDM	MSa	MSc	Otros	Veg Hal	Mcr	VDA	PC	PI	AT y PC
<i>A. cochliacantha</i>	23.17	21.77	11.96	10.67	10.03	9.66	3.06	9.68						
<i>A. angustifolia</i>	17.80	21.81	10.96	12.63	13.34	8.96	2.53	8.77	3.19					
<i>C. digitata</i>	9.04	14.50	17.69		35.45	8.29		9.11			5.92			
<i>C. palmeri</i>		13.13		13.60		18.10		9.06		6.37		19.45	14.16	6.13
<i>E. farinosa</i>	10.37	16.75	4.65	9.48	29.36	10.84	3.22	8.26			7.06			
<i>J. cardiophylla</i>	16.98	22.36	9.31	5.19	29.30	10.20		6.66						
<i>J. cinerea</i>		15.20		16.62	27.59	14.81		7.10	5.25	6.25	7.19			
<i>J. cordata</i>	25.89	22.99	10.89	9.52	9.21	9.17	3.45	8.87						
<i>O. tesota</i>	7.55	18.51		10.98	31.26	12.57		9.25		3.57	6.30			
<i>P. ciliare</i>	9.39	14.40	12.23	8.59	26.93	9.19		11.02			8.26			
<i>P. glandulosa</i>	9.26	14.11	13.28	8.53	26.41	8.99		11.18			8.23			
<i>P. velutina</i>	12.64	17.63	18.17	5.71	29.35	9.02		7.49						

VII.7. Tipo de Suelo

El tipo de suelo más abundante para todas las especies estudiadas fue el Regosol, presentó una cobertura que va del 30 al 46.1% de las superficies de distribución potenciales. El segundo suelo más predominante fue el Litosol, por ser el tipo de suelo con mayor presencia para ocho de doce especies, y el tercero para *O. tesota* y *E. farinosa* dos de las especies estudiadas que mostraron distribuciones potenciales más amplias. Siguiendo en grado de importancia resultó el Yermosol, ampliamente distribuido para seis de las doce especies, y el segundo más extenso para *O. tesota*, *E. farinosa* y *J. cinerea*.

Las proporciones de superficie de cada tipo de suelo para una de las especies se presentan en la [Tabla XI](#).

Tabla XI. Relación del tipo de suelo para la distribución de cada una de las especies de estudio dentro del Estado de Sonora.

	Cambisol	Litosol	Regosol	Xerosol	Yermosol
<i>A. cochliacantha</i>	13.03%	20.98%	32.96%	10.22%	
<i>A. angustifolia</i>	10.74%	19.74%	31.34%		12.59%
<i>C. digitata</i>		21.08%	46.12%	4.64%	17.80%
<i>C. palmeri</i>	17.24%	11.84%	30.35%	13.28%	10.72%
<i>E. farinosa</i>		15.56%	40.81%	9.26%	17.78%
<i>J. cardiophylla</i>		20.17%	38.11%	8.75%	17.57%
<i>J. cinerea</i>		9.15%	39.59%	12.60%	21.95%
<i>J. cordata</i>	13.07%	19.97%	33.97%	11.07%	8.97%
<i>O. tesota</i>		13.42%	39.27%	10.96%	21.81%
<i>P. ciliare</i>		18.71%	41.78%	7.35%	13.77%
<i>P. glandulosa</i>		19.99%	40.50%	7.04%	13.32%
<i>P. velutina</i>	7.49%	22.56%	39.49%		15.21%

VII. DISCUSIÓN

Maxent permite un modelado eficiente con respecto al tipo de datos de entrada y los resultados obtenidos por dicho modelador son confiables. Por ejemplo Ortega y Peterson (2008) compararon 6 algoritmos de modelado de nicho ecológico, obteniendo los mejores resultados con GARP y Maxent.

De las especies estudiadas, *Cucurbita palmeri* presentó el modelo con mejor ajuste, lo que puede deberse a que es la especie con el menor número de registros, de la misma manera, los registros no se encuentran distantes geográficamente presentando condiciones ambientales más semejantes entre sí.

Los modelos con menor grado de ajuste, fueron los pertenecientes a *Pennisetum ciliare* y *Prosopis glandulosa*, posiblemente a que presentan una distribución más extensa, abarcando superficies con características ambientales muy heterogéneas, aumentando así las áreas con mayor disimilaridad ambiental y probabilidad de ocurrencia.

