



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA  
SISTEMÁTICA

**Efectos del cambio climático en seis géneros  
de leguminosae de ambientes contrastantes  
en México y sus implicaciones en la  
conservación a largo plazo**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**BRISSA ILIANA ALBARRÁN CASTRO**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: Dr. Oswaldo Telléz Valdés**  
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM  
**COMITÉ TUTOR: Dra. María del Socorro Lozano García**  
Facultad de Ciencias, UNAM  
**Dr. Rafael Lira Saade**  
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

**LOS REYES IZTACALA, ESTADO DE MÉXICO, ENERO, 2021.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**  
**OFICIO CPCB/664/2020**  
**ASUNTO: Oficio de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence**  
**Directora General de Administración Escolar, UNAM**  
**Presente**

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas Biología Evolutiva y Sistemática, del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 10 de agosto de 2020 se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Sistemática** de la estudiante **ALBARRÁN CASTRO BRISSA ILIANA**, con número de cuenta **97393072** con la tesis titulada **“Efectos de cambio climático en seis géneros de Leguminosae de ambientes contrastantes en México y sus implicaciones en la conservación a largo plazo”**, realizada bajo la dirección del **DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DRA. PATRICIA DOLORES DÁVILA ARANDA  
Vocal: DRA. MERCEDES ISOLDA LUNA VEGA  
Secretario: DR. RAFAEL LIRA SAADE  
Suplente: DRA. CLAUDIA BALLESTEROS BARRERA  
Suplente: DR. VICTOR MANUEL GUILLERMO SÁNCHEZ CORDERO DÁVILA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 14 de octubre de 2020

**COORDINADOR DEL PROGRAMA**



**DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA**



## **Agradecimientos institucionales**

Primeramente agradezco al **Posgrado en Ciencias Biológicas**, de la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por otorgarme la oportunidad de superación dentro del ámbito académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**), por el apoyo brindado durante la estancia en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la beca No. 480264/280507.

A mi tutor principal el Dr. Oswaldo Téllez Valdés y a los miembros de mi comité tutorial, la Dra. María del Socorro Lozano García y al Dr. Rafael Lira por ser parte de mi comité tutorial, sus valiosos comentarios y guía. Así como por revisar crítica y constructivamente el escrito de tesis.

## **Agradecimientos a título personal**

A mi madre Lucila Castro Gatica, mis frutos producto de sus grandes esfuerzos. Te agradezco el brindarme guía, apoyo, confianza, y un sin fin de cualidades, principalmente amor y apoyo incondicional.

A Ernesto por el incommensurable apoyo, paciencia, amor, y solvencia en la realización de éste y todos mis proyectos, nuestros logros.

A mi hija Brissa Alexandra por ser la motivación y el motor que me inspira a seguir creciendo.

# Índice

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>6</b>
Efectos del cambio climático en la biodiversidad .....	6
Modelos Generales de Circulación (GCMs) .....	8
ECHAM (European Centre Hamburg Model).....	9
Escenarios de Cambio Climático.....	10
Modelado de nicho ecológico.....	12
Áreas Naturales Protegidas de México y la conservación de especies.....	15
<b>Grupo de Estudio.....</b>	<b>16</b>
Géneros.....	17
<b>Área de Estudio.....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivo .....</b>	<b>20</b>
Objetivos Particulares:.....	20
<b>Métodos .....</b>	<b>21</b>
Registros de las especies.....	21
Modelado de la Distribución Potencial .....	21
Modelos Generales de Circulación y Escenarios de Cambio Climático .....	23
Presencia de las especies en las Áreas Protegidas de México.....	24
<b>Resultados .....</b>	<b>25</b>
Distribución actual.....	25
Modelado de distribución potencial .....	26
Modelos de Cambio Climático de las 10 especies .....	28
<b>Discusión y conclusiones .....</b>	<b>34</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>41</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Emisiones mundiales de dióxido de carbono para las familias A1, A2, B1y B2, expresado en gigatoneladas de carbono por año..	5
Figura 2. Diagrama de BAM .	14
Figura 3. Distribución conocida de las 10 especies en México. Los colores diferencian a las especies por ambientes. Verde-árido, azul-templado y rojo-tropical lluvioso o seco.....	25
Figura 4a-j Imágenes de los modelos de distribución actual y potencial de las 10 especies de Leguminosae producidos con MaxEnt. A) <i>Andira galeottiana</i> , B) <i>Andira inermis</i> , C) <i>Eriosema diffusum</i> , D) <i>Eriosema grandiflorum</i> , F) <i>Errazurizia benthamii</i> , G) <i>Errazurizia megacarpa</i> , H) <i>Ormosia isthmensis</i> , I) <i>Ormosia panamensis</i> , J) <i>Psorothamnus emoryi</i> .....	27
Figura 5. Distribución actual y futura para los años 2050 y 2080 de las diez especies de Leguminosae con relación al Modelo de Circulación General MPI_ECHAM5.....	31

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Lista de Especies de Fabaceae consideradas para el estudio.....	21
Cuadro 2. Parámetros Bioclimáticos Empleados para modelar la Distribución Potencial de las Especies. La temperatura tiene como unidades ° Celsius y la precipitación en mm. ....	22
Cuadro 3. Distribución potencial de las especies de Leguminosae por región en km <sup>2</sup> .....	26
Cuadro 4. Cuantificación del Área de Distribución de las Especies Vegetales para los Años 2050 y 2080 en el Escenario A1B en los GCM MPI_ECHAM5 (E) expresado en km <sup>2</sup> y sus porcentajes de cambio. ....	29
Cuadro 5. Presencia de Especies en las Áreas Naturales Protegidas de México (ANP's), ..	32
Cuadro 6. Cuantificación y Porcentaje de Cambio en el Área de Distribución de las	

Especies para los años 2050 y 2080, en el Escenario A1B con relación a su presencia dentro de las ANPs en el Modelo GCM MPI\_ECHAM5..... 33

## Resumen

Utilizando modelos bioclimáticos y con base en el Modelo de Circulación General MPI-ECHAM5 dentro del escenario de cambio climático A1b, se analizaron los efectos del cambio climático en seis géneros de Leguminosae de ambientes contrastantes en México, basado en la distribución futura de los años 2050 y 2080. También se evaluó el posible papel que el sistema mexicano de áreas naturales protegidas podría tener en la conservación de estos géneros. Los resultados mostraron una marcada contracción de los patrones de distribución de los seis géneros en ambos periodos. Los seis géneros se encuentran representados en pocas áreas naturales protegidas. En consecuencia, parece que la mayoría de las especies no tendrán muchas oportunidades para sobrevivir bajo el escenario de cambio climático. Se sugiere tomar medidas de forma inmediata para detener los cambios drásticos en el uso de suelo y promover las acciones de reforestación y restauración de los ecosistemas, realizar una reconfiguración del sistema de ANPs, considerar propuestas como la del uso de Redes de Áreas para la Conservación (CAN) y finalmente, recurrir, de manera sistemática, a la conservación *ex situ*.

## **Abstract**

Using bioclimatic models and based on the General Circulation Model MPI-ECHAM5 within the climate change scenario A1b, the effects of their distribution patterns in Mexico under climate change scenario were analyzed in six genera of Leguminosae, for years 2050 and 2080. The possible role that the Mexican system of protected areas could have in their conservation was also evaluated. The results showed a marked contraction of the distribution patterns of the six genera in both periods. The species occur in very few Natural Protected Areas with exception of one of them. Consequently, the results obtained show that most species will not have many opportunities to survive under climate change scenario. Consequently, I suggest under taking immediate actions, to stop the drastic changes in land use, and to start a comprehensive program for the reforestation and restoration of ecosystems, as well as a reconfiguration of the Natural Protected Areas System, based on proposals such as the use of Conservation Area Networks (CAN). Finally, I also suggest to undertake an ambitious program of ex situ conservation work. It is important to consider the possibilities that these alternatives will provide for the future, starting from now.

## Introducción

En la actualidad no existe duda de que el cambio climático está afectando el funcionamiento y la distribución geográfica de los ecosistemas a escala regional y mundial (Melillo *et al.*, 1993), así como la distribución de las especies. Por tanto, el entendimiento de estos posibles cambios y la manera de mitigarlos son retos importantes para la ciencia (Lira *et al.*, 2009). En este sentido, las especies animales y vegetales de México, hasta ahora amenazadas por la presión de las actividades humanas, también lo estarán por los efectos del cambio climático (Dávila *et al.*, 2012; Lira *et al.*, 2009; Téllez-Valdés *et al.*, 2006).

De continuar dichas variaciones en el clima, se pueden agudizar los efectos en la distribución, diversidad de especies, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Por lo que la medición del grado de modificación de los ecosistemas debido a los cambios climáticos actuales y futuros es imperativa, ya que aún no se conoce la capacidad de respuesta de diversas comunidades vegetales ante los cambios climáticos locales y globales (Malcom, 1998).

Por lo tanto, cabe señalar que es muy importante realizar estudios del cambio climático en México, ya que es considerado un país megadiverso, y por su riqueza de especies, es probablemente el tercero en el mundo, teniendo el 12.8% de la biodiversidad global (Caldecott *et al.*, 1996; Mittermeier & Mittermeier, 1992). El país cuenta con aproximadamente 25,000 especies de plantas vasculares (Rzedowski, 1993; Villaseñor, 2003), siendo las Compositae, Leguminosae y Orchidaceae, las que cuentan con el mayor porcentaje de especies del país, incluyendo también una alta tasa de endemismo superior al 50% (Villaseñor, 2003; Sousa & Delgado, 1993). Sin embargo, esta importante riqueza

florística seguramente se verá afectada negativamente a consecuencia del cambio climático futuro, especialmente para aquellas especies con un patrón de distribución restringido (Midgley *et al.*, 2002).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ha evaluado y proyectado diversos escenarios de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero para estimar los cambios en el clima del planeta. A esta serie de escenarios de emisiones se les conoce como Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2000), en donde se elaboraron cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2), para las que se describen las fuerzas determinantes en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, así como su evolución durante el siglo XXI tanto en términos globales como de distintas regiones. Cada línea evolutiva representa un nivel de desarrollo divergente en cuestiones demográficas, sociales, económicas y tecnológicas (IPCC, 2001). Los escenarios de emisiones se clasifican por familias: A1B, en las cuales las emisiones son altas; A2 las emisiones se consideran de medias a altas; B2 emisiones medias-bajas y B1 con emisiones bajas (Magaña *et al.*, 2009).

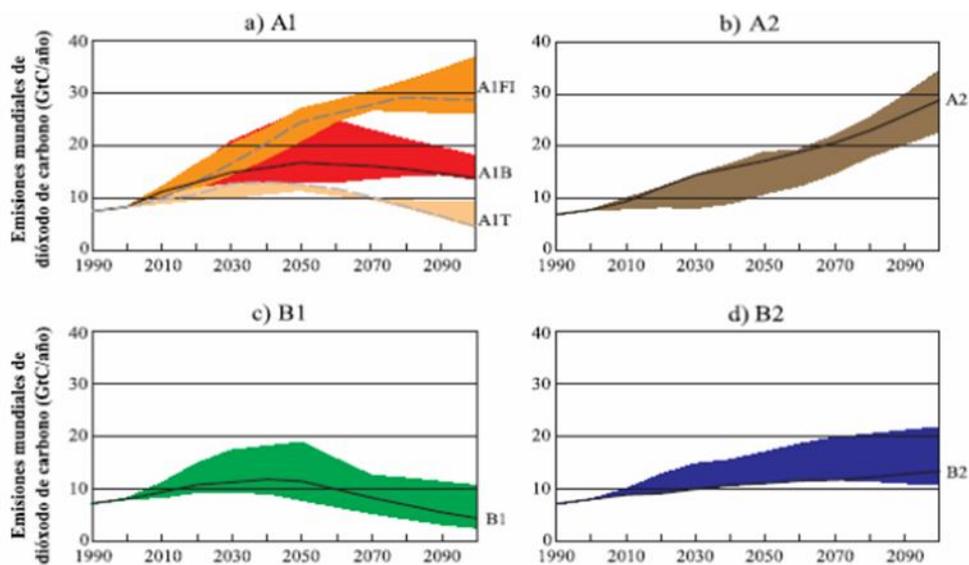


Figura 1. Emisiones mundiales de dióxido de carbono para las familias A1, A2, B1 y B2, expresado en gigatoneladas de carbono por año. (IPCC, 2001).

