



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAestrÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES EN MÉXICO, MEDIANTE EL MODELAJE DEL NICHU ECOLÓGICO.

Tesis

Que presenta:

Biol. Gerardo Andres Reyes Abrego

Como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias Biológicas en Ecología y Conservación

Director de Tesis:

Doctor en Ciencias Biológicas en Ecología y Conservación

Juan Manuel Ortega Rodríguez

Morelia, Michoacán

Marzo, 2014

U.M.S.N.H



**FACULTAD
DE
BIOLOGÍA**

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN GENERAL	XI
CAPÍTULO I	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. HIPÓTESIS	5
III. OBJETIVOS	5
<i>Objetivo general</i>	5
<i>Objetivos particulares</i>	5
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	6
DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES	6
Familia Meliaceae	6
<i>Cedrela dugesii</i> (S. F. Blake) S. Wats	6
<i>Cedrela odorata</i> L.	7
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
Fisiografía	9
MÉTODOS	11
Datos de localidades de presencia de las especies	11
Variables para la modelación	12
Algoritmos utilizados	13
Validación de los modelos	14
Mapas de consenso de los algoritmos.	15
Ajuste del área de distribución	16
Análisis de los modelos en su espacio ecológico	16
Prueba de sobreposición del nicho ecológico	17
V. RESULTADOS	18
<i>Ajuste de las localidades de presencia.</i>	18
<i>Ajuste con las regiones biogeográficas</i>	18
<i>Análisis de los modelos de nicho ecológico</i>	19
<i>Validación de los modelos</i>	22
<i>Índice de similitud de nicho</i>	22
<i>Modelos de cambio climático.</i>	23
VI. DISCUSIÓN	25
VII. CONCLUSIONES	28
CAPÍTULO II	29
I. INTRODUCCIÓN	30
II. HIPÓTESIS	33
III. OBJETIVOS	33
<i>Objetivo particular</i>	33
<i>Objetivos generales</i>	33
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	34
DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES	34
Familia Leguminosae (Subfamilia Mimosoideae)	34
<i>Albizia plurijuga</i> (Standl.) Britton & Rose	34
Familia Meliaceae	35

<i>Cedrela dugesii</i> (S. F. Blake) S. Wats. -----	35
<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth) Britten & Baker. -----	36
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO -----	37
Clima-----	40
Vegetación -----	41
MÉTODOS -----	43
1. <i>Datos de localidades de presencia de las especies.</i> -----	43
2. <i>La búsqueda de campo</i> -----	43
GARP-----	44
MaxEnt -----	44
<i>Validación de los modelos</i> -----	44
<i>Mapas de consenso de los algoritmos.</i> -----	45
<i>Ajuste del área de distribución</i> -----	45
<i>Análisis de los modelos en su espacio ecológico.</i> -----	45
<i>Modelos de consenso</i> -----	46
V. RESULTADOS -----	47
<i>Datos de localidades de presencia de las especies.</i> -----	47
<i>Análisis de distribución potencial con variables climáticas actuales</i> -----	48
<i>Validación de los modelos.</i> -----	50
<i>Observaciones del nicho ecológico</i> -----	51
Altimetría de los distintos modelos -----	51
Clima Altitud de la Cuenca de Cuitzeo (msnm)-----	51
Aspecto y pendiente-----	52
<i>Modelos de cambio climático</i> -----	53
VII. CONCLUSIONES -----	62
BIBLIOGRAFÍA CITADA -----	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. - <i>Cedrela dugesii</i> .-----	6
Figura 2. - <i>Cedrela odorata</i> .-----	7
Figura 3.- Mapa de entidades federativas de México (CONABIO 2012b).....	9
Figura 4.- Principales llanuras, relieves y depresiones de México (CONABIO 2012b).	10
Figura 5.- Área de consenso.	15
Figura 6.- Principales provincias biogeográficas para el género <i>Cedrela</i> en México.....	19
Figura 7.- Modelos de nicho ecológico realizados con distintos algoritmos.	21
Figura 8.- Mapas de cambio climático para las especies <i>C. dugesii</i> y <i>C. odorata</i> en México.	24
Figura 9.- <i>Albizia plurijuga</i> -----	34
Figura 10.- <i>Cedrela dugesii</i> -----	35
Figura 11.- <i>Ceiba aesculifolia</i> -----	36
Figura 12.- Ubicación geográfica de la Cuenca de Cuitzeo (INEGI 2013b)	39
Figura 13.- Clima en La Cuenca de Cuitzeo (CONABIO 2012b).	41
Figura 14.- Vegetación en la Cuenca de Cuitzeo. (INEGI 2013b).	42
Figura 15.- Registro de Puntos de presencia para las especies.	48
Figura 16.- Modelos de distribución potencia con variables actuales para la Cuenca de Cuitzeo.	49
Figura 17.- Representación de altitudes con diferentes modelos.	51
Figura 18.- Temperatura y precipitación de las especies dentro de la cuenca.	52

Figura 19.- Distribución de la orientación y pendiente.	53
Figura 20.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para <i>Ceiba aesculifolia</i>	55
Figura 21.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para <i>Albizia plurijuga</i>	56
Figura 22.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para <i>Cedrela dugesii</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Localidades de especies registradas en los herbarios.	18
Tabla 2.- Validación de la curva ROC Parcial para ambos algoritmos.	22
Tabla 3.- Validación de la χ^2 para los modelos de consenso.	22
Tabla 4.- Índices de similitud de nicho.	23
Tabla 5.- Temperatura y precipitación de los distintos escenarios climáticos.	23
Tabla 6.- Análisis de área de consenso de los distintos escenarios climáticos	24
Tabla 7.- Municipios que conforman la Cuenca de Cuitzeo.	38
Tabla 8.- Aspectos climáticos más importantes de la Cuenca de Cuitzeo (Ortega-Rodríguez 2003).	40
Tabla 9.- Especies registradas en los diferentes herbarios.	47
Tabla 10.- Validación de la curva ROC Parcial para ambos algoritmos.	50
Tabla 11.- Validación de la χ^2 para los modelos de consenso.	50

DEDICATORIA

Mi tesis lo dedico enormemente con todo mi amor y cariño a:

Dios que me diste la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

A mi padre, que me da la inspiración para seguir estudiando, es un ejemplo de vida y aunque pasamos momentos difíciles, siempre estarás en mi corazón, pensamiento y te llevare siempre a mi lado.

A mi madre, por siempre creer siempre en mí, por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en momentos difíciles. Por darme valores, principios, carácter, perseverancia y ayudarme económicamente en toda mi carrera.

A mis hermanos(as) por estar presentes en toda mi vida y compartir muchos momentos felices conmigo.

A mi novia que por su comprensión, apoyo, cariño y esfuerzo por que preferiste sacrificar tu tiempo para que yo pudiese salir adelante.

A mis amigos y compañeros de laboratorio por ser personas importantes en mi vida y brindarme su apoyo cuando lo necesitaba. Por darme esos días de alegrías cuando me encontraba estresado.

A mi asesor por aceptarme en su equipo de trabajo para la realización de esta investigación.

El pesimista ve el vaso medio vacío...
El optimista ve el vaso medio lleno...
El emprendedor va por otro vaso.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar estas palabras para expresar todo mi agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron posible que el trabajo de investigación pudiera ser una realidad. Puedo iniciar agradeciendo al Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez, director de esta investigación, porque a partir de una idea se generó un gran trabajo de investigación a través de su orientación, el seguimiento y la supervisión durante más de dos años.

También agradezco a mis sinodales M.C. Patricia Silva Sáenz, Dra. Yvonne Herrerías Diego, Dr. Juan Carlos Montero Castro y Dr. José Arnulfo Blanco García por compartir su conocimiento en su área y por sus aportes para que este trabajo haya quedado excelente.

Mi gratitud también es para aquellas personas que aportaron a mi trabajo como Francisco Javier Balvino Olvera, Miguel Díaz Moreno y Enrique Buelvas Ampudia por ayudarme a coleccionar en el cerro del Quinceo, a María Cristina Zamora Vuelvas por coleccionar en el Cerro del Águila, al Dr. José Arnulfo García Blanco en el Lago de Cuitzeo.

También quiero agradecer al equipo de trabajo del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota por su apoyo moral y compañía a las salidas de campo, especialmente a Biol. María Isabel Villicaña Escobedo, Biol. Marisol Jiménez Campos y M.C. Lucero Elizabeth Pimienta Ramírez y por su apoyo a Ing. Leticia Reyes Avalos y M.C. Mario Manuel Suárez Suárez.

Agradezco sinceramente a Lucero Elizabeth Pimienta Ramírez por hacer el esfuerzo y sacrificio de apoyarme, darme consejos para no darme por vencido y por estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas. Por todo lo bueno y hermoso que representas para mí, te agradezco por tratar de hacerme ser una gran persona.

Un agradecimiento especial y enorme a mi Madre y mi hermano(as) que han estado toda mi vida apoyando en todas las decisiones buenas y malas. También agradezco a mi ángel que me ha estado cuidando desde que se fue y que está conmigo a cada paso que doy sintiéndolo en cada latido que tengo, este esfuerzo siempre fue para ti.