Las variables ambientales utilizadas en el presente trabajo son análogas a las variables bioclimáticas disponibles en worldclim (<http://www.worldclim.org>) con una resolución espaciotemporal más fina (Antaramián y Ortega, 2009; Bolívar-Cimé 2009; Martínez-Alvarez, 2012). Las variables ambientales utilizadas nos permitieron modelar las distribuciones de las especies de nuestro interés con muy buenos valores de ajuste, sin embargo, en los trabajos como los de Arriaga et al. (2003), Longoria-Quiroz (2008), Benito (2009) y Kumar y Stohlgren (2009), se realiza el modelado utilizando variables distintas tales como la orientación, la radiación solar e incluso, es utilizado el tipo de vegetación como una variable más a considerar.

En este trabajo se utilizó delimitar los modelos a la división política del Estado de Sonora para delimitar nuestra área de estudio. Existen estudios en los que este tipo de ajuste geográfico se conocen, (Arriaga et al., 2003; Bolívar-Cimé, 2009; Antaramián y Ortega, 2009), mientras que otros utilizan una delimitación ecológica (Benito, 2009).

Al eliminar los espacios geográficos o ecológicos ajenos al área de interés, se incrementa la eficiencia y se focaliza la distribución de la probabilidad a nuestra área de estudio, pudiendo así ajustar aún más los modelos obtenidos, tal y como fue el caso de *Pennisetum ciliare* y *Prosopis glandulosa*. Por ejemplo, Arriaga et al. (2003) modelaron

usando GARP, la distribución de *Cenchrus ciliaris* (sin: *Pennisetum ciliare*) para la superficie de la república mexicana, y delimitaron posteriormente a la superficie del Estado de Sonora. Comparando con los resultados de este estudio, su trabajo describe una menor superficie potencial de distribución potencial (i.e. posibilidad de invasión) para el Estado, esto es porque asumen que *P. ciliare* no se podría encontrar presente en áreas frías y secas, a la vez que marcaron un restricción de presencia por arriba de los 900 msnm.

Igualmente, utilizando los modelos de nicho, como en el caso del género *Jatropha* que presenta una amplia diversidad de especies en el país, se pueden conocer aspectos ecológicos y adaptativos que permiten ampliar su conocimiento y proponer estudios futuros a mayor detalle. En este trabajo se pudo diferenciar el nicho de tres especies de *Jatropha* en base a la estacionalidad de la precipitación. Los datos obtenidos en este estudio para las áreas de distribuciones potenciales, referentes a la temperatura y precipitación, concuerdan con los obtenidos por Fresno y Orozco (2012) en su revisión para el género en todo el país. En su revisión, dichos autores describen rangos de precipitación anual que van de 21 – 979 mm, para *J. cinerea* y de 39 – 979 mm para *J. cardiophylla* y *J. cordata* (Fresno y Orozco, 2012), mientras que los rangos obtenidos en el presente trabajo van de 104 a 844 mm para las tres especies dentro del Estado de Sonora, encontrándose dentro de los rangos generados para todo el país.

Fresno y Orozco (2012) mencionan que el mayor énfasis de estudio para el género *Jatropha* esta sesgado a favor de *J. curcas*, esto está marcado por el amplio interés en que se tiene por su producción agrícola con el fin de obtener biocombustibles. Martinez-Alvarez (2012) modeló la distribución para *J. cardiophylla*, *J. cinerea*, *J. cordata* y *J. curcas*, para todo el país, obteniendo, para *J. cardiophylla*, *J. cinerea* y *J. cordata* patrones de distribución e importancia de factores bioclimáticos semejantes a los del presente trabajo, que fueron modelados para el Estado de Sonora, sin embargo su estudio no estableció una diferenciación ecológica basada en modelos de distribución potencial.

A diferencia de este trabajo que enfatiza los aspectos ecológicos, en el trabajo de Martinez-Alvarez (2012) el énfasis fue en los aspectos taxonómicos y fenológicos. Martinez-Alvarez en el 2012, modeló la distribución potencial de 16 especies con interés bioenergético, de las cuales, 14 son referidas al Desierto Sonorense y dos externas a dicha región ecológica. Aunado al modelo de distribución, presenta una descripción detallada de la fenología y

caracteres taxonómicas de las especies entre las cuales se encuentran *Encelia farinosa*, *Cucurbita digitata*, *Jatropha cardiophylla*, *Jatropha cinerea*, *Jatropha cordata*, *Olneya tesota* y *Prosopis velutina*, especies que son consideradas en este trabajo desde la perspectiva de interpretación ecológica.