Aunque, las dimensiones físicas han sido analizadas en detalle, los efectos del cambio climático global sobre la biodiversidad son aún poco entendidos. Se han examinado respuestas potenciales en especies y hábitats para predecir cambios, pero éstas han sido dirigidas a pocas especies y hábitats específicos (Güizado-Rodríguez et al., 2012; Meynecke, 2004; Vázquez et al., 2014), por lo que la validez de este enfoque ha sido cuestionada, aunque sus resultados se consideran una aproximación útil y preliminar del impacto potencial del cambio climático sobre la distribución de las especies (Levinsky et al., 2007; Pearson, 2006).

Es así, que en este estudio se pone a prueba la hipótesis de que los efectos del cambio climático sobre especies de seis géneros de la familia Leguminosae (nombre actualmente aceptado Fabaceae) que habitan en ambientes contrastantes, tendrán una respuesta diferencial y no únicamente la contracción en sus patrones de distribución.

## **Antecedentes**

### **Efectos del cambio climático en la biodiversidad**

En la Quinta Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 2012 refiere que en el periodo 1901-2009, la temperatura superficial media de México tuvo un incremento promedio de menos de 2°C. Sin embargo, algunas regiones del noroeste han experimentado incrementos mayores que la media nacional, y otras zonas del noreste, muestran una tendencia de enfriamiento (INESEMARNAT, 2012).

Por otra parte, en México la lluvia incrementa en las regiones áridas y semiáridas en un 1.8% en promedio, de la precipitación total anual (PTA) y sólo 0.9% en las regiones húmedas; mientras que la disminución promedia 1.2% de la PTA, tanto en regiones secas como húmedas, dándose a escalas regionales y consistentemente. El mayor número de estaciones climatológicas con tendencias anuales estadísticamente significativas de incremento de lluvia ( $p \leq 0.1$ ) se ubican en las regiones áridas y semiáridas del país. El verano registra incrementos y decrementos de aproximadamente 30 mm por década, mientras que el invierno registra solamente 8 mm por década (Méndez & Magaña, 2010), por tanto, la precipitación muestra una tendencia promedio que se incrementa ligeramente cada año. Algunas regiones del país han experimentado aumentos mayores que la media nacional anual (región Centro-Sur), mientras otras presentan ligeros decrementos (partes de Hidalgo y Veracruz). La amplitud de la variabilidad natural es mucho mayor que esta tendencia y, por tanto, las sequías siguen siendo tan intensas como en el pasado, así como los episodios de lluvias por encima de la media (Méndez & Magaña, 2010).

Los escenarios de cambio climático por efecto del forzamiento radiativo, como los presentados por el IPCC AR 4 en el 2007 o el ensamble preparado con seis propuestas del modelo de clima regional del Simulador de la Tierra (Pérez-Pérez *et al.*, 2010), sugieren que el incremento en la temperatura continuará, llegando a un aumento de 2 a 4°C hacia finales del siglo XXI, principalmente hacia el norte del país. Estos resultados son consistentes con los presentados en la Tercera (INE -SEMARNAT, 2007) y Cuarta (INE -SEMARNAT, 2009) Comunicaciones Nacionales, así como con otros estudios más recientes (INE, 2012b; Magaña *et al.*, 2012).

Con base en estos futuros valores de temperatura y precipitación, se estima que los tipos de vegetación más afectados en México serán los bosques templados, los bosques tropicales y los bosques mesófilos de montaña (Villers&Trejo, 1998).

El aumento en la frecuencia de los eventos extremos será una consecuencia del cambio climático, lo cual promoverá un aumento en la distribución de especies de rápido crecimiento en las áreas naturales afectadas, reduciendo así la biodiversidad (Locatelli, 2006). Otro efecto directo del cambio climático, es la migración de especies mediante un corrimiento altitudinal o latitudinal (Pearson, 2006). A pesar de que uno de los mecanismos de adaptación de las plantas a cambios en el clima es la migración, aún se ignora si esta sucederá a la misma velocidad que lo hará el clima, ya que los cambios futuros del clima serán diferentes en magnitud a los precedentes en los últimos 10,000 años (IPCC, 2001). Esto dependerá de distintos factores, como la intensidad del cambio climático, la desaparición y aparición de ambientes, los mecanismos de dispersión que tenga cada una de las especies, y la fragmentación de hábitats debido a los cambios en el uso del suelo (Maslin, 2004).

Para analizar los cambios en la distribución de la vegetación por la influencia del cambio climático, es necesario partir del conocimiento de su distribución actual, y de las especies que habitan en ella. Asimismo, se requiere contar con datos de otros parámetros físicos adicionales al clima que pueden afectar la distribución de una especie, como el suelo, el relieve, por ejemplo (Arriaga et al, 2000; Martínez&Fernández, 2004).

Desde mediados del siglo XX, los modelos numéricos para simular procesos de circulación atmosférica han mejorado notablemente. La simulación y el pronóstico del clima han sido objetivos primordiales de los científicos atmosféricos. A manera de laboratorio, los modelos de circulación general de la atmósfera se han usado para estudiar la variabilidad y el cambio climático (Martínez &Fernández., 2004).

Consecuentemente, para la predicción potencial de los impactos del cambio climático en la distribución y en los patrones de riqueza de los diferentes grupos de plantas y animales, existen diferentes modelos de estudio (comúnmente basados en lo que se llama coberturas bioclimáticas), algunos de los cuales han sido modificados (e.g. Berry *et al.*, 2002; Midgley *et al.*, 2002; Téllez&Dávila, 2003; Thomas *et al.*, 2004; Téllez *et al.*, 2006, 2007; Levinsky *et al.*, 2007; Midgley&Thuiller 2007; Lira *et al.*, 2009).

### **Modelos Generales de Circulación (GCMs)**

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima y el cambio climático es, sin lugar a duda, el conjunto de Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) de atmósfera y Océano Acoplados (AOGCM's), que suman un par de decenas (23 reportados en el AR4, Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)(IPCC, 2007). Estos modelos, están basados

en las leyes fundamentales de la física y simulan una gran variedad de los procesos que ocurren, en un intervalo muy amplio de escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos. Dichos modelos poseen resoluciones espaciales variadas que se han venido refinando en el transcurso del tiempo y que permiten su aplicación en escalas regionales (Conde & Gay, 2008).

El AR4 representa el documento que concentra las evidencias más claras hasta ahora de que las actividades humanas están cambiando al planeta, produciendo el calentamiento global. Hay ahora mayor confianza (90%) de que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de efecto invernadero (GEI) asociadas a las acciones humanas (IPCC, 2007).

### **ECHAM (European Centre Hamburg Model)**

Es un modelo de circulación general (GCM) desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología, que representa una entidad de investigación de la Sociedad Max Planck. Este modelo fue creado modificando aquellos de pronóstico global que fueron desarrollados por ECMWF para ser utilizados en la investigación climática. La configuración predeterminada del modelo resuelve la atmósfera hasta 10 hPa (unidad en hectopascales utilizada principalmente para estudiar la atmósfera inferior), pero puede reconfigurarse a 0,01 hPa para que pueda ser usado en estudios de la estratosfera y la mesosfera inferior, esto implica en términos específicos ajustar las unidades dependiendo de la zona atmosférica a estudiar y la homogenización de resultados (MPIM, 2008).

De acuerdo con el estudio comparativo de Connolley&Bracegirdle 2008, el modelo ECHAMP5 es actualmente, uno de los modelos más eficientes para simular las modificaciones en los diferentes escenarios de cambio climático.

## **Escenarios de Cambio Climático**

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

Los escenarios se clasifican en diferentes versiones:

**A1. Escenario de Rápido Crecimiento Global.** La familia de escenarios y línea evolutiva A1, describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto de crecimiento poblacional a mitad del siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficaces (<https://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie3/figtableboxes/4.htm>; IPCC, 2001).

Se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil (A1FI), de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes (A1B) (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen

ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

**A2. Escenario de Crecimiento Regional.** Describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión más relevantees la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual provoca un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación regional. Además, el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico son más lentos que en otras líneas evolutivas.

**B1. Escenario de Crecimiento Económico Global.**Describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel poblacional más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como en la línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica, social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad, pero sin iniciativas sobre cambio climático adicionales, como aire y agua más limpios, océanos saludables, ciudades resilientes y sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles (IPCC, 2001).

**B2. Escenario de Crecimiento Poblacional.** Describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque

el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y la equidad social, se centra en los niveles local y regional (IPCC, 2001).

### **Modelado de nicho ecológico**

La primera propuesta realizada del concepto de nicho lo define como los requerimientos ambientales para la supervivencia de las especies o también conocido como Nicho Grinnelliano; posteriormente Elton (1927), lo consideró como la función que desempeñan las especies en una comunidad (Nicho Eltoniano). El Nicho Grinnelliano es un subconjunto de condiciones scenopoéticas (abióticas) que corresponden a las áreas geográficas definidas por las propiedades actuales o potenciales de las especies, por lo que el nicho es una característica del medio y no de sus ocupantes. Por su parte, el Nicho Eltoniano es el lugar que ocupa un individuo en el medio biótico y se centra en las interacciones bióticas y en las dinámicas de recurso-consumidor (variables bionómicas) (Soberón, 2007; Peterson *et al.*, 2011).

Hutchinson (1957) retoma ambos conceptos y considera al nicho como la suma de todos los factores ambientales que actúan en un organismo y define dos subtipos de nichos multidimensionales: el fundamental, considerado como un volumen de  $n$  dimensiones en un espacio ambiental donde las poblaciones de una especie pueden existir; y el realizado, un subconjunto del nicho fundamental en donde existen interacciones bióticas, tales como la competencia, en donde una especie fuerte y competidora garantiza su supervivencia (Guisan & Zimmerman, 2000; Peterson *et al.*, 2011).

Por tanto, la distribución geográfica y sus patrones se determinan por los siguientes factores:

1. Las condiciones ambientales favorables para la estabilidad, supervivencia y reproducción de las poblaciones de cada especie.
2. El medio biótico que está constituido por depredadores, competidores, entre otros que influyen en la disponibilidad de los recursos y la dinámica de poblaciones.
3. Las capacidades de la especie, tales como la dispersión que le permite la accesibilidad a otros sitios (Soberón, 2010; Peterson *et al.*, 2011; Barveet *al.*, 2011).

Estos factores se ilustran en el llamado diagrama BAM (*BioticAbioticMovement*) (figura 2),(Soberón&Peterson, 2005), el cual es una representación abstracta del espacio geográfico **G**:

1. La región del mundo donde se encuentran las condiciones ambientales que permiten la sobrevivencia y reproducción de la especie (este conjunto de condiciones se llama el Nicho Fundamental de la especie), la cual se denota con la letra **A** y se mide usando variables scenopoéticas.

2. La región del mundo que contiene el ambiente biótico adecuado para la especie. Esto es, los sitios donde no hay competidores capaces de excluir a la especie, ni depredadores o enfermedades capaces de extirpar todas las poblaciones, y existen los mutualistas necesarios. Se mediría, si existieran datos, usando las densidades de población de las principales especies interactuantes. Se denota con la letra **B**.

3. El conjunto de sitios que la especie ha tenido tiempo de visitar, o “explorar” desde una fecha dada, lo cual se denota con la letra **M**.

Estos conceptos permiten definir dos importantes regiones: el área ocupada **G<sub>o</sub>** y el área invadible, **G<sub>i</sub>**. En otras palabras, el área ocupada **G<sub>o</sub>** es la parte geográfica que cuenta con condiciones ambientales y bióticas favorables y que ha estado accesible a la especie. Por su parte, el área invadible **G<sub>i</sub>** es una zona con condiciones ambientales y bióticas favorables, pero no accesible, por el momento, a la especie (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008; Soberón & Nakamura, 2009).