También agradezco a CONACYT por la beca otorgada ya que sin ella no hubiese sido posible realizar este aporte a la investigación.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

Los bosques tropicales son los ecosistemas más importantes, antiguos, complejos y diversos del mundo. Muchas de las especies en este bosque tienen interés comercial y su uso indiscriminado ha sido motivo de que muchas especies se encuentren en algún nivel de protección. La pérdida de estos bosques han causado alteraciones en los ecosistemas y variaciones del CO₂ atmosférico, afectando los patrones climáticos, contribuyendo al calentamiento global (Dick y Wrigth 2005, Wright 2010). Ante la preocupación del cambio climático, investigadores han realizado modelos predictivos de lo que podría ocurrir en los ecosistemas en las siguientes décadas, creando distintos escenarios con diferentes emisiones de CO₂ (IPCC 2007). Los escenarios A (catastróficos) están diseñados en base al consumo desmedido de combustible fósil y los escenarios B (moderados) están diseñados bajo un consumo racional de combustible y con la generación paulatina de tecnologías limpias y amigables al ambiente (IPCC 2001). Recientemente, se han desarrollado metodologías que pueden estimar la distribución potencial de especies basados en la teoría del nicho ecológico. Estas metodologías requieren únicamente datos de presencia, variables ambientales y un algoritmo que relacione ambas variables. El resultado es un mapa de idoneidad donde muestra el área del nicho fundamental en el que la especie puede sobrevivir excluyendo los factores bióticos (Soberón y Peterson 2005, Franklin 2013). Este trabajo consta de dos investigaciones para lo cual el primer capítulo trata de observar si las especies *Cedrela dugesii* y *C. odorata* se distribuyen de manera desigual en el territorio mexicano, indicando que tienen nichos climáticos diferentes demostrando que son dos especies distintas. El segundo capítulo, se trata de conocer la distribución de *C. dugesii*, *Albizia plurijuga* y *Ceiba aesculifolia* y observar sus requerimientos ecológicos dentro de la Cuenca de Cuitzeo. Para ambos capítulos se observó el posible efecto que podría tener el cambio climático con dos escenarios climáticos contrastantes. Para predecir la distribución potencial de las especies arbóreas tropicales, se utilizaron las localidades de presencia obtenida de diferentes herbarios, literatura científica y registros en campo (esta última fue solamente para la Cuenca), los cuales se fueron depurados. También se utilizaron variables climáticas actuales (WorldClim 2005) y dos escenarios de cambio climático contrastantes para las décadas 2030 y 2060 (CCCma 2013). Adicionalmente, se incluyeron las variables altitud, orientación de ladera y pendiente. Los algoritmos usados fueron MaxEnt y GARP,

el resultado de cada algoritmo se unió en un mapa de consenso. La validación de los modelos se realizó para cada algoritmo con el método de la curva ROC parcial (Peterson *et al.* 2008) y para el modelo de consenso se realizó una χ^2 (Peterson y Robins 2003). Para conocer si existe similitud de distribución del nicho se usó el programa ENMTools (Warren *et al.* 2008). Los resultados del primer capítulo, mostraron que *C. dugesii* se distribuye en el centro del país, mientras que *C. odorata* se distribuye en su mayoría en la vertiente del Golfo de México y en menor medida en la vertiente del Pacífico. Los índices D e I indicaron que ambas especies se distribuyen de manera distinta indicando ser dos especies distintas. Los escenarios del cambio climático afectaron más a *C. dugesii* al no presentarse en los catastróficos y perdiendo más del 75% en los moderados. Sin embargo, *C. odorata* para ambos escenarios aumenta su distribución en la vertiente del Pacífico y la disminuye en el Golfo de México. En el capítulo dos se observó que de las tres especies, *C. aesculifolia* presentó una distribución geográfica y ecológica más restringida y el nicho climático desaparecerá en ambos escenarios bajo cambio climático. El escenario catastrófico presentó que el nicho climático de las tres especies en la cuenca desaparecerá. El escenario moderado reducirá de un 95 a 99% a *C. dugesii* y *A. plurijuga* un 99% de su área, en comparación con el nicho climático actual.

Palabras clave: Cambio climático, GARP, MaxEnt, Modelo de nicho ecológico, Modelos de consenso.

ABSTRACT

Tropical rain forest are the most important, ancient, complex and diverse ecosystems in the world. Many of the species in the rain forest have commercial interest and their indiscriminate use has been motive to place many species under a certain level of protection. The loss of these forest has caused alterations in the ecosystems and variation of the atmospheric CO₂ levels, effecting weather climates and contributing to global warming (Dick and Wright 2005, Wright 2010). Due to the concern of climate change, investigators have created models that predict what could happen in the ecosystems within the upcoming decades, creating different scenarios with different CO₂ emissions (IPCC 2007). Scenario A (catastrophic) are designed based on the excessive consumption of fossil fuels, scenario B (moderate) are designed based a rational consumption of fuel and gradual generation of clean and environmentally friendly technologies (IPCC2001). Recently, methodologies have been developed that can estimate the potential distribution of species based on the ecologic niche theory. These methodologies only require presence of data, variable environments and an algorithm that relates both variables. The result is a map which shows the area of niche that is fundamentally suitable for the species to survive, excluding the biotic factors (Soberon and Peterson 2005, Franklin 2013). This work consist of two investigations for which the first chapter intents to observe if the species *Cedrela dugesii* and *C. odorata* distribute in an unequal manner in the Mexican territory, indicating that they have different climatic niches being that they are two different species. The second chapter talks about understanding the distribution of the *C. dugesii*, *Albizia plurijuga* and *Ceiba aesculifolia* and observe their different ecological requirements within the Basin of Cuitzeo. Both chapters observed the possible effect that the climatic change could have under both contrasting climate scenarios. To predict the potential distribution of tropical trees, location of obtained herbal presence were used, scientific literature and on camp registries (the last one was only for the basin), which were released. Actual climate variables were also used (WorldClim 2005) and two contrasting climate scenarios for the decades 2030 and 2060 (CCCma 2013). Additionally, the altitude variables were also included, the slope and pending slope orientation. The algorithms used were MaxEnt and GARP, the result of each algorithm united in a consensus map. The validation of the models was obtained for each algorithm with the partial ROC curve method (Peterson *et*

al. 2008), for the consensus model an χ^2 was obtained (Peterson and Robins 2003). To know if a similitude of distribution in the niche exist the program of ENMTools was used (Warren et al. 2008). The results of the first chapter demonstrated that *C. dugesii* distributed in the center of the country while *C. odorata* mostly in the Gulf of Mexico slope and in a lower level the the Pacific Ocean slope. The indexes D and I indicated that both species distributed in a different manner indicating that they are two different species. The climate change scenarios affected *C. dugesii* greater by not appearing in the catastrophic scenarios and losing more than 75% in the moderate ones. However, *C. odorata* increases its distribution for both scenarios in the Pacific slope and decreases in the Gulf of Mexico. In the second chapter it was observed that from the three species, *C. aesculifolia* demonstrated a more restricted geographic and ecological distribution and within the climatic niche will disappear with both climate change scenarios. The catastrophic scenario demonstrated that the climatic niche of the three species in the basin will dissappear. In the moderate scenario, *C. dugesii* will reduce by a 95-99% and *A. plurijuga* by 99% from its area in comparison with the current climatic niche.

Key word: Climate Change, Consensus model, Ecological niche model, GARP, MaxEnt

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques tropicales son los ecosistemas más complejos y diversos del mundo. Dentro de estos bosques se observan muchas especies con importancia comercial, artesanal, medicinal, forrajera, etc. Su explotación indiscriminada ha causado alteraciones en los ecosistemas y alteraciones del CO₂ atmosférico, afectando los patrones climáticos. Se menciona que si los bosques tropicales del mundo son conservados absorberían un 15% del CO₂ atmosférico. Por el contrario, si estos bosques son deforestados haciendo cambio de uso del suelo podrían contribuir de un 15-20% del CO₂ atmosférico aumentando la temperatura de un 0.8 a 1 °C, contribuyendo al calentamiento global (Murphy y Lugo 1986, Meli 2003, Pacheco *et al.* 2010, Wright 2010, Reed *et al.* 2011, Cuevas-Reyes y Vega-Gutiérrez 2012). Ante tal problema, muchos investigadores de todo el mundo han tratado de predecir hipotéticamente los cambios climáticos que pudiesen ocurrir en las siguientes décadas y así observar cómo podría afectar a los distintos ecosistemas (QiJin y GuangSheng 2011, Reed *et al.* 2011, Hsu *et al.* 2012, Luna-Vega *et al.* 2012). Los modelos hipotéticos se basan principalmente en la economía mundial, el crecimiento poblacional y la velocidad de sustitución de tecnologías que emiten CO₂, por tecnologías ecológicamente amigables, con lo cual se han generado distintos escenarios (IPCC 2001, 2007, Sáenz-Romero *et al.* 2009, IPCC 2013). El uso de los modelos predictivos puede darnos una visión aproximada de lo que pudiese ocurrir con muchas especies. Se ha especulado que las especies pueden responder ante el cambio climático de distinta manera, algunas adaptándose, otras migrando a nuevas áreas y, en casos extremos, siendo extirpadas del medio en el que actualmente se encuentran (Peterson *et al.* 2001, FAO 2008, Fitzpatrick *et al.* 2008, Wright 2010). Para observar estos efectos se han usado metodologías basadas en la teoría de nicho ecológico. Estos modelos son realizados mediante localidades de presencia de las especies y variables ambientales, los cuales son procesados con algoritmos derivados de inteligencia artificial, tales como los algoritmos genéticos, máxima entropía y redes neuronales, entre otros. El resultado de estos algoritmos es un mapa de idoneidad, el cual indica las áreas aptas donde pueden encontrarse las especies de estudio sin las intervenciones bióticas (Soberón y Peterson 2004, Martínez-Meyer 2005, Soberón y Peterson 2005, Peterson *et al.* 2007, Ortega-Huerta y Peterson 2008, Franklin 2013). Varios estudios han usado estos modelos para conocer la distribución en el pasado, presente y bajo distintos escenarios en el futuro en plantas, mamíferos, anfibios, aves y reptiles (Peterson *et al.* 2001, Peterson *et al.* 2002, Ortega-Rodríguez 2003, Peterson 2003, Illoldi-Rangel *et al.* 2004, Chefaoui *et al.* 2005, Papes y Gaubert 2007, Pearson *et al.* 2007, Fitzpatrick *et al.* 2008, QiJin y GuangSheng 2011, Hsu *et al.* 2012, Luna-Vega *et al.* 2012, Rojas-Soto *et al.* 2012, Banks *et al.* 2013).