En especies como *E. farinosa* se encuentra concordancia en estos dos trabajos con los valores bioclimáticos óptimos para la distribución, mientras que para especies como *O. tesota* y *P. velutina* las variables más importantes en la contribución del modelo son diferentes en el presente trabajo y el realizado por Martínez-Alvarez (2012). Lo anterior puede deberse a que las bases de datos utilizadas en ambos trabajos presentan algunas diferencias en los registros (Martínez-Alvarez, 2012). A pesar de que Martínez-Alvarez muestra información fisiográfica relacionada con la distribución de sus especies de estudio, no se presenta información de los tipos de suelo y tipos de vegetación asociadas a dicha distribución, lo cual permite en este trabajo incrementar la interpretación ecológica.

Algunas especies características del Desierto Sonorense como *Olneya tesota*, *Prosopis glandulosa*, *Prosopis velutina* y *Encelia farinosa*, presentaron una amplia distribución potencial dentro del estado, principalmente dentro del matorral, estas especies tienen importancia en materia bioenergética, de esta manera se presentan áreas con potencial de conservación y aprovechamiento sustentable para dichas especies.

De igual forma, *Olneya tesota*, *Prosopis velutina*, *Prosopis glandulosa* y *Acacia cochliacantha* son especies de importancia ecológica dada la capacidad de las tres primeras de fijar nitrógeno en el suelo (Felker y Clark, 1981; Barth y Klemmedson, 1982). *Acacia cochliacantha* está estrechamente relacionada con el proceso de sucesión ecológica en áreas perturbadas (Miranda-Zarazúa et al., 2004), por ende, podemos inferir áreas con potencial de restauración y/o de interacción ecológica interespecifica, sin embargo como se mencionó antes, esta especie seguramente se restringe a estadios sucesionales en las porciones semiáridas del estado.

VIII. CONCLUSIONES

Modelar la distribución de especies de interés (usando Maxent), nos permitió generar una aproximación de los requerimientos ecológicos y la diferenciación de nicho con un grado de confiabilidad aceptable.

Las tres especies estudiadas del género *Jatropha*, están diferenciadas geográfica y ecológicamente por factores distintos para cada una de las especies, resaltando de manera importante la estacionalidad de la precipitación, la distribución de *Jatropha cardiophylla* está delimitada en términos ambientales por cuestiones de temperatura principalmente, la distribución de *Jatropha cinerea* depende principalmente de factores de precipitación, mientras que la distribución de *Jatropha cordata* está en función de ambas variables.

El área potencial de invasión de *Pennisetum ciliare* dentro del Estado de Sonora es extensa tomando en cuenta en las variables bioclimáticas utilizadas, sin embargo hay que tomar en cuenta fenómenos de heladas extremas presentes de forma esporádicas que podrían impedir su establecimiento de esta especie en varias regiones del estado. Las especies de amplia distribución muestran las limitaciones del modelo y ponen énfasis en las necesidades de incorporar otras variables, además de las bioclimáticas exclusivamente.

Se pudieron determinar áreas y condiciones óptimas para el cultivo de especies de interés dentro del Desierto Sonorense, ya sea para uso bioenergético o restauración ecológica.