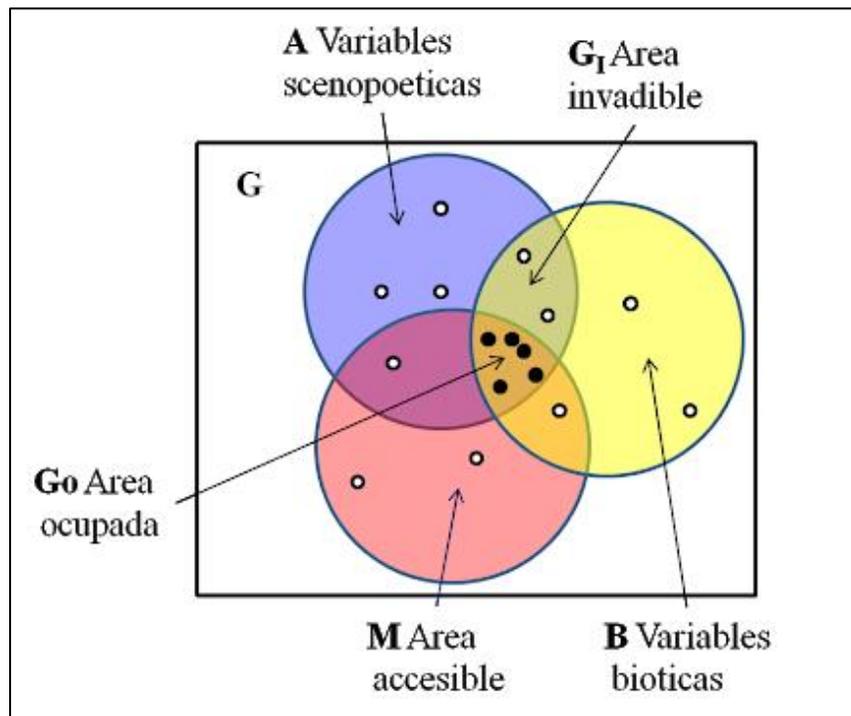


Figura 2. Diagrama de BAM (Soberón & Peterson, 2005).

## **Áreas Naturales Protegidas de México y la conservación de especies**

En México, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) administra 173 áreas de carácter federal que representan en su conjunto más de 250,000 km<sup>2</sup> (aproximadamente el 10% del territorio nacional y un 1.5% de la zona marítima del país). Algunas de estas áreas (61), que por su biodiversidad y características ecológicas son consideradas de especial relevancia para el país, integran el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP) (Bezaury-Creel & Gutiérrez-Carbonell, 2009; Maass, 1999).

Aunque paradójicamente la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), no considera a las áreas naturales protegidas (ANP's) un instrumento de política ambiental, actualmente constituyen la mejor herramienta con la que cuenta México para conservar su biodiversidad y sus servicios ambientales que requiere y usa la sociedad. La mayor parte de las ANP's mexicanas son zonas de usos múltiples, en las cuales la magnitud y la forma en que se desarrollan las actividades económicas son limitadas, ya que el uso sustentable de los recursos naturales no se hace con una visión de largo plazo (Bezaury-Creel & Gutiérrez-Carbonell, 2009).

Por tanto, considerando que el mantenimiento del sistema de soporte de vida del planeta depende de las funciones de regulación ambiental y provisión de recursos naturales que proporcionan los ecosistemas naturales, resulta imprescindible trabajar para lograr: 1) frenar la transformación de estos ecosistemas, 2) restaurar aquellos que han perdido su integridad ecológica y 3) diseñar sistemas productivos y de utilización sustentable basados en un entendimiento de su dinámica funcional (Maass, 1999). Así, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son piezas clave en los esfuerzos conducentes a lograr estas tres grandes metas. En primer lugar, porque las ANP se establecen con miras

a preservar grandes extensiones representativas de los ecosistemas naturales más importantes y mejor conservados de un país. En segundo lugar, porque las ANP son una fuente importante de germoplasma para los programas de restauración ecológica. Por último, más relevante, las ANP son un componente clave para el diseño de sistemas productivos sustentables, ya que son una referencia obligada de sostenibilidad ecológica. En este sentido, las ANP son lugares idóneos para realizar investigación científica a largo plazo (Mass, *et al.*, 2010).

## **Grupo de Estudio**

Taxonómicamente, la familia Leguminosae (actualmente Fabaceae) ha sido dividida en tres grandes subfamilias (*Caesalpinioideae*, *Mimosoideae* y *Papilionoideae*) y es considerado un grupo natural desde el punto de vista filogenético (McVaugh, 1987; Polhill & Raven, 1981). Las especies de la familia son comunes en las regiones tropicales de Asia, África, Centro y Sur de América y Australia. Numerosas especies se encuentran generalmente en zonas de baja altitud, en sitios ocupados por selvas secas, matorrales y chaparrales, así como en lugares de selva húmeda y zonas de transición a bosques templados (Polhill & Raven, 1981).

En nuestro país, es la segunda familia más rica después de la familia Asteraceae (o Compositae) con más de 2,300 especies (Suárez-Mota & Villaseñor, 2011). El 43.2% de ellas, son de distribución restringida al país (Sousa & Delgado, 1998), proporción que aumenta casi a un 75% si se considera a México parte de una provincia florística natural denominada Mega-México 3 (Rzedowski, 1998; Sousa & Delgado, 1998).

Es una familia grande y diversa, compuesta por organismos con diferentes formas

de vida, desde herbáceas anuales, trepadoras a arbustos perennes leñosos, y árboles, que, debido a su capacidad para fijar nitrógeno, son componentes esenciales en los ecosistemas naturales y artificiales. Numerosas especies de esta familia, han sido domesticadas para la producción de alimentos, forrajes, fibra, compuestos industriales y medicinales, horticultura (Somers *et al.*, 2003). Estas son fácilmente reconocibles por la estructura característica de sus flores en la cual el estandarte que es el pétalo mayor es muy característico por su forma acorazonada, con dos pétalos denominados alas y dos más unidos en su parte basal denominados quilla y que protegen dentro de sí a los estambres y gineceo y sus típicas legumbres que tienen dehiscencia por ambas suturas, aunque hay una importante variación, encontrando también frutos samaroides, tipo aquenio, etc.; así como la capacidad que tiene el 88% de sus especies (las examinadas hasta la fecha) para formar nódulos de *Rhizobium* en simbiosis (de Faria *et al.*, 1989), lo cual les proporciona un rasgo distintivo para fijar nitrógeno en el suelo (Graham & Vance, 2003).

El reconocimiento, jerarquización y localización de elementos únicos (endémicos), es un parámetro indicador del grado de singularidad de una flora o fauna (Rzedowski, 1991). Así, México es reconocido como un centro secundario de diversificación de la familia Leguminosae, después de Brasil, por el número de especies endémicas con las que cuenta (Sousa & Delgado, 1998). De un total de 623 especies de árboles y arbustos de la familia Leguminosae, 283 (46.2 %) son endémicas a México (Sousa *et al.*, 2001, 2003).

## **Géneros**

Se seleccionaron 10 especies características de los tres ambientes principales encontrados

en México para realizar este estudio, estas pertenecen a seis géneros de la familia Leguminosae, que son característicos de los tres ambientes principales que se presentan en el país y que son contrastantes entre sí, lo cual permitirá estimar el impacto del CC tanto en las especies como entre estos ambientes que son el húmedo, el árido y el templado. Algunas de ellas tienen endémicas con distribución de muy restringidas a muy amplia a México, tienen distinta forma de vida y distintos síndromes de distribución. Los géneros son:

***Andira* Lam.** Cuenta con 29 especies; 5 en Sudamérica y 3 en América central, Caribe y México. Se seleccionaron *Andiragaleottiana* Standl., endémica a México y *A. inermis* (W. Wright), la cual se extiende en el neotrópico y al occidente de África (Lewis *et al.*, 2005)

***Eriosema* (DC.) Rchb.** Con 150 especies y dos centros de diversificación uno en África con alrededor de 110 especies, y el otro en el Neotrópico con alrededor de 40, 7-8 de estas en México (Candido *et al.*, 2019).

***Errazurizia* Phil.** Cuenta con 4 especies, 3 de ellas presentes en el sureste de los Estados Unidos y el noreste de México, una en las costas de Chile.

***Psorothamnus* Rydb.** Cuenta con 9 especies, distribuidas en el SW de Estados Unidos y el NW de México (Baja California, Sonora y Chihuahua).

***Olneya* A.Gray.** Con una sola especie distribuida en el NW de Estados Unidos y NW de México.

***Ormosia* Jacks.** Cuenta con 130 especies, distribuidas en México, América Central, Caribe, norte y oeste de Sudamérica de Brasil, Bolivia, así como en el sureste de Asia y Australia, alcanzando su más alta tasa de diversidad en Indochina y China.

## Área de Estudio

Los Estados Unidos Mexicanos se localizan en la porción norte del continente americano. Es el país latinoamericano más septentrional; colinda al norte con Estados Unidos de América y al sureste con Guatemala y Belice; con el Golfo de México y el Mar Caribe al este, y el Océano Pacífico al oeste. El país posee una superficie de 1 953 162 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicado, casi por partes iguales, a ambos lados del Trópico de Cáncer. El perímetro del país es de 15,518 km, de los cuales 11,208 km son litorales y 4,310 km fronteras. El territorio insular está formado por 371 islas, arrecifes y cayos. Las coordenadas extremas que enmarcan al territorio mexicano son: 14° 32' 27" al sur de la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala; 32° 43' 06" al norte en el Monumento 206, que es el punto más al norte de nuestra frontera con Estados Unidos de América; 86° 42' 36" en el extremo sureste de la Isla Mujeres; al oeste 118° 27' 24" en la Punta Roca Elefante de la Isla Guadalupe, en el Océano Pacífico (INEGI, 2011).

La variación del clima en el territorio mexicano es tan grande, que contiene prácticamente todos los grupos y subgrupos climáticos reconocidos, existiendo variaciones de climas secos a húmedos, en una distancia de pocos kilómetros. Esta variabilidad climática se debe a varios factores: (1) la situación latitudinal del país con relación a los grandes cinturones de vientos; (2) su gran complejidad topográfica; (3) la anchura variable del continente a lo largo del territorio; (4) la temperatura de las corrientes marinas que bañan las costas mexicanas y (5) la trayectoria de las tormentas de verano y de las masas polares que invaden el país en invierno. El Trópico de Cáncer marca en forma aproximada la franja de transición entre el clima árido y el semiárido que se presenta hacia el norte, así como el clima húmedo y el semihúmedo, debido a los vientos alisios y los ciclones que se

forman hacia el sur. Es muy probable que, de no contar con un litoral tan extenso y de no reducirse tanto la anchura del continente en las latitudes de México, la extensión de sus zonas áridas y el grado de aridez serían mayores. Por su humedad, 56% del territorio corresponde a zonas muy áridas, áridas y semiáridas que dominan el norte y las áreas del centro del país. Por su parte, 37% es subhúmedo y se presenta en las sierras y en las planicies costeras del Pacífico, Golfo de México y noreste de la Península de Yucatán. Las zonas húmedas, ocupan el 7% del territorio y se encuentran en donde inicia el ascenso a las sierras y se deposita la humedad del Golfo de México, así como en una pequeña porción en la vertiente Pacífico al extremo sur del país (CONABIO, 1998).

## **Objetivo**

- Evaluar los efectos que el cambio climático tendrá sobre la distribución potencial de 10 especies pertenecientes a seis géneros de la familia Leguminosae que habitan ambientes contrastantes y el papel que el sistema de áreas naturales protegidas tendrá en su conservación a largo plazo.

## **Objetivos Particulares:**

- Generar y evaluar modelos de distribución potencial actual para cada especie.
- Generar y evaluar modelos de distribución potencial futura de las especies, proyectados hacia los años 2050 y 2080 dentro del escenario A1B.
- Evaluar el porcentaje de los grupos de estudio, según su representación en las Áreas Naturales Protegidas de México, con referencia a los modelos de escenarios de cambio climático.