Capítulo I

COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE *Cedrela dugesii* Y *Cedrela odorata* (MELIACEAE) Y EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO.

I. INTRODUCCIÓN

La familia *Meliaceae* comprende especies arbóreas tropicales que son características de los bosques tropicales lluviosos, con pocos representantes de los bosques tropicales secos, manglares y zonas templadas (Cintrón 1990, Gómez-Díaz *et al.* 2007, Muellner *et al.* 2009, Muellner *et al.* 2010, Cavers *et al.* 2013). La familia comprende 50 géneros, algunos exclusivos del viejo mundo, como *Toona* y otros restringidos al nuevo mundo como *Cedrela*, el cual contiene nueve especies que se distribuyen desde México hasta Argentina (Calderón y Germán 1993, Pennington y Sarukhán 2005, Muellner *et al.* 2010, CONABIO 2012a, Cavers *et al.* 2013). La madera de la familia *Meliaceae* es considerada de las más preciosas y son de alto valor económico en varias partes del mundo, principalmente de Estados Unidos, Canadá y Europa. Ejemplos de estos árboles son la Caoba (*Swietenia*) y el Cedro Rojo (*Cedrela odorata*), los cuales son árboles cuyo hábitat han sufrido gran deterioro, además de una sobreexplotación comercial (Muellner *et al.* 2009, Muellner *et al.* 2010, CONABIO 2012a, Cavers *et al.* 2013).

La familia *Meliaceae* incluye 214 especies que están incluidos en la IUCN, de los cuales 3 pertenecen al género *Cedrela*: *C. fissis* y *C. lilloi* (en peligro) y *C. odorata* (vulnerable) (IUCN 2012). En México, la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) contempla únicamente a *C. odorata* como sinonimia con *C. dugesii*, ubicándola en la categoría como protegida. Es importante señalar que en algunas fuentes de información sobre la biodiversidad, *C. odorata* y *C. dugesii* son tratadas como una misma especie (SEMARNAT 2010, CONABIO 2012a). Sin embargo, en la actualidad existen evidencias taxonómicas, genéticas y biogeográficas que indican que son especies distintas (Cintrón 1990, Calderón y Germán 1993, Muellner *et al.* 2009, Muellner *et al.* 2010, Cavers *et al.* 2013).

Muellner *et al.* (2009, 2010) realizaron un trabajo genético, en el cual *C. dugesii* se encuentra más emparentada genéticamente con *C. salvadorensis*, *C. oaxaquensis* y *C. tonduzii*, mientras que *C. odorata* se encuentra más cercanamente genéticamente con *C. saltensis*, *C. balansae*, *C. fissilis* y *C. weberbaueri*. Se observa también que existe una distancia de similitud genética entre ambas especies en el mismo clado. Cavers *et al.* (2013) mencionan que la colonización del género *Cedrela* en América fue del sur hacia el norte.

Citrón (1990), menciona que *C. odorata* es una especie cuyas poblaciones son muy variantes, sugiriendo la presencia de poblaciones con adaptaciones ecológicas muy locales, incluso sugiere la formación de híbridos. Otros autores como Muellner *et al.* (2010), Cavers *et al.* (2013) y Calderón y Germán (1993) separan taxonómicamente a estas dos especies en base a la forma de los foliolos, su ápice, corteza, tronco, color de las flores, tamaño del árbol, altitudes sobre el nivel del mar y afinidades ecológicas. También, observan que su distribución geográfica es distinta, donde *C. dugesii* la localiza únicamente en Guanajuato, Michoacán y Querétaro, mientras que a *C. odorata*, la ubican al igual que Pennington y Sarukhán (2005), en una área más grande que abarca casi toda la parte costera de México, en áreas donde se encuentra el bosque tropical caducifolio, subcaducifolio y perennifolio desde Sonora, Sinaloa, Durango, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Puebla, Oaxaca, Tabasco, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

En la actualidad se han desarrollado diversas metodologías fundamentadas en la teoría ecológica y en los avances informáticos referentes al cómputo de alto rendimiento. Estas herramientas permiten estudiar la distribución de las especies, incluso con la posibilidad de generar escenarios con condiciones distintas, que permiten visualizar el comportamiento posible de las especies ante estas situaciones. El concepto ecológico clave en este tipo de metodologías es el de nicho ecológico fundamental, el cual consiste en factores ambientales que determinan la distribución de una especie (Peterson *et al.* 2001, Martínez-Meyer 2005, Soberón y Peterson 2005, Soberón 2007, Bolívar-Cimé 2009, Warren 2012).

Para la realización de muchos de estos modelos se requieren como insumos básicos únicamente localidades de presencia geo-referenciadas de las especies a estudiar y variables ambientales (climáticas, topográficas, edáficas, etc.) expresadas en forma de capas de información digital que se pueden manipular a través de un sistema de información geográfica (SIG) (Peterson *et al.* 1999b, Peterson *et al.* 2002, Peterson 2003, Soberón 2007, Pliscoff y Fuentes-Castillo 2011, Warren 2012). Dentro de las variables ambientales existen aquellas que no cambian a corto plazo (topografía, edafología, etc.) y aquellas que varían en un lapso de tiempo más corto (climáticas). Varios investigadores han recreado el clima en distintos tiempo (pasado, presente y futuro) a través de interpolaciones climáticas, con lo

cual se puede llegar a modelar la distribución de las especies en distintos periodos del tiempo (Hijmans *et al.* 2005, Martínez-Meyer 2005, Sáenz-Romero *et al.* 2010).

Muchos investigadores de todo el mundo se han preocupado por medir el cambio climático global y el efecto que tiene sobre muchas especies con fines de conservación (QiJin y GuangSheng 2011, Reed *et al.* 2011, Hsu *et al.* 2012, Luna-Vega *et al.* 2012, Cavers *et al.* 2013, Franklin 2013). En la actualidad, la temperatura se ha incrementado de 0.8 a 1.0°C, con respecto a registros de hace 50 años (Sáenz-Romero *et al.* 2009). Esto se puede deber a la deforestación, uso de combustibles fósiles, crecimiento poblacional, cambio de uso de suelo e industrialización, que han ocasionado cambios en la concentración de CO₂ atmosférico (Martínez-Meyer 2005, IPCC 2007, Sáenz-Romero *et al.* 2009, Wright 2010, IPCC 2013). Los modelos hipotéticos realizados sobre el cambio climático global, se basan principalmente en cuatro factores: 1) el crecimiento de las economías de los países más importantes, 2) crecimiento poblacional mundial, 3) velocidad de cambio tecnológico para sustituir los combustibles fósiles por otra fuente de energía, 4) uso de energías ecológicamente amigables (IPCC 2001, 2007, Sáenz-Romero *et al.* 2009, IPCC 2013). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), es el encargado de evaluar los diferentes modelos, creando así en su segundo informe los escenarios A que siguen una tendencia igual a la actual y los escenarios B que presuponen una disminución importante en las concentraciones de gases de efecto invernadero, tasa de natalidad baja y un cambio tecnológico menos dañino al ambiente (IPCC 2007, Sáenz-Romero *et al.* 2009, IPCC 2013). Bajo estos escenarios, las especies pueden responder de tres maneras: pueden migrar, adaptarse, o extirparse del medio (Peterson *et al.* 2001). El uso de modelos predictivos puede darnos una visión aproximada de lo que pudiese ocurrir en un futuro con muchas especies, dando un soporte a la toma de decisiones en lo referente a su conservación y manejo.

II. HIPÓTESIS

- 1.- Si las especies *Cedrela dugesii* y *C. odorata* son taxonómicamente diferentes, entonces sus modelos de distribución potencial serán distintos.
- 2.- El efecto del cambio climático en los distintos escenarios con diferentes emisiones de CO2 modificara la distribución de las especies con respecto a la distribución actual.