IX. LITERATURA CITADA

- Antaramián H, E. y J. M. Ortega R. 2009. Dos metodologías alternativas para la búsqueda de áreas aptas para el cultivo de Macadamia y Litchi en Michoacán. *Ciencia Nicolaita* 51: 29-42. *Conservation Biology* 18:1504-1514
- Arriaga, L., A. E. Castellanos, E. Moreno y J. Alarcón. 2003. Potential ecological distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of buffel grass in arid región of Mexico. *Conservation Biology*. 18:1504-1514.
- Barth, R. y J. Klemmedson. 1982. Amount and distribution of dry matter, nitrogen, and organic carbon in soil-plant systems of mesquite and palo verde. *Journal of Range Management* 35:412-418.
- Benito-De Pando, B. 2009. Ecoinformática aplicada a la conservación: simulación de efectos del cambio global en la distribución de la flora de Andalucía. Tesis de Doctorado. Universidad de Granada. Departamento de Botánica. Granada, España.
- Bravo-Peña, L. C., S. Doode-Matsumoto, A. E. Castellanos-Villegas, e I. Espejel-Carbajal. 2010. Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal. Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas. *Región y Sociedad* 22(48):3-35.
- Brito-Castillo, L., M. A. Crimmins y S. C. Díaz-C. 2010. Clima. 73-96 p. En: Molina-Freaner, F.E. y Van-Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*. UNAM, México.
- Bolívar-Cimé, B. S. 2009. Análisis del hábitat óptimo y modelado de nicho ecológico para la conservación del venado cola blanca en el centro de Veracruz. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- Castellanos, A. E. 1992. Ecología, Utilización y conservación de las comunidades vegetales en el Estado de Sonora. 25-37 p. En: Moreno, J.L. (Eds.), *Los Recursos Naturales del Estado de Sonora*. SIUE – El Colegio de Sonora, Hermosillo.
- Castellanos, A. E., L. C. Bravo, G. W. Koch, J. Llano, D. López, R. Méndez, J. C. Rodríguez, R. Romo, T. D. Sisk, G. Yanes-Arvayo. 2010. Impactos ecológicos por el uso del terreno en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. 157-186 p. En: Molina-Freaner, F.E. y Van-Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*. UNAM, México.

- Dimmitt, M. A. 2000. Biomes and communities of the Sonoran Desert region. 3.18 p. En: Phillips, S.J. y Comus, P.W. (Eds.), A natural history of the Sonoran Desert. Arizona-Sonora Desert museum.
- Felker, P. y P. Clark. 1981. Nodulation and nitrogen fixation (acetylene reduction) in desert ironwood (*Olneya tesota*). *Oecologia* 48:292-293.
- Fresnedo-Ramírez, J. y Q. Orozco-Ramírez. 2012. Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*.
- González-Uribe, D. 2010. Contribución al modelo de nicho ecológico de perrito llanero mexicano y su relación con la disminución de su rango geográfico así como la evaluación de su registro de extinción. Seminario de Postgrado Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales.
- Grinnell, J. 1917. The niche relationships of the California thrasher. *AUK*: 427- 433.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of Climatology* 25:1965-1978.
- Kumar S. y T. Stohlgren. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural* 1(4):94-98.
- Longoria-Quiroz, C. A. 2008. Distribución hipotética de especies de aves y mamíferos con categoría de riesgo en la NOM-059-Semarnat-2001 registradas en el estado de Durango. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional. Durango, Durango, México.
- Martínez, N. 2010. Apuntes sobre modelación de nicho ecológico, Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental. Instituto de Ecología. UNAM.
- Martinez-Alvarez, A. M. 2012. Uso de modelos de nicho para determinar la distribución posible de especies para bioenergía en zonas áridas de México. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- Martínez-Yrizar, A., R. S. Felger y A. Búrquez. 2010. Los ecosistemas terrestres: un diversi capital natural. 129-156 p. En: Molina-Freaner, F. E. y Van Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*, UNAM, México.

- Miranda, F. y E. Hernández-X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 28:29-179.
- Miranda-Zarazúa, H., M. H. Martín-Rivera, F. A. Ibarra-Flores. 2004. Las praderas de zacate buffel del sur del estado. Folleto Técnico número 9. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación del Noroeste campo Experimental Carbó.
- Ortega, M. A. y A. T. Peterson. 2008. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79:205-216.
- Phillips, S. J., M. Dudík, R. E. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning* 655-662.
- Phillips, S. J.; R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa. Distrito federal México. 432 pp.
- Shreve, F. 1942. The desert vegetation of the north America. *Botanical Reviews* 8:195-246.
- Shreve, F. y I. L. Wiggins. 1964. *Vegetation and flora of the Sonoran Desert*. Stanford University Press. California, Estados Unidos de América.
- Soberón, J. y M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings National Academy of Sciences* 106:19644-19650.
- Soberón, J. y T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and specie's distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- Téllez, O., A.M. Hutchinson, H.A. Nix y P. Jones. 2011. Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México. 15-23 p. En: Sánchez-Rojas, G., C. Ballesteros-Barrera y N.P. Pavón (Eds.), *Cambio Climático, Aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Turner, R. M., J. E. Bowers, T. L. Burgess, J. R. Hastings. 1995. *Sonoran Desert plants: an ecological atlas*. The University of Arizona Press, Tucson, Estados Unidos de América.

Villaseñor, J. L. y Téllez-Valdés, O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jafea* (Asteraceae) en México. Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica 75 (2):205-220.