- Evaluar el papel del sistema de Áreas Naturales Protegidas de México en relación a la protección a largo plazo de las especies incluidas en este estudio.
- Realizar propuestas de conservación a largo plazo.

## Métodos

### Registros de las especies

Se estructuró una base de datos con los registros de presencia de las 10 especies de los seis géneros de leguminosas seleccionados, obtenidos del SNIB de la CONABIO. Se obtuvieron un total de 712 registros de las 10 especies de ambientes contrastantes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Lista de Especies de Fabaceae consideradas para el estudio.

Especie	Distribución	Ambiente	Registros
<i>Andiragaleottiana</i>	Sur de México	Tropical lluvioso	57
<i>Andirainermis</i>	Sur y Península de Yucatán	Tropical lluvioso y seco	148
<i>Eriosemadiffusum</i>	Sierra Madre Occidental	Templado	145
<i>Eriosemagrandiflorum</i>	Sierra Madre Occidental	Templado	89
<i>Errazurizibenthamii</i>	Baja California Norte	Árido	28
<i>Errazuriziamegacarpa</i>	Baja California Norte	Árido	119
<i>Olneyatesota</i>	Baja California Norte	Árido	57
<i>Ormosiaisthmensis</i>	Sur de México	Tropical lluvioso	26
<i>Ormosiamacrocarpa</i>	Sur de México	Tropical lluvioso	27
<i>Psorothamnus emoryi</i>	Baja California Norte	Árido	16

### Modelado de la Distribución Potencial

Las superficies climáticas para México fueron interpoladas estadísticamente utilizando el algoritmo denominado *thin-plates smoothing spline*, el cual está implementado en el paquete ANUSPLIN, y disponibles en la página <http://idrisi.uaemex.mx/>. Estas

superficies incluyen los valores del promedio mensual de 1910 a 2009, así como de la temperatura mínima y máxima y precipitación, a partir de más de 5000 estaciones meteorológicas de México, sur de Estados Unidos y norte de Centroamérica (Cuervo-Robayo *et al.*, 2013). De la combinación de estas y con ayuda del programa BIOCLIM del paquete ANUCLIM (Hutchinson *et al.*, 2000), se generaron un total de 19 parámetros bioclimáticos (Cuadro2) y los puntos geocodificados que representan los sitios en donde las especies están en crecimiento. Estos análisis habilitaron la determinación de los probables límites teóricos de los patrones de distribución de especies.

**Cuadro 2. Parámetros Bioclimáticos Empleados para modelar la Distribución Potencial de las Especies. La temperatura tiene como unidades ° Celsius y la precipitación en mm.**

	<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>
1.	Temperatura promedio anual	(°C)
2.	Oscilación diurna de la temperatura	(°C)
3.	Isotermalidad	(coeficiente entre parámetros 2 y 7)
4.	Estacionalidad de la temperatura	(Coeficiente de variación en %)
5.	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	(°C)
6.	Temperatura máxima promedio del periodo más frío	(°C)
7.	Oscilación anual de la temperatura	(coeficiente entre parámetros 5/6 y 6)
8.	Temperatura promedio cuatrimestre más lluvioso	(°C)
9.	Temperatura promedio cuatrimestre más seco	(°C)
10.	Temperatura promedio cuatrimestre más cálido	(°C)
11.	Temperatura promedio cuatrimestre más frío	(°C)
12.	Precipitación anual	(mm)
13.	Precipitación del periodo más lluvioso	(mm)
14.	Precipitación del periodo más seco	(mm)
15.	Estacionalidad de la precipitación	(coeficiente de variación en %)
16.	Precipitación del cuatrimestre más lluvioso	(mm)
17.	Precipitación del cuatrimestre más seco	(mm)
18.	Precipitación del cuatrimestre más cálido	(mm)
19.	Precipitación del cuatrimestre más frío	(mm)

Las variables climáticas están representadas por el promedio mensual de las

temperaturas mínimas y máximas, así como por los valores de precipitación, los cuales fueron convertidos al formato *AsciiRasterGrid*, formato requerido por el algoritmo MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). Los resultados tienen una resolución espacial de un 1 km<sup>2</sup> y fueron evaluados y comparados usando la curva ROC (Índice AUC) (Phillips *et al.*, 2006).

### **Modelos Generales de Circulación y Escenarios de Cambio Climático**

Para evaluar los efectos propuestos en los escenarios climáticos se siguieron los lineamientos del grupo de trabajo sobre escenarios para la evaluación del impacto climático de El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC AR4 (IPCC.TGCIA, 2007), en particular utilizando el escenario A1B, el cual se basa en los modelos de Circulación General MPI\_ECHAM5.

Se eligieron los periodos para los años 2050s (que representa el periodo 2040-2069), y 2080s (representa el periodo 2070-2099), y el escenario tipo A1B el cual hace referencia a un crecimiento económico y poblacional rápido en un mundo globalizado (fuerte interacción y convergencia entre países). Este escenario apuesta por el uso de tecnologías eficientes y por un uso balanceado de los recursos, en donde se prevén estimaciones del aumento de temperatura de 2.8 °C, con un rango probable de 1.7 a 4.4 °C. En este escenario se estiman incrementos de sequías y precipitaciones intensas (IPCC, 2007), este es uno de los mejores modelos climáticos globales (Connolley y Bracegirdle, 2007).

La selección de modelos de CC estuvo basada en el estudio comparativo de desempeño para predecir los cambios en el clima de 22 modelos AR4 utilizados en el Cuarto reporte de Evaluación del IPCC (IPCC-WGI, 2007) para la región México (Conde y Gay, 2008).

Los mapas con los modelos actuales se compararon con los obtenidos al aplicar los escenarios de cambio climático y se calculó el potencial presente y futuro de las áreas de distribución para cada uno de los taxones usando el programa ArcView 3.2 (ESRI, 2002).

### **Presencia de las especies en las Áreas Protegidas de México**

Los registros conocidos y los modelos de distribución potencial presentes y aquellos después de aplicar los escenarios de cambio climático fueron contrastados con el polígono del sistema de Áreas Naturales Protegidas, con el fin de evaluar qué porcentaje de sus registros/poblaciones conocidas se encuentran distribuidas dentro de este sistema en la actualidad.

Un último aspecto analizado en este trabajo incluyó la evaluación del posible papel que desempeñarán los sistemas de Regiones Terrestres Prioritarias (Arriaga et al., 2000) y las Áreas Naturales Protegidas de México (CONANP, 2007), en la conservación a largo plazo de las especies de los géneros implicados en el estudio. La distribución actual y potencial se comparó con los escenarios para determinar si se continuará la protección de estos taxones, una vez que el cambio climático haya marcado las diferentes regiones del país, con sus efectos.

Para determinar el porcentaje de cambio en la distribución de cada una de las especies, se cuantificó el número de píxeles de presencia obtenido, y se les aplicó la fórmula:  $\% \text{ cambio} = (t1 - t0) \times 100$ , donde  $t0$  denota el número de píxeles de presencia para el tiempo actual y  $t1$ , el número de píxeles de presencia para cada horizonte de tiempo (Gutiérrez, 2014), expresado para el escenario A1B en los años 2050s y 2080s.

## Resultados

### Distribución actual

De la recopilación de información bibliográfica y de bases de datos, de la revisión de ejemplares de herbario, herbarios electrónicos y de las georreferencias en campo de algunas de las especies, se obtuvieron un total de 1221 registros de 31 especies de los 6 géneros, los cuales fueron depurados de registros inadecuados, imprecisos o mal georreferenciados. A partir de ello, se construyó una base de datos de 10 especies que contó finalmente con 712 registros confiables para poder ser proyectadas en su espacio geográfico (Cuadro 1). Una vez verificados y validados los registros, fueron visualizados a través del Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2 (ESRI, 2002)(figura 3).

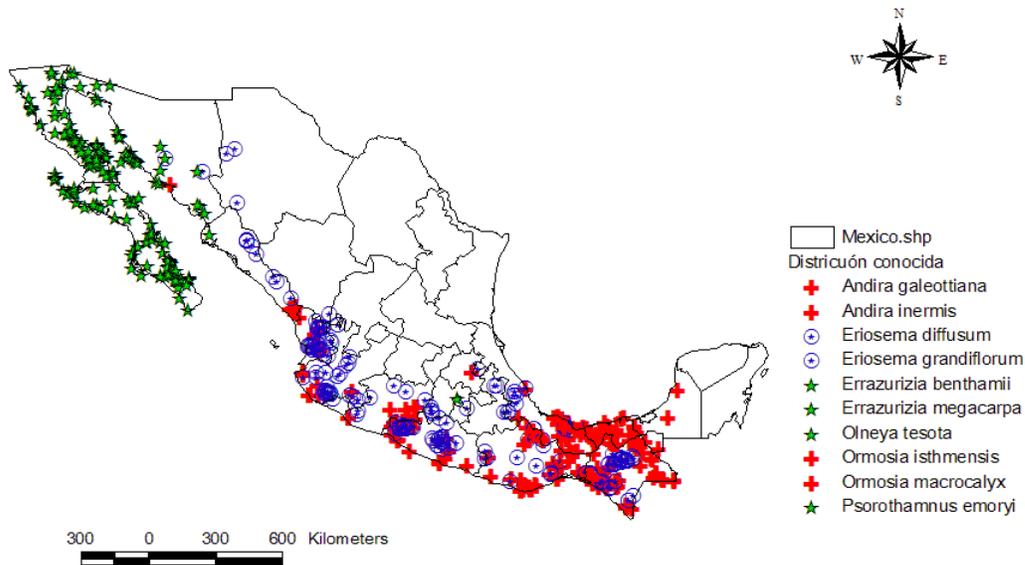


Figura 3. Distribución conocida de las 10 especies en México. Los colores diferencian a las especies por ambientes. Verde-árido, azul-templado y rojo-tropical lluvioso o seco

Conbasea lo descrito, se propuso una regionalización general, a partir de la cual se muestra la distribución que tienen las especies de este estudio, bajo el entendido que habitan ambientes contrastantes, como los ambientes áridos de la Península de Baja California, los bosques templados de las montañas de la Sierra Madre Occidental y los bosques tropicales húmedos del Sur de México y la Península de Yucatán (figura 3).

### **Modelado de distribución potencial**

Los modelos resultantes reflejan de una manera muy razonable la distribución actual y aquellas áreas similares idóneas en donde cada especie podría presentarse. Todos los modelos tuvieron valores altos de AUC superiores a 0.850 (Thuilleret *al.*, 2009)

Cuadro 3. Distribución potencial de las especies de Leguminosae por región en km<sup>2</sup>

<u>Especie</u>	<u>Distribución potencial km<sup>2</sup></u>
<i>Andiragaleottiana</i>	95,263
<i>Andirainermis</i>	255,556
<i>Eriosemadiffusum</i>	296,241
<i>Eriosema grandiflorum</i>	334,230
<i>Errazurizibenthamii</i>	17,044
<i>Errazuriziamegacarpa</i>	585,252
<i>Olneyatesota</i>	130,991
<i>Ormosiaisthmensis</i>	154,124
<i>Ormosiamacrocalyx</i>	47,168
<i>Psorothamnus emoryi</i>	115,865

Las figuras 4 a-j muestran la distribución actual potencial de las especies a nivel de país.