III. OBJETIVOS

Objetivo general

- 1.- Analizar la distribución actual de *Cedrela dugesii* y *C. odorata* en el territorio mexicano.
- 2.- Modelar la distribución potencial mediante el modelaje de nicho ecológico bajo escenarios climáticos contrastantes.

Objetivos particulares

- Generar una base de datos geo-referenciados de presencia de ambas especies mediante una revisión de herbarios y literatura científica, así como de la observación de campo.
- Seleccionar las variables topográficas y climáticas con resolución de 1 km²: con un escenario actual y dos escenarios de cambio climático contrastantes, con diferentes emisiones de gases de efecto invernadero.
- Aplicar el modelaje de nicho ecológico (MNE) para los diferentes escenarios climáticos.
- Realizar un análisis comparativo de la distribución de las especies respecto a los MNE.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES

Familia Meliaceae

Cedrela dugesii (S. F. Blake) S. Wats

Sinonimia.- *C. ciliolata* S. F. Blake (Calderón y Germán 1993); *C. odorata* L. (SEMARNAT 2010).

Nombres comunes.- Cuatal, cuaterani, cueteramba (lengua Purépecha [Michoacán]), nogal, nogal corriente, nogalillo, nogalillo cimarrón.

Descripción morfológica.- Árbol de 10-15 m de alto, de tronco tortuoso hasta 60 cm de diámetro lisa en la juventud y fisurada en forma de placas rectangulares en la madurez, de color grisáceo y con algunas porciones de la planta con ligero olor a ajo (Fig. 1). Hojas paripinadas de (10) 20 a 35 (55) cm



Figura 1. - *Cedrela dugesii*.
Fotografía: Gerardo A. Reyes
Abrego

de largo con peciólulos opuestos a sub-opuestos, de 1 a 3 cm de largo, 3 a 5 (7) pares, con foliolos blanco-ciliados en el margen, envés más o menos pubescentes sobre todo en las nervaduras. Ápice por lo común largamente acuminado y falcado. Flores aromáticas sobre pedicelos de 1 a 1.5 mm de largo con cáliz acopado pubescente. Las flores masculinas presentan 5 estambres inclusos con filamentos de 1.5 a 2 mm de largo, con anteras oblongas de 1 mm aprox. de largo y las flores femeninas tienen ovario globoso. Cápsulas colgantes de color café-rojizo, con lenticelas blancas, con semillas elípticas de alrededor de 2 cm de largo y 5 mm de ancho, con el ala ocupado a la mitad de la superficie (Calderón y Germán 1993).

Ecología y distribución.- Habita particularmente en suelos someros y afloramientos rocosos, en la actualidad poco frecuente en los bosques tropicales caducifolios del bajío y existe cierta abundancia en los malpaíses. Florece en mayo a junio, el fruto se ha colectado de abril a noviembre. Permanece sin follaje en época de secas. Se localiza algo dispersas en localidades de Guanajuato, norte de Michoacán como en el cerro del Punhuato, Tócuaro y

Uruapan y alrededores de Querétaro y San Juan del Rio. Se le puede encontrar a una altitud de (1500) 1850-2400 msnm (Calderón y Germán 1993).

En la NOM-050-SEMARNAT-2010 la especie se encuentra **Sujeta a Protección Especial. (Pr)**, debido a que se encuentra como sinonimia con *Cedrela odorata* (SEMARNAT 2010).

***Cedrela odorata* L.**

Sinonimia.- *C. adenophylla* Mart; *C. brachystachya* (DC) DC.; *C. ciliolata* S. F. Blake; *C. cubensis* Bisse.; *C. dugesii* S. Watson; *C. glaziovii* DC.; *C. guianensis* A. Juss.; *C. hassleri* (DC.) D.C.; *C. longipes* S.F. Blake.; *C. longipetiolulata* Harms; *C. mexicana* M. Roem.; *C. mexicana* var. *puberula* DC.; *C. mourae* DC.; *C. occidentalis* DC. y Rose; *C. odorata* var. *xerogeiton* Rizzini y Heringer; *C. palustris* Handro; *C. paraguariensis* Mart.; *C. paraguariensis* var. *brachystachya* DC.; *C. paraguariensis* var. *hassleri* DC.; *C. paraguariensis* var. *multijuga* DC.; *C. rotunda* S. F. Blake; *C. sintenisii* DC.; *C. velloziana* M. Roem ; *C. whitfordii* S.F. Blake; *C. yucatanana* S.F. Blake; *Surenus brownii* (Loefling ex Kuntze)



Figura 2 .- *Cedrela odorata*.

Fotografía: tomada de la Web

Kuntze; *S glaziovii* (DC.) Kuntze; *S. guianensis* (A. Juss.) Kuntze; *S. mexicana* (M. Roem.) Kuntze; *S. velloziana* (M. Roem.) Kuntze (Calderón y Germán 1993, Germán-Ramirez 2005, SEMARNAT 2010, CONABIO 2012a, CONAFOR 2013) (Fig. 2).

Nombres comunes.- Icte, culché, kulché, kul-che, chujté, mo-ni, pucsnun-qui-ui (lengua mixe [Oaxaca]) Cedro, Cedro Rojo, Cedro Mexicano, Cedro Colorado, Cedro Oloroso.

Descripción morfológica.- Árbol de 35-40 m de alto, de tronco recto de 1.7 m de diámetro a veces fisurado ligeramente de color grisáceo a café-rojizo y con algunas partes de la planta con intenso olor a ajo. Hojas comúnmente paripinadas de (15)20 a 40 (55) cm de largo con peciólulos opuestos o alternos, de 1 a cm de largo con foliolos gabros o casi gabros. Ápice obtuso o agudo, a veces acuminado. Flores blanco verdosas sobre pedicelos de 1-2 cm de largo con cáliz acopado, glabro o casi en la flor. Flores masculinas con 5

estambres, incluso, filamentos de alrededor de 1 mm de largo, un poco más cortos que el estilo, con anteras oblongas de 1 a 1.5 mm de largo y las flores femeninas tienen ovario globoso. Cápsulas colgantes de color de color café-grisáceo, con lenticelas blancas, con semillas elípticas de 2 a 3.5 cm de largo y alrededor de 0.7 cm de ancho con una ala grande ocupando la mayor parte de la superficie de 6 mm largo a 4 mm de ancho (Cintrón 1990, Calderón y Germán 1993, Pennington y Sarukhán 2005).

Ecología y distribución.- Esta planta es poco colectada, posiblemente por su altura para la recolección. Prospera en vegetación secundaria y a menudo es protegida por el hombre. Es una planta demandante de luz, son resistentes a la sequía al daño por termitas y al fuego. Es tolerante a suelos ácidos, arcillosos, someros y compactados. Es moderadamente resistente a las heladas, las plántulas mueren a los 5 °C. Esta especie se distribuye en climas calientes de América intertropical; en México como Sonora, Sinaloa, Tamaulipas, Durango, S.L.P. Querétaro, Hidalgo, Nayarit, Colima, Michoacán, Puebla, Oaxaca, Tabasco, Chiapas, Campeche, Yucatán, Quintana Roo. Se le ha observado en la parte más baja de los bosques mesófilos de montaña, bosque de pino y de pino-encino, en la vegetación secundaria del bosque tropical caducifolio, perennifolio, sub-caducifolio y sub-perennifolio y en la parte palmar de la sabana secundaria. Se le encuentra a una altitud de 400-1200 msnm. Florece de mayo a agosto, perdiendo las hojas en la temporada seca (Cintrón 1990, Calderón y Germán 1993, Pennington y Sarukhán 2005, CONABIO 2012a).

En la NOM-050-SEMARNAT-2010 la especie se encuentra **Sujeta a Protección Especial. (Pr)** (SEMARNAT 2010).

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La República Mexicana se localiza entre los paralelos 32°32' y 14°32' de latitud norte, limitando con Estados Unidos de América entre los meridianos 117°17' y 86° 49' de longitud oeste. Limitando al sureste con Guatemala y Belice, al oriente con el Golfo de México y el mar Caribe y al poniente con el océano Pacífico (Fig. 3). Ocupa el décimo cuarto lugar a nivel mundial de extensión, con una superficie de 1,959,248 km² en el continente y 5127 km² en las 1166 islas que le pertenecen. El territorio nacional cuenta con 31 estados y un distrito federal, presentando 13,473 municipios y 422,520 localidades registradas (INEGI 2013a).