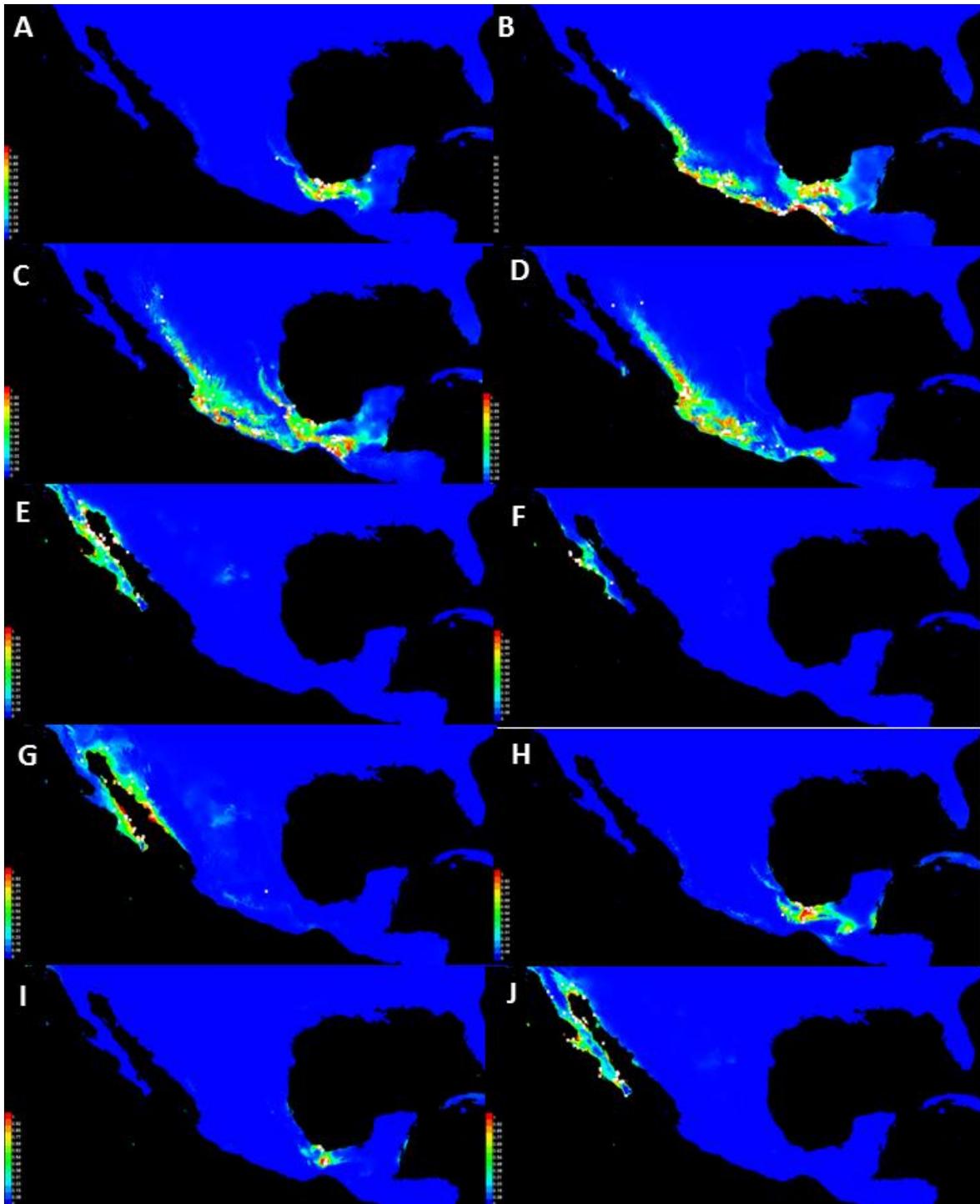


Figura 4a-j Imágenes de los modelos de distribución actual y potencial de las 10 especies de Leguminosae producidos con MaxEnt. A) *Andiragaleottiana*, B) *Andirainermis*, C) *Eriosemadiffusum*, D) *Eriosemagrandiflorum*, F) *Errazuriziabentharii*, G) *Errazuriziamegacarpa*, H) *Ormosiaisthmensis*, I) *Ormosiapanamensis*, J) *Psorothamnus emoryi*.

## **Modelos de Cambio Climático de las 10 especies**

Se llevó a cabo la elección de los Modelos de Circulación General (GSM's) atendiendo el criterio de representatividad, basado en la selección de aquellos que son capaces de reproducir mejor el clima y que presentan una mejor resolución espacial para emprender análisis más detallados de México, tomando en cuenta también la disponibilidad de datos y contenidos de estos. Se eligió el modelo: MPI\_ECHAM5, que es un Modelo Climático Global elaborado por el Instituto Max Planck de Meteorología, una de las organizaciones de investigación de la Sociedad Max Planck de Alemania.

MPI-ECHAM5 se utilizó recientemente en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, a la par de otros modelos de circulación general de distintos países. En los datos de este informe, se hace referencia a la abreviatura MPEH5 que son modelos completos con datos de temperaturas máximas y mínimas para el siglo XXI, y son considerados de los mejores modelos climáticos globales (Connolley & Bracegirdle, 2007).

Esta decisión se basó en los datos presentados en el estudio comparativo de la aproximación predictiva de 22 modelos AR4 utilizados en el Cuarto reporte de Evaluación del IPCC (IPCC-WGI, 2007), para la región México (Conde, A. & Gay, C., 2008).

Se obtuvieron las capas bioclimáticas para ambos modelos por medio del portal electrónico [www.worldclim.org/](http://www.worldclim.org/), desarrolladas con el Método de reducción de escala de alta resolución basado en la interpolación espacial de las anomalías (Deltas) de las salidas originales de los GCM. Una vez obtenidas las capas bioclimáticas globales de los modelos de cambio climático, se procedió a generar recortes de la región "México" (figuras 4 a-j) utilizando el programa ArcView 3.2 (ESRI, 2002).

Con los recortes de las capas, se generó un ejercicio de modelado con los escenarios

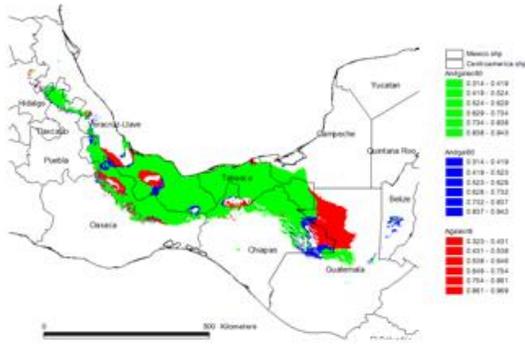
de cambio climático de los años 2050s y 2080s, con base al escenario A1B para cada una de las especies a nivel país, utilizando el algoritmo MaxEnt (Phillpset *al.*, 2006), con 19 superficies climáticas para México proyectadas a futuro, para posteriormente designar los ajustes más eficientes para el algoritmo.

Se generaron los modelos de distribución con los Modelos de Circulación General para cada una de las especies a nivel país con el algoritmo MaxEnt (Phillpset *al.*, 2006). Se estimó el área de ocupación por especie en km<sup>2</sup> y su porcentaje en relación con el sentido de cambio en el modelo propuesto, esto es, la contracción o expansión que los modelos de esas especies sufrieron, utilizando el programa ArcView 3.2 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cuantificación del Área de Distribución de las Especies Vegetales para los Años 2050 y 2080 en el Escenario A1B en los GCM MPI\_ECHAM5 (E) expresado en km<sup>2</sup> y sus porcentajes de cambio.

<u>Especie</u>	<u>Actual</u>	<u>E50</u>	<u>Porcentaje de cambio</u>	<u>E80</u>	<u>Porcentaje de cambio</u>
<i>Andiragaleottiana</i>	95,263	84,216	-11.5963176	117,104	39.0519616
<i>Andirainermis</i>	255,556	218,602	-14.4602357	349,830	60.0305578
<i>Eriosemadiffusum</i>	296,241	387,881	30.9342731	272,994	-29.6191358
<i>Eriosemagrandiflorum</i>	334,230	359,344	7.51398737	271,428	-24.465693
<i>Errazuriziabentharii</i>	17,044	154,240	804.951889	27,887	-81.9197355
<i>Errazuriziamegacarpa</i>	585,252	316,237	-45.9656695	364,772	15.3476665
<i>Olneyatesota</i>	130,991	292,233	123.093953	210,509	-27.9653564
<i>Ormosiaisthmensis</i>	154,124	132,169	-14.2450235	94,441	-28.5452716
<i>Ormosiamacrocalyx</i>	47,168	141,758	206.898745	173,015	19.5201647
<i>Psorothamnus emoryi</i>	115,865	176,793	2.71868122	186,667	8.4137294

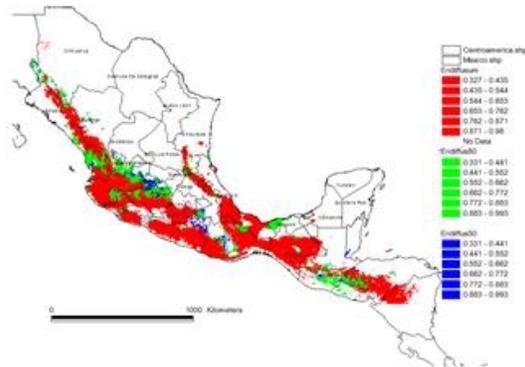
Se generaron mapas que describen la distribución futura de manera comparativa, con base a los escenarios de cambio climático (figura 5).



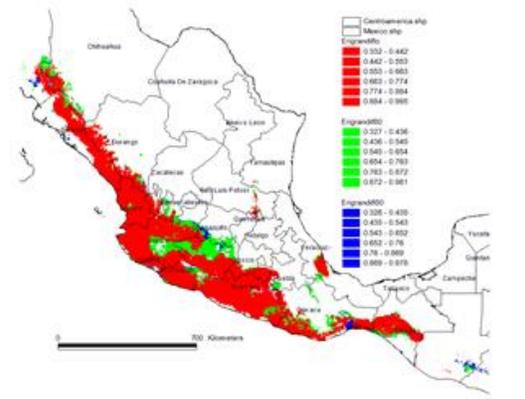
*Andira galeottiana*



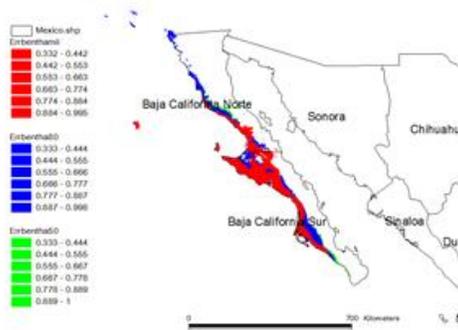
*Andira inermis*



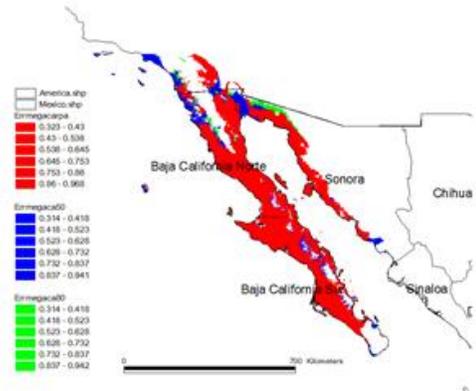
*Eriosema diffusum*



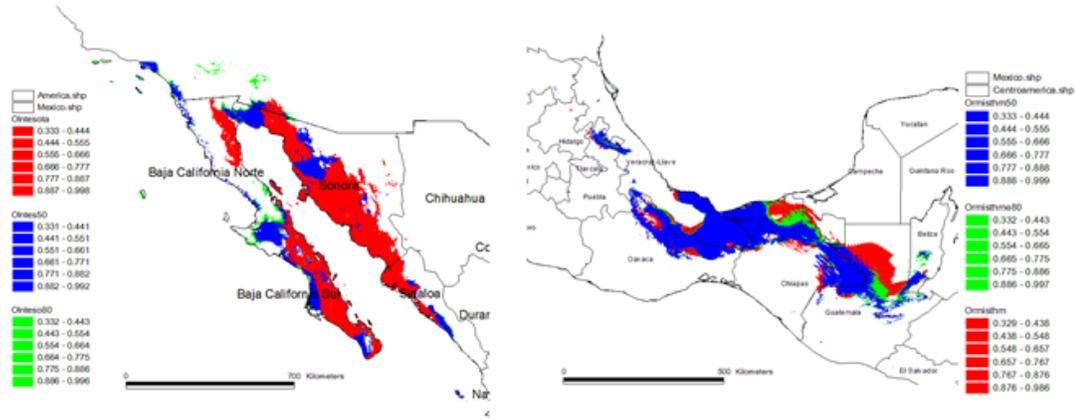
*Eriosema grandiflorum*



*Errazurizia benthamii*

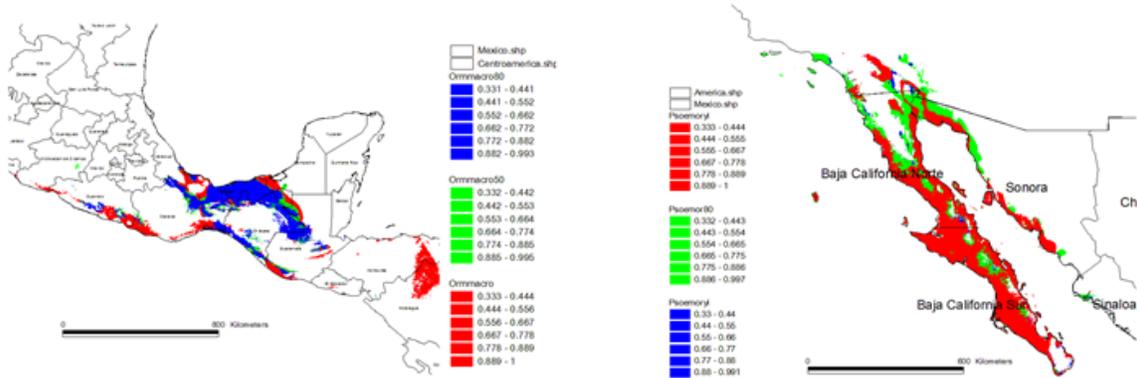


*Errazurizia megacarpa*



*Olneya tesota*

*Ormosia isthmensis*



*Ormosia macrocarpa*

*Psorothamnus emoryi*

Figura 5. Distribución actual y futura para los años 2050y 2080 de las diez especies de Leguminosae con relación al Modelo de Circulación General MPI\_ECHAM5.

Se contrastó la distribución actual y potencial de las 10 especies de este estudio con el sistema de Áreas Naturales de México, y todas se encuentran consideradas en 24 diferentes ANPs, aunque con diferente grado de representatividad (Cuadro 5).

Cuadro 5. Presencia de Especies en las Áreas Naturales Protegidas de México (ANP's),

<b>Especie</b>	<b>No. ANP's</b>	<b>Nombre ANP</b>
<i>Andiragaleotiana</i>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los Tuxtlas</li> <li>• Selva de ocote</li> </ul>
<i>Andirainermis</i>	11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laguna de Términos</li> <li>• Los Tuxtlas</li> <li>• Pantanos de Centla</li> <li>• Montes Azules</li> <li>• La Sepultura</li> <li>• Cañón del Sumidero</li> <li>• Lacan-Tun</li> <li>• El Veladero</li> <li>• Huatulco</li> <li>• El Triunfo</li> </ul>
<i>Eriosemadiffusum</i>	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Sepultura</li> <li>• El Triunfo</li> <li>• Los Tuxtlas</li> <li>• Sierra de Manantlán</li> <li>• Cañón del Río Blanco</li> <li>• La Primavera</li> <li>• Cascadas de Agua Azul</li> </ul>
<i>Eriosemagrandiflorum</i>	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Sepultura</li> <li>• Sierra de Alamos</li> <li>• Iztaccihuatl-Popocatepetl</li> <li>• Sierra de Quila</li> </ul>
<i>Errazuriziabentharii</i>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valle de los Cirios</li> <li>• El Vizcaino</li> </ul>
<i>Errazuriziamegacarpa</i>	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valle de los Cirios</li> <li>• El Vizcaino</li> <li>• Islas del Golfo de California</li> <li>• Isla de San Pedro Mártir</li> </ul>
<i>Olneyatesota</i>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bahía de Loreto</li> <li>• El Pinacate y gran desierto de Altar</li> <li>• Islas del Golfo de California</li> </ul>
<i>Ormosiaisthmensis</i>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los Tuxtlas</li> <li>• Montes Azules</li> </ul>
<i>Ormosiamacrocalyx</i>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montes Azules</li> <li>• La Sepultura</li> <li>• Pantanos de Centla</li> </ul>

Psorothamnus schottii	1	• Valle de los Cirios
-----------------------	---	-----------------------

Además de ubicar los registros de las especies dentro de las Áreas Naturales Protegidas, se evaluó el porcentaje del área ocupada por los modelos de distribución potencial para cada una en México, cuantificado en km<sup>2</sup> y porcentajes de cambio con referencia en los modelos de escenarios de cambio climático, en términos de la expansión y contracción para cada una de las especies en cada uno de los escenarios A1B (cuadro 6).

Cuadro 6. Cuantificación y Porcentaje de Cambio en el Área de Distribución de las Especies para los años 2050 y 2080, en el Escenario A1B con relación a su presencia dentro de las ANPs en el Modelo GCM MPI\_ECHAM5.

Especies	2050 Km <sup>2</sup>	% de cambio km <sup>2</sup>	Exp	Contr	2080 km <sup>2</sup>	% de cambio Km <sup>2</sup>	Exp	Contr
<i>Andiragaleottiana</i>	3,748	-47.255		X	5,453	45.49	X	
<i>Andirainermis</i>	14,685	-37.275		X	17,629	20.0476	X	
<i>Eriosemadiffusum</i>	20,938	-16.906		X	23,838	13.8504	X	
<i>Eriosemagrandiflorum</i>	16,512	-33.851		X	18,662	13.0208	X	
<i>Errazuriziabenthamii</i>	62,762	264.683	X		21,217	-86.377		X
<i>Errazuriziamegacarpa</i>	80,641	-6.9594		X	76,195	5.46744	X	
<i>Olneyatesota</i>	66,705	14.6074	X		50,965	-0.7945		X
<i>Ormosiaisthmensis</i>	6,243	-22.935		X	4,943	-20.823		X
<i>Ormosiamacrocalyx</i>	4,269	-58.613		X	7,500	75.6851	X	
<i>Psorothamnus emoryi</i>	38,008	-43.883		X	8,382	7.00641	X	

## Discusión y conclusiones

El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha acelerado el incremento de la temperatura (IPCC, 2018), lo cual ha modificado el sistema climático causando importantes afectaciones tanto a la población humana como a la biodiversidad de todo el mundo (IPCC, 2019). El CC, al parecer, está ocurriendo de una forma más rápida e incisiva que lo esperado y/o proyectado (Cuervo-Robayo et al., 2020; IPCC, 2013). Sus efectos se están experimentando en todo el mundo y bajo diferentes escenarios, como el deshielo de los glaciares de la Antártida, los cambios en los patrones fenológicos de especies y en los ciclos naturales como la lluvia, así en la temperaturas, agricultura, etc. (Ureta et al., 2015). Por tanto, los efectos sobre las áreas y patrones de distribución de las especies en los distintos ambientes no están exentos de ser impactados (Barquero, 2016; IPCC, 1992, 2013; Lorente *et al.*, 2004; Toro *et al.*, 2015). México, por supuesto no es la excepción y de hecho, ya se han publicado numerosos trabajos de los efectos del cambio climático adistintos elementos de su diversidad biológica (Téllez-Valdés&Dávila-Aranda, 2003; Levisnky *et al.*, 2007; Lira *et al.*, 2009; Téllez *et al.*, 2006, 2007).

El uso de nuevos conceptos, métodos y herramientas para estimar la presencia de las especies, entre estos, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos de predicción, han resultado ser herramienta útiles para estimar la distribución potencial actual y futura ante los efectos del cambio climático, y, por ende, permiten la identificación de sitios prioritarios para su conservación, lo cual es uno de los principales retos que enfrenta la biología de la conservación actualmente (Sánchez-Cordero *et al.*, 2009)

Los resultados de este estudio han permitido identificar la probabilidad de encontrar a las especies en lugares que poseen las condiciones propicias en donde pueden habitar, aún

sin haber sido registradas. Los efectos y el comportamiento de las especies ante los Escenarios de Cambio Climático (ECC), bajo la metodología utilizada, se genera una visualización preventiva de los estragos que habrían de enfrentar las especies en su distribución en el futuro y de los retos e importancia que representa su conservación en las áreas naturales protegidas. Por tanto, la conservación de las especies en escenarios climáticos futuros, debería ser una prioridad, especialmente cuando en este estudio, se demuestra que los patrones de respuesta del 80% de las que se estudiaron presentan pérdidas importantes en su distribución (Bravo-Cadena et al, 2011; García-Valdés & Morales-Castilla, 2016).

Los resultados del estudio muestran que las especies, independientemente del ambiente en que se distribuyen, ya sea en los bosques tropicales lluviosos, tropicales secos, bosques templados o en condiciones de aridez, sufrirán contracciones en sus patrones de distribución, desde muy bajas a muy severas para los 2050s. Sin embargo, de manera sorprendente y muy contrastante, el escenario será totalmente inverso para los 2080s. En otros grupos, como Cucurbitaceae (Lira et al., 2009) o Cactaceae (Dávila et al., 2012), se cumple que el incremento en las temperaturas durante eventos de CC es consistente y mayor en un escenario drástico, con incremento en las áreas de distribución. Sin embargo, evaluaciones sobre los cambios en el clima durante el siglo XX en las regiones biogeográficas de México, muestran cambios diferenciales, en que las temperaturas se incrementan, pero posteriormente descienden (Cuervo-Robayo et al., 2020). Es importante considerar que existen distintos factores que influyen en el modelado de la distribución potencial de las especies, entre estos se incluye una cantidad incompleta de registros y una posible baja representatividad ambiental de estos registros dentro del área a modelar, lo que podría generar modelos no tan confiables y que reflejaran áreas de

distribución actual y futura inconsistentes respecto a la distribución actual de las especies.

En este estudio, casi la totalidad de las especies estudiadas contraen sus áreas de distribución potencial durante 2050 (*Andiragaleottiana*, *Orrmosiamacocalyx* y *O. isthmensis* del bosque tropical perennifolio; *A. inermis* del bosque tropical caducifolio; *Errazuriziamegacarpay Psorothamnus emoryi* de las zonas áridas; *Eriosemagrandiflorum* de las zonas templadas). Todas ellas contraen sus áreas de distribución, en algunos casos superando el 50% del área de idoneidad de condiciones propicias para la especie. Contrariamente a lo que ocurre en 2050, durante 2080 la mayoría de estas especies muestran áreas de distribución potencial en las cuales expanden nuevamente sus patrones de distribución, con excepción de *Errazuriziabenthamique* prácticamente desaparece, lo que la ubicaría en peligro de extinción al permanecer solo el 14% de los ambientes en donde se distribuye. Esta respuesta diferencial entre los dos escenarios es muy interesante y puede deberse a distintos factores, ya sea a una inconsistencia en el modelado o en la interpolación de las capas, ya que por lo general, los resultados de otros trabajos similares indican que conforme se incrementa la temperatura, la distribución de las especies, en general, tiende a contraerse (Ureta et al., 2015), lo cual no ocurre en este estudio. Sin embargo, hay otros trabajos que encupero que no resulta tan raro. Cuervo-Robayo et al. (2020), analizó el cambio climático en México durante el siglo XX, refiriendo patrones de cambio en distintas regiones del país, incluyendo algunas que durante un periodo la temperatura se incrementa, mientras que en el siguiente decrece. Asimismo, Téllez et al. (en preparación), analizaron los cambios de clima en el contexto geográfico de México para 2050 y 2070e , identificaron los mismos patrones, incluyendo la desaparición y aparición de ambientes y/o la contracción o expansión de muchos de estos a través de todo el país. En consecuencia, las capas de CC utilizadas para modelar la distribución de las especies, y los

modelos que se obtienen, también reflejan esos mismos patrones.