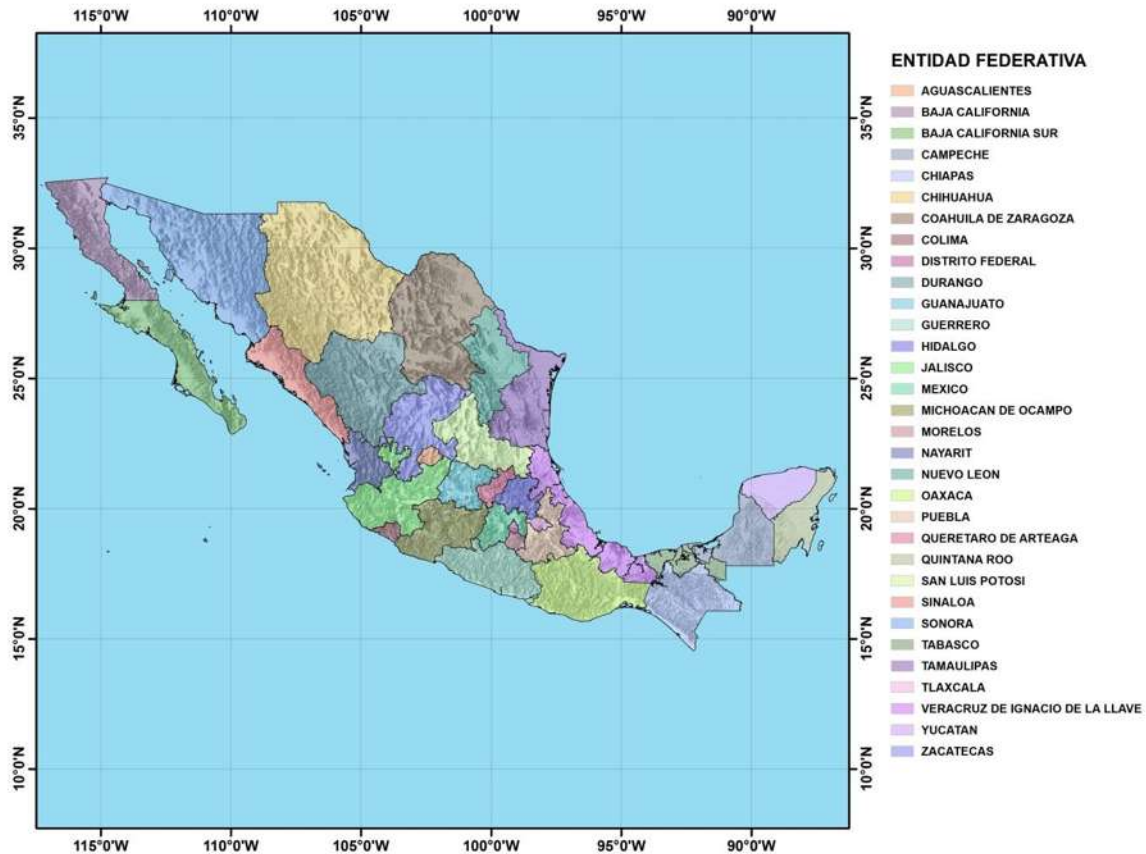


Figura 3 .- Mapa de entidades federativas de México (CONABIO 2012b).

Fisiografía.

El territorio mexicano se encuentra entre las más accidentadas de la tierra, ya que son pocos los lugares en los que no se puede ver en el horizonte montañas, como en el estado de Yucatán. México presenta elevaciones que va desde el nivel del mar hasta los 5,469 msnm en el Pico de Orizaba, en Puebla. Menos del 35% del país tiene una altitud menor de 500 m y más de la mitad se encuentra en altitudes mayores de 1000 msnm. La mayor parte del territorio mexicano está situada al sur del paralelo 30°, es decir se empieza a estrechar en el norte de América en el paralelo 20°. El paralelo 20° marca cambios en los principales accidentes del relieve del país donde el relieve es más notorio de oeste a este del país (Rzedowski 2006, INEGI 2013a). En México existen diferentes relieves, clasificados como sierras, llanuras y depresiones . Los cuales se muestran en la figura 4.

MAPA FISIOGRÁFICO DE LA REPÚBLICA MEXICANA

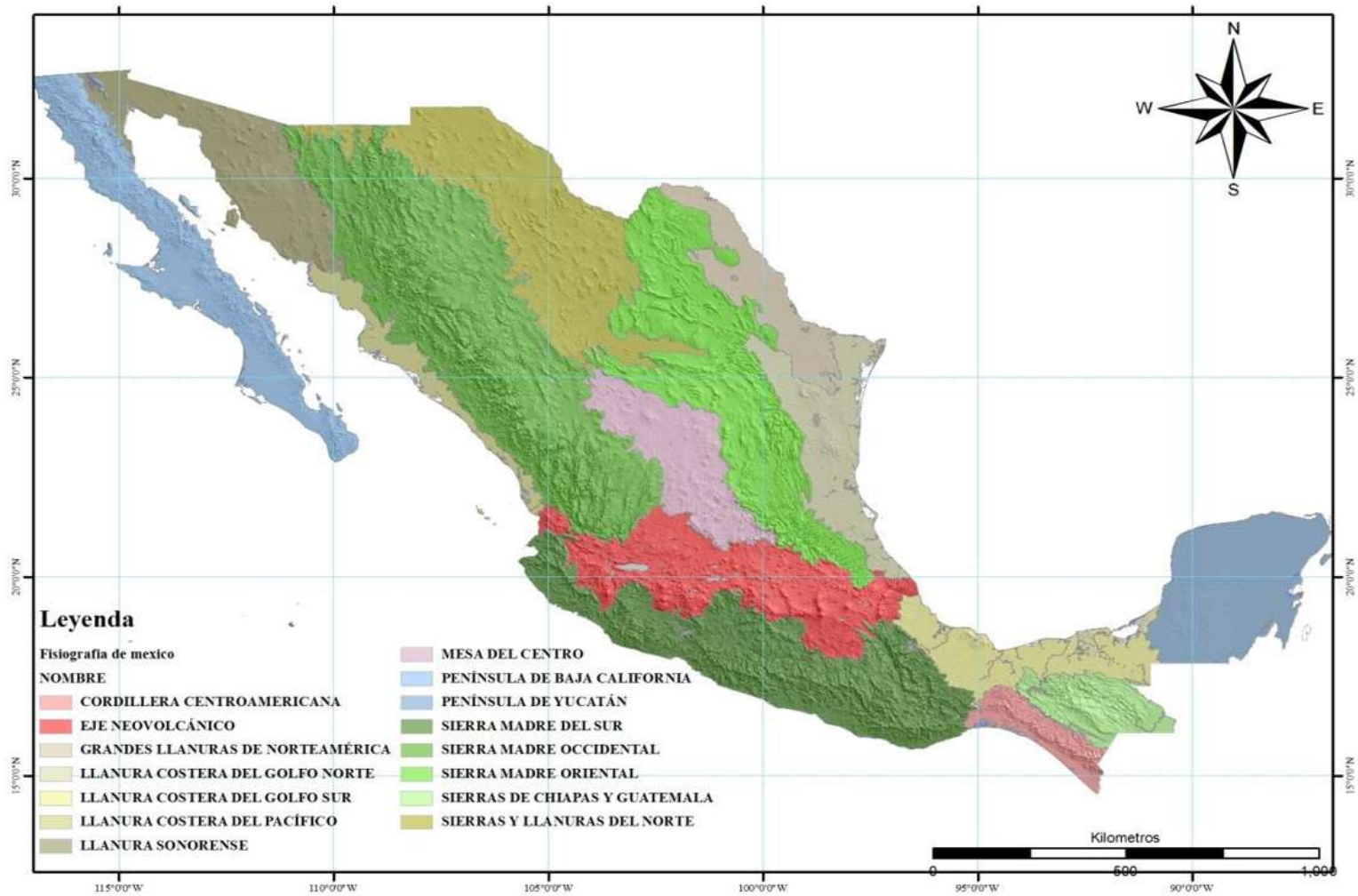


Figura 4.- Principales llanuras, relieves y depresiones de México (CONABIO 2012b).

MÉTODOS

Datos de localidades de presencia de las especies.

Los datos de presencia se tomaron de tres diferentes fuentes:

1. **Revisión de herbarios.-** A partir de los ejemplares revisados se hizo la geo-referenciación de las localidades en los herbarios de EBUM (Facultad de biología de la U.M.S.N.H.) y de IEB (Herbario del Instituto de Ecología A. C.).
2. **Datos en línea.-** Se consultaron los datos de presencia en la Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y en la Red Mundial de la Información sobre la Diversidad (REMIB 2008), para obtener registros geo-referenciados, los cuales serán comparados con los datos de herbarios, a fin de evitar la duplicidad. Para los datos que presenten localidad y no su posición geográfica, se referenciaron con el programa GEOLocate V.3.22, desarrollado por el Museo de Historia Natural de la Universidad de Tulane.
3. **Base de datos bibliográficos.-** A partir de inventarios de datos florísticos tomados de Calderón y Germán (1993) y Pennington y Sarukhán (2005).

De los tres tipos de fuentes, se depuraron los datos con el fin de evitar varios problemas, considerando los siguientes aspectos:

1. **Duplicidad.-** Fue realizada para evitar la duplicidad de los datos y la autocorrección espacial (cercanía de los lugares), esta última se seleccionó una distancia entre puntos de 1 km², equivalente a la resolución de los mapas temáticos usados.
2. **Altitud.-** Se sobrepusieron los puntos de las localidades en un modelo digital de elevación, con la finalidad de eliminar aquellas localidades fuera de los intervalos normales altitudinales conocidos para las especies. Esto permite tener modelos más adecuados (Martínez-Meyer 2005, Loiselle *et al.* 2008, Mateo *et al.* 2011, Pliscoff y Fuentes-Castillo 2011).

Al finalizar la depuración de datos de presencia, estos se dividieron al azar en 2 partes iguales, donde un 50 % se usó para entrenar los modelos y el otro 50% para validarlos.