Analizando específicamente los resultados de este estudio, se observa que aparentemente todas las especies incluidas incrementan sus áreas de distribución en el escenario más drástico. No obstante que en el escenario intermedio, muchas de ellas contraen dichas áreas. Las diferencias encontradas, no sólo, entre los tres ambientes, sino entre las especies del mismo ambiente son muy marcadas. Los porcentajes de contracción y expansión son muy disimiles casi en todos los casos, esto mismo pasa en otros grupos (Lira et al., 2009; Dávila et al., 2012). Hay estimaciones que señalan que bajo los ECC las extinciones a nivel global podrían alcanzar del 28 al 35% de las especies (Thomas *et al.*, 2004). Estas posibilidades de extinción afectan a los individuos, poblaciones, distribución geográfica y funcionamiento de los ecosistemas directa o indirectamente (Challenger & Dirzo, 2009), aunque en algunos casos persisten en hábitats fragmentados. La capacidad de las especies ya sea para resistir las condiciones adversas o migrar a otros hábitats más adecuados, son inciertas. Esta capacidad depende de su riqueza y diversidad genética y su aptitud para migrar de acuerdo con sus síndromes de dispersión. Si esto no es el caso, entonces en el peor de los casos, ellas pueden extinguirse. En general, prácticamente todas las especies tienen una forma poco eficiente de dispersión, ya que la mayoría son barócoras, por la cual no alcanzan grandes distancias. En este trabajo, *Andiragaleottiana*, *Errazuriziabentamii*, *E. megacarpa*, *Olneyatesota* y *Psorothamnus emoryi* que representan el 50 % son endémicas al país o con un patrón de distribución restringido. El resto de las especies que ocupan en la actualidad amplias áreas dentro del territorio nacional, tuvieron en el pasado las condiciones favorables para alcanzar dichas extensiones, no obstante sus bajas capacidades de dispersión. (Sousa & Delgado, 1993). Es evidente que lo que muestra este trabajo está ocurriendo en todo el territorio nacional y en buena parte de

las especies (Lira et al., 2009).

Ahora bien, existe una creciente preocupación en el medio académico, por el papel que están jugando las ANP's para cumplir sus objetivos de conservación (Hockings, 2003). Por tanto, la evaluación de los cambios climáticos, ecosistémicos y de la biodiversidad en las ANP's es esencial para planificar actividades acertadas de conservación de las especies y de los ecosistemas, con el objetivo de detectar áreas de especial preocupación y para diseñar estrategias que permitan prevenir la pérdida de la biodiversidad (Sánchez-Cordero & Figueroa, 2007; Sánchez-Cordero *et al.*, 2012).

Ante este escenario tan drástico de contracciones y expansiones climáticas, el papel que jugarán las ANP's será incierto. De tal suerte que, si bien es cierto que en la actualidad todas las especies estudiadas se encuentran representadas dentro de alguna de ellas, en el futuro las condiciones serán posiblemente muy distintas y varias estarán en riesgo de perder muchas de sus poblaciones durante 2050, aunque si llegan a sobrevivir, las condiciones las favorecerán en el segundo escenario de 2080, por lo cual algunas de sus poblaciones quizá tendrán la posibilidad de recuperarse (Orozco de Rosas et al., 2014; CONANP, 2015; Ortega-Rubio et al., 2015).

Los efectos del CC en la distribución de las especies parecen abrumadores, aunque en realidad son inciertas. Diversos trabajos reportan resultados similares a los encontrados en este estudio. Es decir, que en una ventana de tiempo (2050) las especies contraerán sus áreas de distribución (Lira et al., 2009), pero en otra ventana (2070, 2080 o incluso 2100), ellas podrían expandirse (Cuervo-Robayo et al., 2020).

Otros factores que se deben considerar independientemente de los efectos de cambio climático en relación a la conservación de las especies, son las transformaciones que están ocurriendo en la cubierta vegetal del país (Mas et al., 2004). Así, el 2% de México se

transforma cada década por múltiples cambios provocados por el hombre.

Actualmente la biodiversidad se ve amenazada por las modificaciones ambientales debido a los cambios en la cubierta vegetal provocados por el cambio climático (Vitousek et al., 2009; Röckstrom et al., 2009; Lira et al., 2009; Téllez-Valdés et al., 2006). La tasa anual de cambio en el uso del suelo promedio en las ANP's es de 0.03%, con más de la mitad de ellas (57%) mostrando una reducción de las áreas transformadas. Asimismo, menos de la mitad (43%) mostró incrementos en el área transformada. Sin embargo, el 20% de las ANP's vinculadas a las especies de este estudio, mostraron tasas de cambio del uso del suelo más altas que en todo el país. El cambio más bajo puede ser el resultado de la combinación de políticas y recursos ambientales, junto con el hecho que muchas de ellas muestran no son idóneas para las actividades económicas, están aisladas e inaccesibles. Además, viven en lugares con suelos y características topográficas que son inadecuados para la productividad agrícola (Sánchez-Cordero *et al.*, 2009)

Por tanto, este estudio y algunos otros (Hernández-Ramírez *et al.*, 2016), indican que los polígonos actuales de las ANP's no tendrán las condiciones climáticas óptimas para favorecer la supervivencia de gran parte de las especies mexicanas.

Finalmente, aunque es fácil concluir que es necesario tomar medidas drásticas para lograr la conservación de los recursos naturales del país, es importante acalrar que este estudio, así como otros, son solo una pequeña muestra de lo que está ocurriendo a través de todo el país. Los cambios en el uso del suelo por las actividades humanas, el comercio ilegal con toda clase de especies, y ahora los efectos del cambio climático en la distribución y patrones de distribución de las especies de plantas y animales parece imparable. No obstante, el empleo de nuevas metodologías para estimar la presencia de especies, así como los SIG resultan útiles en la identificación de áreas importantes de conservación

(Margules&Sakar, 2009; Sánchez-Cordero *et al.*, 2012), ya que uno de los aspectos más relevantes de la biología de la conservación tiene que ver con la distribución de las especies (Peterson *et al.*, 2002).

En la actualidad, la única medida empleada para contrarrestar tales cambios en el clima que pronostican un futuro incierto son las ANPs. Entre las medidas extraordinarias que se deberían realizar, son: a) detener los cambios en el uso de suelo tan drásticos que ocurren; b) llevar a cabo acciones de reforestación y restauración de los ecosistemas; c) revisar la configuración del sistema de ANPs, ya que las condiciones ambientales de muchas de estas cambiarán y serán incapaces de cumplir con el objetivo para el que fueron decretadas, que es el de proteger a las poblaciones de las distintas especies en cada región del país y d) finalmente, el pago por servicios ecosistémicos a través de organizaciones locales que protejan a través de un uso sostenible la salud de los recursos naturales. Estas medidas conducen a considerar propuestas, tales como la del uso de Redes de Áreas para la Conservación (CAN por sus siglas en inglés) para la Planeación Sistemática de Conservación propuestas por Margules&Pressey (2000); d) recurrir sistemáticamente a la conservación *ex situ*, a través de los bancos de semillas (Cronk&Fennessy, 2000). Existen aproximadamente unos 1,500 bancos de semillas repartidos en más de 150 países. En particular, México cuenta con varios que tienen el potencial de almacenamiento a largo plazo y cumplen con los estándares científicos como el de la FES Iztacala (UNAM), que desde hace más de 20 años con el apoyo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, y en colaboración con los Jardines Botánicos Reales de Kew, en Inglaterra, a través del Millennium Seed Bank, han estado conservando semillas de las zonas áridas de México (Slageren, 2003). Lejos de reemplazar a toda la riqueza de los ambientes naturales, los bancos de semillas tienen la virtud de ser la última

esperanza para muchas especies que quizás están perdiendo poblaciones en sus lugares de origen. Es importante considerar las posibilidades que estas alternativas brindarán para el futuro, empezando desde ahora.

## **Literatura citada**

- Arriaga, L., Espinoza, J.M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L. & Loa, E. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.
- Barquero, M. 2016. Revisión de los efectos del cambio climático sobre la diversidad de los trópicos. *Ingeniería* 26 (1): 17-78.
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S.P., Peterson, A.T. & Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modelling and species distribution. *Ecological Modelling*, 222:1810-1819.
- Berry, P.M, T.P. Dawson, P.A. Harrison & R.G. Pearson 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology and Biogeography* 11: 453-462.
- Bezaury-Creel, J., Gutiérrez-Carbonell, D. 2009. Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México. En: Dirzo, R, González, R., March, I.J. (eds.) *Capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México D.F., México. pp. 385- 431.
- Bravo-Cadena, J., Sánchez, G. & Gelviz-Gelvez, S. 2011. Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático. *Cuadernos de Biodiversidad*. N. 35. ISSN 1575-5495, 12-18.

- Caldecott, J.O., M.D. Jenkins, T.H. Johnson & B. Groombridge 1996. Priorities for Conserving Global Species Richness and Endemism. *Biodiversity and Conservation* 5: 699-727.
- Candido, E., De Vargas, W., Alves-bezerra, L., Freitas, V., Vatanparast, M., Peter, G., Goulart, T. & Fortuna-Pérez, A. 2019. Taxonomic Synopsis of *Eriosema* (Leguminosae: Papilionoideae, Phaseoleae) in Brazil. *Phytotaxa* 416 (2): 091–137.
- CChallenger, A. & Dirzo, R. 2009. Factores de cambio y estado de la biodiversidad. *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO. México, pp. 37-73.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. CONANP. 2007. Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2007-2012. SEMARNAT-CONANP, México D.F., 50p.
- CONABIO. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. 1998. *La diversidad biológica de México: Estudio del país*. 1ª Edición. México, D.F. 293p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. CONANP. 2015. Estrategia de cambio climático desde las áreas naturales protegidas: una convocatoria para la resiliencia de México 2015-2020. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.
- Conde, C. & Gay, C. 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México, D.F. 105p.
- Connolley, William M.; Bracegirdle, Thomas J. (29 November 2007). "An Antarctic assessment of IPCC AR4 coupled models" (PDF). *Geophysical Research Letters* 34 (22): L22505.

- Cronk J.K. y Fennessy M.S. 2001. *Wetland Plants: Biology and Ecology*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- de Winton M.D. Clayton J.S. y Champion P.D. 2000. Seedling emergence from seed banks of 15 New Zealand lakes with contrasting vegetation histories. *Aquatic Botany* 66:181-194.
- Cuervo-Robayo, A.P., Téllez-Valdés, O., Gómez, M., Venegas-Barrera, C., Manjarrez, J. & Martínez-Meyer, E. 2013. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*. Doi: 10.1002/joc.3848.
- Cuervo-Robayo, A.P., C. Ureta, M.A. Gómez-Albores, A.K. Meneses-Mosquera, O. Téllez-Valdés & E. Martínez-Meyer. 2020. One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE* 15(7): 1-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>.
- Dávila P., Téllez, O. & Lira R. 2012. Impact of climate change on the distribution of populations of an endemic Mexican columnar cactus in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Plant Biosystems — An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. pp 1–11.
- de Faria S.M., Lewis G.P., Sprent J.I. & Sutherland J.M. 1989. Occurrence of nodulation in the Leguminosae. *New Phytologist* 111: 607-6129.
- ESRI. 2002. *ArcView 3.2*. ESRI, Redlands, California. Environmental Systems Research Institute.
- García-Valdés, R., Morales-Castilla, I. 2016. Efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales: integrando inventarios y modelos. *Ecosistemas* 25(3): 51-59.
- Graham, P. H. & Vance, C. P. 2003. Legumes: importance and constraints to greater use. *Plant Physiology* 131: 872-877.

- Guisan, A. & Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147-186.
- Güizado-Rodríguez, M., Ballesteros-Barrera, C., Casas-Andreu, G., Barradas-Miranda, V., Tellez-Valdéz, O. & Salgado-Ugarte, I. 2012. The Impact of Global Warming on the Range Distribution of Different Climatic Groups of *Aspidoscelis costata costata*. *Zoological Science* 29:834-843.
- Gutiérrez, E. & Trejo, I. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 179-188
- Hernández-Ramírez, D., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A. & Trevino-Garza, E.J. 2016. Impacto de las Áreas Naturales Protegidas en la Conservación de Vegetación y Biodiversidad. *Monografía. Desarrollo Resiliente*, VI (1).
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P. & Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolates climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
  - Hutchinson, M.F. & Gallant, J. 2000. Digital elevation models and representation of terrain shape. In *Terrain Analysis: Principles and Applications*, Wilson JP, Gallant JC (eds). John Wiley.
- INE -SEMARNAT, 2012. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- INE y Cambio Climático. Escenarios de Cambio Climático. 2017. [www.gob.mx/inecc/accionesyprogramas/escenario-de-cambio-climatico-/80126](http://www.gob.mx/inecc/accionesyprogramas/escenario-de-cambio-climatico-/80126)

- INE, 2012b: Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional Estudio elaborado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, Centro de Ciencias de la Atmosfera de la Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinado por Cavazos T., Martínez B. Salinas A.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y geografía. 2011. Superficie Continental e Insular del Territorio Nacional.  
<https://web.archive.org/web/20111016142753/http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/extterri/frontera.cfm?c=154>
- INE-SEMARNAT, 2007. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INE -SEMARNAT, 2009. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2000. Summary for Policymakers Emission scenarios: a special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom y USA.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change This

Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris.

- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. United Kingdom y USA.
- IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. 2018. Calentamiento global de 1,5°C Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL). Geneva, Switzerland.
- IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. 2001. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. OMM-PNUD. Ginebra. 85pp.
- IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. 2007. Cambio climático y biodiversidad. Informe de Síntesis. Ginebra. 103pp.

- IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. 1992. *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M. & Hortal, J. 2008. Not as good as they seem: The importance of concept in species distribution modeling. *Diversity Distributions* 14:885–890.
- Levinsky, I., Flemming, S., Svenning, J. & Rahbek, C. 2007. Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity and Conservation* 16: 3803-3816.
- Lewis, G., Schire, B., Mackinder, B. & Lock, M. 2005. *Legumes of the World*. The Board a Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew, UK. 561p.
- Lira, R., Téllez-Valdés, O. & Dávila, P. 2009. The effects of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitacea. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 56:691-703.
- Locatelli, B., 2006. Vulnerabilidad de los bosques y sus servicios ambientales al cambio climático. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Grupo de Cambio Climático Global. 4pp.
- Lorente, I., Gamon, J., Gómez, L., Santos, R., Flores, L., Galindo, L. & Navarro, J. 2004. Los efectos biológicos del cambio climático. *Ecosistemas* 13(1): 103-110. España, IRRI 194. *Climate Change and rice International symposium abstracts*. International Rice Research Institute. Los Baños Philippines.
- Mas, J.F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. & Pérez, A., 2004. Assessing land use/cover changes:

A nationwide multivariate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5 (4): 249–261.

- Maass, J.M. 1999. Criterios ecológicos en el manejo sustentable de los suelos. En: Sibe, C., Rodarte, H., Toledo, G., Echevers, J., Oleschko C. (eds.), *Conservación y restauración de suelos*, pp: 337-360. PUMA/UNAM, México, México.
- Maass, M., Jardel, E., Martínez-Yrizar, A., Calderón, L., Herrera, J., Castillo, A., Euán-Ávila, J. & Equihua, M. 2010. Las áreas naturales protegidas y la investigación ecológica de largo plazo en México *Ecosistemas*. Asociación Española de Ecología Terrestre, Alicante, España. 19(2):69-83.
- Magaña Rueda, V., Graizbord, B., Buenfil Friedman, J., & Gómez Mendoza, L. 2009. Escenarios de cambio climático y tendencias en la zona del Golfo de México. In J. Buenfil (Ed.). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México* (Vol. 2, pp. 569-673). México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Magaña, V., Zermeño, D. & Neri, C. 2012. Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research* 51: 171-182.
- Malcom, J., Diamond, A., Markham, A., Mkanda, F.X. & Starfield., A. 1998. *Biodiversity: Species, Communities and Ecosystems*. En: United Nation Environmental Program. *Handbook on methods for climate change impact assessment and adoption strategies*. Ámsterdam. C. 13, pp. 13-1 -13-41.
- Margules, C.R. & Pressey, R.L. 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405(6783):243-53.

- Margules, C.R. & Sarkar, S. 2009. Planeación Sistemática de la conservación. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Martínez, J. & Fernández, A. 2004. comps., Cambio climático: una visión desde México, SEMARNAT; Instituto Nacional de Ecología, 525 p. \*Sección III: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación.
- Maslin, M. 2004. Ecological versus climatic thresholds. *Science* 306: 2197-2198.
- Max Planck Institute for Meteorology (MPIM). 2008. Archived from the original on 2011-05-14. Retrieved December.
- McVaugh, R. 1987. Flora Novo- Galiciana. A descriptive account for the vascular plants of western of Mexico. Volumes 5(Leguminosae). The University of Michigan Press. EUA. 786 pp.
- Melillo, J., Callaghan, T., Woodward, E., Salat, E. & Sinha S. 1993. Effects on Ecosystems. En IPCC. Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP. Cambridge University Press. pp 283-310.
- Méndez, M. & Magaña, V. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23: 1175–1188.
- Meynecke, J.-O. 2004: Effects of global climate change on geographic distributions of vertebrates in North Queensland. *Ecological Modelling* 174: 347-357.
- Midgley, G.F. & Thriller, W. 2007. Potential vulnerability of Namaqualand plant diversity to anthropogenic climate change. *Journal of Arid Environments* 70: 615-628.

- Midgley, G.F., Hannah, L., Millar, D., Rutherford, M.C. & Powrie, L.W. 2002. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. *Global Ecology and Biogeography* 11: 445-451.
- Mittermeier, R.A. & Mittermeier, C.G. 1992. La Importancia de la Diversidad Biológica de México. En: Sarukan, J. & Dirzo, R. (eds.). México ante los retos de la Biodiversidad. CONABIO, México.
- Orozco de Rosas, G, Noé Durán, N., González, G, Zarazúa, P., Ramírez, G. & Mena, S. 2014. Proyecciones de cambio climático y potencial productivo para *Salvia hispanica* L. en las zonas agrícolas de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* .Vol 5, 10:1831-1842.
- Ortega–Rubio A., Pinkus, M. I. & Espitia, I. 2015. Las Áreas Naturales Protegidas y la Investigación Científica en México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 3: 41-64.
- Pearson, R.G. 2006. Climate Change and the migration capacity of species. *Trends in Ecology and Evolution* 3: 111-113.
- Pérez-Pérez, E., Méndez, M., & Magaña, V. 2010. High Spatial Resolution Climate Change Scenarios for Mexico Based on Experiments Conducted with the Earth Simulator, en: *Visualizing Future Climate in Latin America. Results from the application of the Earth Simulator Latin America and Caribbean Region*. W. Vergara, Coordinator. Sustainable Development Working Paper 30p.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeler, R.H. & Stockwell, D. 2002. Futures projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626–628.

- Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Nakamura, M. & Martinez-Meyer, E. 2011. *Ecological Niches and Geographical Distributions*. Princeton University Press, New Jersey.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231–259.
- Polhill, R.M., Raven, P.H. & Stirton, C.H. 1981. Evolution and systematics of the Leguminosae. En: Polhill, R.M. & Raven, P.H. (eds.) *Advances in Legume Systematics Part 1*. Royal Botanical Gardens, Kew. U.K. 1: 1-26.
- Rockstrom, J., Falkenmark M., Karlberg L., Hoff H., Rost S. & Gerten D. 2009. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resour. Res.* 45, pp. 16.
- Rzedowski, J. 1991. El endemismo en la Flora Fanerogámica Mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*. 15:47- 64.
- Rzedowski, J. 1993. Diversity and origins of the phanerogamic Flora of Mexico. 129-146pp.
- Rzedowski, J. 1998. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. En: Ramamoorthy, T.P., Bye, R., Lo A. & Fa, J. *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución*. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 129-145pp.
- Sánchez-Cordero, V. & F. Figueroa. 2007. La efectividad de las reservas de la biosfera en México para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación, pp:161-171, en: *Hacia una cultura de conservación de la diversidad biológica* (Halfter, G. & S. Guevara, eds.) Sociedad Entomológica Aragonesa, Conabio, Conanp, Conacyt, Instituto

de Ecología, A. C., MAB-UNESCO, Ministerio de Medio Ambiente-Gobierno de España. Zaragoza, España.

- Sánchez-Cordero, V., F. Figueroa, P. Illoldi-Rangel & M. Linaje. 2007. Efectividad de una selección de áreas protegidas para conservar la vegetación primaria y evitar el incremento de las áreas transformadas. Pp. 53-56. In: CONABIO, CONANP, TNC, PRONATURA, FCF, UANL. Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad terrestres de México: espacios y especies. Comisión Nacional para la Conservación y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, TheNatureConservancy-Programa México, Probatara, A.C., Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, p. & Linaje, M. 2012. Identificación de áreas prioritarias para la conservación y su conectividad bajo diferentes escenarios de cambio climático: base para el diseño de áreas naturales protegidas. Informe final, recuperado de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/con\\_eco/2012\\_identific\\_areas\\_prioritarias\\_cc.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/con_eco/2012_identific_areas_prioritarias_cc.pdf).
- Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Escalante, T., Figueroa, F., Rodríguez, G., Linaje, M., & Sarkar, S. 2009. Deforestation and biodiversity conservation in Mexico. *Endangered species: new research*, 279-298.
- Slageren, W. 2003. The millennium seed bank: Building partnerships in arid regions for the conservation of wild species. *Journal of arid Environments*, 54(1):195-201.
- Soberón, J. & Nakamura, M. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *P Natl Acad Sci USA*. 106: 19644–19650
- Soberón, J. & Peterson AT. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1–10

- Soberón, J. 2010. Niche and area of distribution modelling: a population ecology perspective. *Ecography*, 33, 159-167.
- Soberón, J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecol. Lett.* 10:1115–23.
- Somers, D.A., Samac, D. & Olhoft, P. 2003. Recent Advances in Legume Transformation. *PlantPhysiology* 131(3): 892-899.
- Sousa S. M., Ricker, M. & Hernández, H. 2001. Tree species of family Leguminosae in Mexico. *Harvard Papers in Botany* 6: 339-365.
- Sousa S. M., Ricker, M. & Hernández, H. 2003. An index for the tree species of the Family Leguminosae in México. *Harvard Papers in Botany* 7:381-398.
- Sousa S.M. & Delgado-Salinas, A. 1998. Leguminosas mexicanas: fitogeografía, endemismo y orígenes. En: Ramamoorthy, T.P., Bye, R., Lo A. & Fa, J. *Diversidad Biológica de México. Orígenes y distribución.* Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México. 449- 500.
- Sousa, S.M. & Delgado-Salinas, A. 1993. Mexican Leguminosae: Phytogeography, endemism, and origins. Pages 459-512. In: Ramamoorthy, T.P., Bye, R., Lo A. & Fa, J. (eds.). *Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution.* Oxford University Press, New York. USA.
- Suárez-Mota, M. E. & J.L. Villaseñor, 2011. Las compuestas endémicas de Oaxaca, México: diversidad y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 88: 55-66.
- Téllez- Valdés, O., Dávila, P., Ayala, M., Gutiérrez, K. & Melchor, I. 2007. Case studies on the climate change on the flora of Mexico. *BotanicGardensConservation International (KewGardens U.K.)* 4: 17-21.

- Téllez-Valdés, O. & P. Dávila 2003. Protected areas and climate change: a case the study of the cacti Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Conservation Biology* 17: 846-859.
- Téllez-Valdés, O., Dávila, P. & Lira, R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the Cloud Forest in Eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation* 15: 1095-1107.
- Téllez-Valdés, O., R. Lira-Saade, D. Piñeiro D. (En preparación). La paradoja del país del maíz: El cambio climático en México y su cultivo en el futuro.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Ferreira de Siqueira, M., Graninger, V., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Miles, L., Ortega-Huerta, M.A., Pearson, A.T., Phillips, O.L. & Williams, S.E. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148.
  - <http://www.ipcc.ch/activity/ar4outline.htm>
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. & Araujo, M.B. (2009) BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32: 369–373.
- Toro, I., Silva, R. & Ellison, A. 2015. Predicted impacts of climatic change on ant functional diversity and distributions in eastern North American forests. *Diversity and Distributions* 21: 781–791.
- Ureta, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. & Álvarez-Buylla, E. 2015. Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology* (18) 3: 1073-1082.
- Villaseñor, J.L. 2003. Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México. *Interciencia* 28: 160-167.

- Villers, L. & Trejo, I. 1998. El impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* (23): 10-19.
- Vitousek P. M., et al. 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science* 324, 1519–1520.