Variables para la modelación.

Las variables que se usaron para el modelaje de nicho ecológico son de tipo topográfico y climatológico. Dentro de las variables topográficas incluimos un Modelo Digital de Elevación (MDE), a partir del cual se derivaron las variables de aspecto (orientación de laderas) y pendiente del terreno, ambas expresadas en grados.

Las variables climáticas se obtuvieron de la base de datos de **WorldClim** (WorldClim 2005) con una resolución de 1 km² (30 segundos de arco por lado) (Hijmans *et al.* 2005). Con las 19 variables bioclimáticas que ofrece WorldClim, se realizó un análisis de correlación ($r \leq 0.5$) para encontrar aquellas variables que estén menos correlacionadas y así evitar la colinearidad (Loiselle *et al.* 2008). Las variables climáticas menos relacionadas fueron **Bio02** [Media del rango diurno media del mes (Max Temp-Min Temp)]; **Bio03** [Isotermalidad (Bio2/Bio7) (*100)]; **Bio04** [Temperatura Estacional (desviación estándar * 100)]; **Bio07** (Rango de temperatura anual); **Bio12** (Precipitación anual); **Bio13** (Precipitación del mes más húmedo); **Bio16** (Precipitación del cuarto más húmedo); **Bio18** (Precipitación del cuarto más caliente) y **Bio19** (Precipitación del cuarto más frío).

Para los escenarios de cambio climático se usaron los datos del **Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático** (IPCC) 4^a aproximación (CIAT 2012). En ellos encontramos los diferentes modelos y escenarios de gases de efecto invernadero. El Centro Canadiense para la Modelación del Clima y Análisis (CCCma por sus siglas en inglés) es uno de los muchos encargados de generar proyecciones para los reportes de la IPCC. De los cuales seleccionamos el **A2** (catastrófico), el cual predice un incremento tanto en lo económico como en la población y el uso indiscriminado de combustibles fósiles y el **B1** (conservador), el cual está enfocado en una equitativa riqueza económica y un crecimiento de la población más lenta y generando energías alternativas amigables al ambiente. Estos escenarios están realizados para cada década desde el 2020 hasta el 2100, del cual seleccionaron el **2030** y el **2060**. Un aspecto importante a considerar es que la base de datos geográficos que contendrá las variables ambientales que se usarán para modelar, estarán estructuradas en formato *raster*. El problema inherente a este formato es la resolución de las celdas (píxeles) ya que la mínima resolución que se tiene es de 1 km².

Algoritmos utilizados

GARP

El Algoritmo Genético para la Construcción de un Conjunto de Reglas (el acrónimo en inglés GARP.-Genetic Algorithm for Rules-set Production). GARP genera modelos de nicho ecológico (MNE) para una especie reconociendo aquellas regiones en donde las condiciones son aptas para que las especies puedan mantener sus poblaciones viables. Para ello requiere puntos de localidades donde se conoce que la especie está presente, además de un conjunto de coberturas (geográficas, climáticas, edáficas, geológicas, etc.), las cuales representan el ambiente en el que la especie puede sobrevivir (Peterson *et al.* 2001, Anderson *et al.* 2002, Anderson *et al.* 2003, Martínez-Meyer 2005, Pearson *et al.* 2007).

El conjunto de reglas se desarrolla utilizando un algoritmo genético, que refina la solución en forma evolutiva mediante el ensayo y la selección de normas y subconjuntos aleatorios de los datos disponibles. El resultado se proyecta en un espacio geográfico para crear un mapa de la distribución potencial. GARP utiliza varios enfoques bajo el principio de que la combinación de ellos producirá una mayor exactitud predictiva, que en lugar de usar un solo método (Peterson *et al.* 2001, Anderson *et al.* 2003, Anderson y Martínez-Meyer 2004, Pearson *et al.* 2007, QiJin y GuangSheng 2011). Uno de los principales defectos en el proceso del modelaje es que no contemplan las interacciones bióticas (Peterson *et al.* 2001, Anderson *et al.* 2002, Anderson *et al.* 2003).

Se calibró el modelo con las variables de WorldClim (WorldClim 2005) usando 500 corridas, con un límite de convergencia que establece cuando las iteraciones del modelo se detienen de 0.01 y con un máximo de 1000 iteraciones. GARP es un algoritmo heurístico que genera diferentes soluciones óptimas con los mismos datos de entrada. Los modelos resultantes son de tipo binario, donde el área de ausencia presenta valor de 0 y la de presencia valor 1. Del conjunto de soluciones obtenidas, se seleccionaron los diez mejores modelos en base a que contienen los bajos niveles de omisión y valores moderados de comisión (Peterson y Robins 2003). Finalmente, los 10 mejores modelos fueron sumados con algebra de mapas con el programa ArcGis 9.3, para unirlos en un solo mapa de consenso el cual tienen valores de 0 a 10, donde los valores de 0 son áreas que predicen

ausencia y el valor 10 indica que todos los modelos coinciden en que la especie puede estar presente y un valor 5 indica que solo 5 modelos predicen presencia de las especies.

MaxEnt

El otro algoritmo utilizado para realizar los MNE, fue MaxEnt. Este al igual que GARP requiere como insumos principales un conjunto de variables ambientales relevantes para la sobrevivencia de la especie, en formatos *raster* obteniéndolos mediante SIG (Phillips *et al.* 2006). MaxEnt estima la distribución potencial del nicho ecológico de la especie con base en la localización de la distribución de la máxima entropía, considerando que los valores esperados para cada características analizadas bajo esta distribución estimada, coinciden en su valor empírico promedio (Elith *et al.* 2011). Para hacer el modelado de la distribución de especies, las localidades de ocurrencia sirven como puntos de muestreo, la región geográfica de interés es el espacio donde la distribución está definida y las características ambientales son las variables ambientales (Bolívar-Cimé 2009, Elith *et al.* 2011). Los valores que genera son transformados mediante una función logística que se ajusta a una escala más comprensible en el rango entre 0 (incompatible) y 1 apto, creando un mapa de distribución potencial. Con estos valores se puede hacer comparaciones estadísticas y estimar el valor de corte óptimo para separar dos clases únicas de zonas de presencia y ausencia. Se producirán modelos para cada uno de los escenarios propuestos en el proyecto: actual y de cambio climático.

Validación de los modelos

La validación de un modelo consiste en contrastar las predicciones generadas por los mapas respecto a datos de presencia independientes para obtener una medida de su significancia en relación con la hipótesis nula. Para cada especie se dividieron al azar los datos de localidades de presencia en un grupo de entrenamiento (50%) y uno de prueba (50%). El grupo de entrenamiento se usa para generar los modelos predictivos, mientras que los grupos de prueba se usó como control para validar el modelo predictivo (Peterson *et al.* 2007).

Se usó un análisis ROC parcial (Receiver Operating Characteristic) para evaluar la predictibilidad de los modelos, la cual es una alternativa de la ROC tradicional. Esta prueba es recomendada por Peterson *et al.* (2008), ya que toma únicamente aquellas áreas donde se produjeron datos o corresponden a valores pertinentes de sensibilidad (valores de comisión) y especificidad (valores de omisión). Los valores son significantes si es ≥ 1 basados en la media y con la desviación estándar para ambos algoritmos (Barve 2008, Peterson *et al.* 2008, Banks *et al.* 2013).

Mapas de consenso de los algoritmos.

El resultado de los modelos de ambos algoritmos se sumó para obtener un solo mapa, al que se denominó consenso. Este mapa contiene cuatro clases, de las cuales: 1) es el área donde ninguno de los modelos predice presencia; 2) indica el área donde MaxEnt predice presencia; 3) corresponde al área donde GARP predice presencia y 4) corresponde a aquellos lugares en donde tanto GARP y MaxEnt concuerdan en la presencia de la especie (Fig. 5).

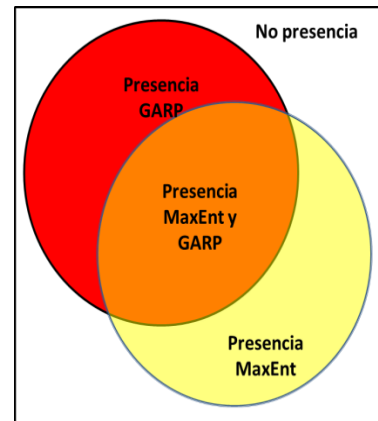


Figura 5.- Área de consenso.

Al igual que los modelos de cada algoritmo, el mapa de consenso fue evaluado, esta vez con el modelo estadístico χ^2 . Con ello, se generó una matriz de confusión o error, donde de nuevo se tomó el 50% de los datos localidades de prueba para comparar las ausencias y presencias predichas por los modelos con las ausencias y presencias predichas reales (Peterson y Robins 2003).

La χ^2 se evaluó con la siguiente fórmula:

$$\chi^2 = \frac{(Si - Dentro)^2}{Dentro + (No - Fuera)^2}$$

Fuera

Dónde:

Si= puntos de prueba observados dentro del área del modelo

Dentro= Área de presencia del modelo/área total* el total de puntos de prueba

No= Puntos de prueba observados fuera del área del modelo

Fuera= Área de ausencia del modelo/área total*el total de puntos de prueba.

El paso final es buscar la probabilidad que los modelos no estuviesen influidos por el azar. Tomando como nivel de significancia de 0.05. Si la probabilidad es alta se considera que los datos están de acuerdo con el modelo. Si la probabilidad es menor de 0.05, la diferencia es significativa, y si es menor de 0.01 se considera altamente significativa (Peterson y Robins 2003).

Ajuste del área de distribución

Una de las limitantes de la distribución de especies es que no proyectan factores históricos, dispersión, interacciones bióticas, lo que denominamos nicho realizado. Ya que los algoritmos sólo pueden modelar el nicho fundamental, se puede aproximar el nicho realizado al hacer un ajuste recortando los modelos realizados con mapas de regiones biogeográficas en donde las especies han sido observadas. Para ello se usaron los puntos de presencia de las especies y se sobrepusieron a las regiones biogeográficas para identificarlas y posteriormente usarlas para excluir aquellas áreas de los modelos en donde las especies nunca han sido reportadas (Anderson y Martínez-Meyer 2004, Martínez-Meyer 2005).

Análisis de los modelos en su espacio ecológico.

El análisis ecológico es realizado a partir de la combinación de las variables de temperatura media anual y precipitación anual de WorldClim para todos los escenarios, además del modelo digital de elevación. La combinación es a partir del valor que presenta cada pixel para cada capa que representa su espacio ecológico. Los valores obtenidos se recortan

aquellas capas donde los modelos predijeron el área de presencia de la especie. Con ello, se podrá observar las condiciones ambientales dentro de las áreas predichas por los modelos.

Prueba de sobreposición del nicho ecológico

Para establecer si el MDE de las dos especies estudiadas se sobrepone, se realizó un análisis de sobreposición de nicho de acuerdo a lo propuesto por Warren *et al.* (2008), el cual se basa principalmente en dos conceptos: la similitud y equivalencia de nicho. La similitud expresa como una de las especies predice a la otra bajo un modelo nulo específico. La equivalencia se refiere a si dos especies son indistinguibles una de la otra. Para este problema Warren *et al.* (2008) propusieron dos medidas de solapamiento de nicho: el índice D es derivado de estadísticos de Schoener que ha sido utilizado para cuantificar solapamientos de nicho alimenticio y microhabitat y el índice I derivado de las distancias de Hillinger que se basa en la comparación de distribuciones de probabilidad. Valores de estos índices cercanos a cero indican que las especies tienen nicho ecológico completamente discordante, pero si el valor es cercano a la unidad, entonces las especies tienen nicho climático idéntico. Esto se realizó con el programa ENMTools 1.42 creado por Warren (Warren *et al.* 2008).

Este proyecto contó con la infraestructura necesaria para su realización en el **Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica** de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

V. RESULTADOS

Ajuste de las localidades de presencia.

El mayor número de localidades de presencia en el Herbario de la Facultad de Biología de la U.M.S.N.H. (EBUM) y en el Herbario del Instituto de Ecología del Bajío (IEB) fue *Cedrela dugesii* y el menor número de registros fue para *Cedrela odorata* (Tabla 1). Sin embargo, los registros de las localidades de los herbarios en línea (GBIF y REMIB) indican que existe un mayor número de registros para *C. odorata* que para *C. dugesii*.

Para el primer ajuste, se eliminaron aquellas localidades repetidas en diferentes colecciones eliminando cerca de la mitad de datos. Para realizar el segundo ajuste, el cual era por altitud donde se han observado las especies, se optó por considerar la información de Calderón y Germán (1993) para las especies de estudio.

Tabla 1.- Localidades de especies registradas en los herbarios.

Herbario	<i>Cedrela dugesii</i>	<i>Cedrela odorata</i>	Total
EBUM	14	2	16
IEB	28	2	30
GBIF	58	642	700
REMIB	3	191	194
TOTAL	103	837	940
Ajuste 1[*]	56	422	478
Ajuste 2^{**}	50	329	379

* El ajuste 1 representa los datos que se suprimieron por encontrarse repetidos. ** El ajuste 2 fueron los datos que se usaron para realizar los modelos en base a la altitud observada para cada especie.

Ajuste con las regiones biogeográficas

Al colocar las localidades de presencia de cada especie ya ajustados sobre un mapa de las principales provincias biogeográficas de México, se obtienen las zonas biogeográficas las cuales pertenecen las especies (Fig. 6). Para *C. odorata*, las provincias biogeográficas donde se localizaron fueron: Costa del Pacífico, Depresión del Balsas, Eje Volcánico, Golfo de México, Los altos de Chiapas, Oaxaca, Sierra Madre Oriental y del Sur, Soconusco y Yucatán. Mientras que *C. dugesii*, únicamente se presentó en: Altiplano del

Sur (Zacatecano-Potosino), Eje Volcánico Transversal y Depresión del Balsas, coincidiendo en los dos últimos con *C. odorata*.

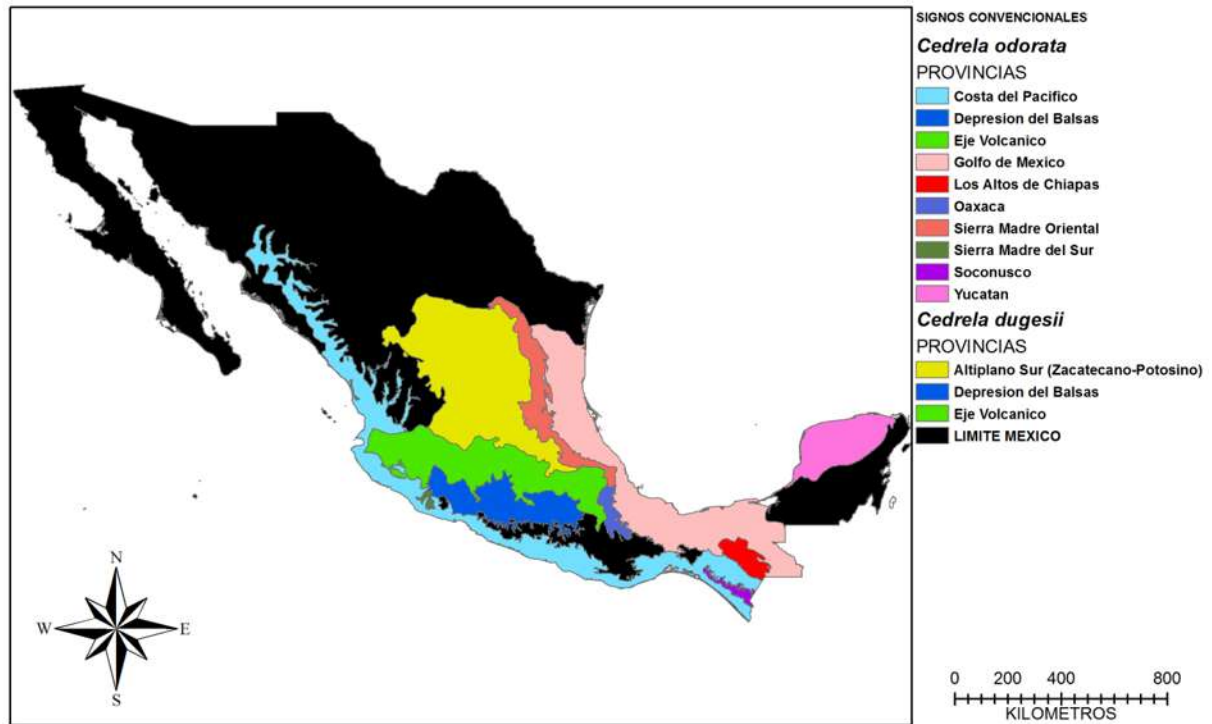


Figura 6 .- Principales provincias biogeográficas para el género *Cedrela* en México.
Se observan las principales zonas biogeográficas para las especies *C. odorata* y *C. dugesii* en el territorio mexicano.

Análisis de los modelos de nicho ecológico

Los escenarios de nicho ecológico con variables actuales muestran que la distribución de *C. dugesii* y *C. odorata* son totalmente distintas en distintos algoritmos. Para *C. dugesii* los dos algoritmos lo ubican en la parte central del territorio mexicano, mientras que *C. odorata* su nicho climático se distribuye en la vertiente del Golfo de México y muy poco en la vertiente del Pacífico (Fig. 7). El algoritmo GARP predice una área más extensa para *C. odorata* que para *C. dugesii* y lo contrario pasa en MaxEnt, ya que predice mayor área en *C. dugesii* que en *C. odorata*. Para solucionar dicho conflicto fue que se realizó un mapa de consenso para cada especie, el cual sólo presenta la distribución donde ambos algoritmos predicen presencia, mejorando la predicción de la presencia de la especie.

Calderon y Gérman (1993) han observado a *C. dugesii* de los 1850 a los 2400 msnm, mientras que a *C. odorata* se le ha observado del nivel del mar hasta los 1400 msnm. Los modelos de nicho ecológico realizados con GARP sobrestiman tanto el área de distribución como la altitud y MaxEnt subestima el área de distribución y sobrestima la altitud de las especies, sobretodo *C. dugesii*, existiendo un solapamiento en cuanto a la altitud, temperatura y precipitación en ambos algoritmos. Sin embargo, el modelo de consenso ayudó a ajustar de altitud a la que se ha observado la especie y por lo tanto ajustó el nicho ecológico de las especies. Al concordar el modelo de consenso con la altitud observada también modificó la temperatura y precipitación de las especies, existiendo una sobreposición de estas en los tres modelos, siendo la de menor sobreposición la de consenso.

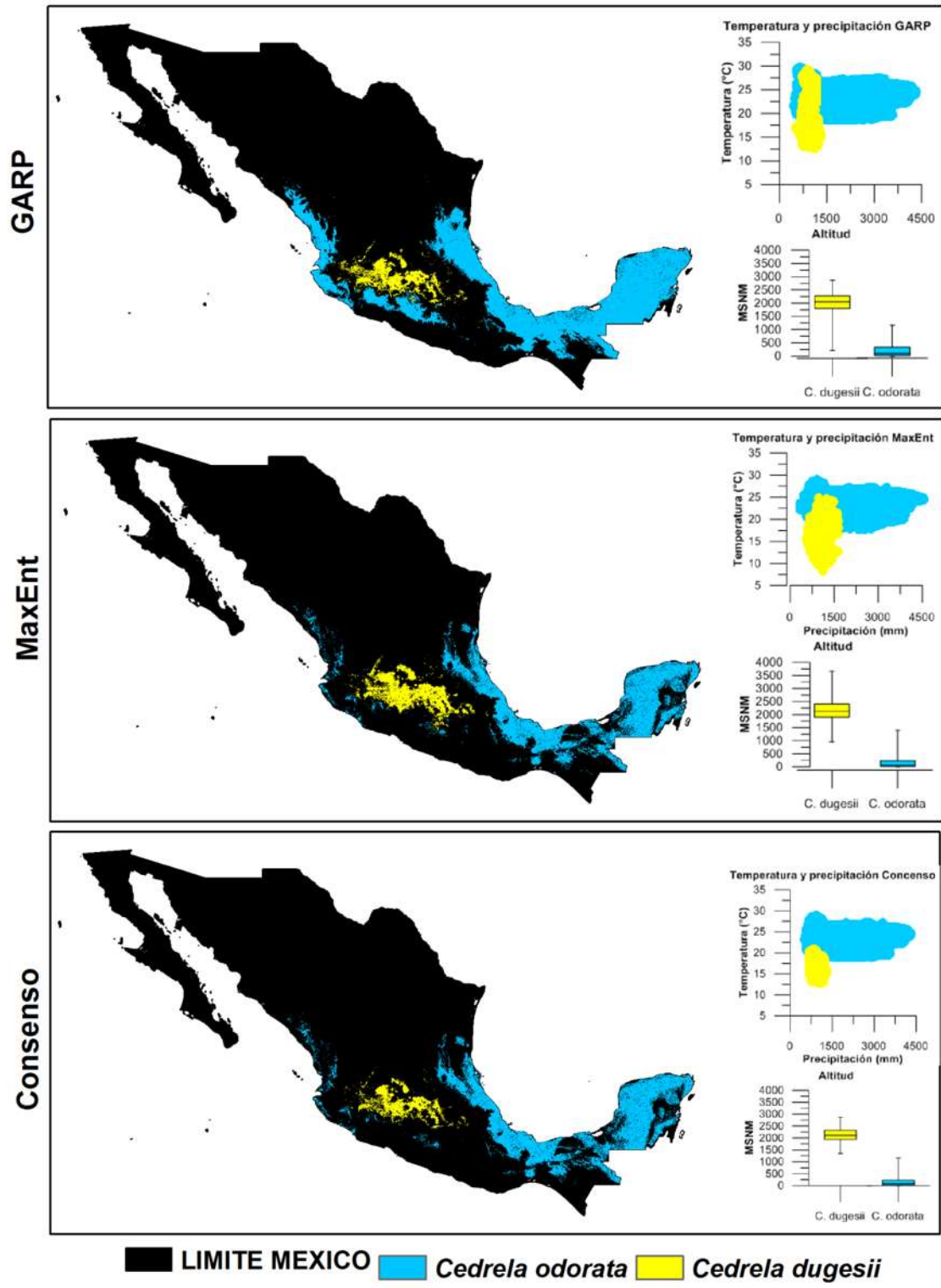


Figura 7.- Modelos de nicho ecológico realizados con distintos algoritmos.

Nota: En los modelos de nicho ecológico se muestran los resultados de distribución, climáticos, y de altitud de ambas especies de los algoritmos GARP, MaxEnt y un modelo de consenso.

Validación de los modelos

Los modelos validados con la curva ROC parcial tuvieron un éxito predictivo con ambos algoritmos proyectados en el escenario actual. Los resultados reflejan que la media de los resultados de la prueba se encuentra superior al umbral (≥ 1) en ambos algoritmos y con una desviación estándar que no sobrepasa del límite establecido (Tabla 2). Los valores más alejados del umbral de 1 lo presenta GARP.

Tabla 2.- Validación de la curva ROC Parcial para ambos algoritmos.

	MaxEnt		GARP	
	<i>C. odorata</i>	<i>C. dugesii</i>	<i>C. odorata</i>	<i>C. dugesii</i>
Máximo	1.0367	1.8680	1.5980	1.9549
Mínimo	1.0073	1.0061	1.0093	1.0302
Media	1.0185	1.0827	1.3007	1.4699
Desv. Std	0.0052	0.1103	0.1607	0.3195

Nota: Razón de la ROC parcial, representan la proporción del Valor AUC (área bajo la curva) en el umbral de omisión para las AUC en el 50% de localidades al azar de cada especie.

La validación de los modelos de consenso en los escenarios actuales, fueron satisfactorios realizados con la χ^2 con ambas especies (Tabla 3).

Tabla 3.- Validación de la χ^2 para los modelos de consenso.

	A. T.	A. P.	A. A.	P. D	P. F.	D	F	χ^2	p
<i>C. dugesii</i>	86,501	29,998	56,503	19	6	8.67	16.33	18.84	1.419 ^{E-05}
<i>C. odorata</i>	463,770	254,245	209,525	115	49	89.9	74.09	15.51	8.243 ^{E-05}

Nota: A. T. Área Total; A. P. Área de Presencia; A. A. Área de Ausencia; P.D. Puntos Dentro; P. F. Puntos Fuera; D. Dentro; F. Fuera, χ^2 Ji-Cuadrada; p. Probabilidad.

Índice de similitud de nicho

El índice D (sobreapamiento de nicho) en MaxEnt es más pequeño que en GARP, al igual que el índice I de (comparación de distribución de probabilidad) indicando que las dos especies son ecológicamente distintas y no llegan a traslaparse ya que su valor es más cercano a 0 (Tabla 4).

Tabla 4.-Índices de similitud de nicho.

	Índice D (Schoener)	Índice I (Hellinger)
MaxEnt	0.0290	0.1296
GARP	0.1103	0.2245

Modelos de cambio climático.

Los escenarios de cambio climático (A y B) para las proyecciones 2030 y 2060 del Centro Canadiense para la Modelación del Clima y Análisis (CCGma), muestran que la tendencia en la temperatura es de aumentar y la de precipitación de disminuir conforme las décadas avanzan (Tabla 5). El escenario “A2” en el 2030 al parecer es muy similar el porcentaje al “B1” en el 2060 en cuanto a la precipitación y temperatura.

Tabla 5.- Temperatura y precipitación de los distintos escenarios climáticos.

	Actual	A2 2030	A2 2060	B1 2030	B1 2060
Temp. Media (°C)	20.71	4.14%	10.57%	2.67%	5.89%
Precip. Media (mm)	1,328	-6.34%	-7.51%	-2.75%	-5.76%

Nota: El porcentaje mostrado de los distintos escenarios climáticos es en base al escenario actual.

El área del modelo de consenso en los escenarios A2 2030 y A2 2060 para *C. dugesii* indica que el resultado de ambos algoritmos no concordaron en el modelado que proyectan, por lo tanto no existe área en esta zona (Fig. 8). Sin embargo, en los escenarios B1 2030 y B1 2060, se observa que existe una pérdida de 77.52 y 76.49% respectivamente, existiendo una diferencia de 1.12% entre ambos escenarios moderados para *C. dugesii*, en comparación con el nicho climático actual (Tabla 6). Sin embargo, *C. odorata* en los escenarios catastróficos existe una pérdida de 32.63% en A2 2030 y de 31.59% en A2 2060, con una diferencia de 1.04%. Los escenarios moderados indican que para *C. odorata* el B1 2030

podría perder el 18.31% y para el B1 2060 perdería el 24.62%, teniendo una diferencia de pérdida entre escenarios de 6.31%.

Tabla 6.- Análisis de área de consenso de los distintos escenarios climáticos

	Actual	A2 2030	%	A2 2060	%	B1 2030	%	B1 2060	%
<i>C. dugesii</i>	42,897	0	-100	0	-100	9,644	-77.52	10,086	-76.49
<i>C. odorata</i>	254,245	171,294	-32.63	173,934	-31.59	207,697	-18.31	191,644	-24.62

Nota: Se presentan valores de área en km² para cada especie en la distribución actual. El porcentaje es calculado a partir de la distribución actual. Valores negativos indica el porcentaje de pérdida respecto al actual.

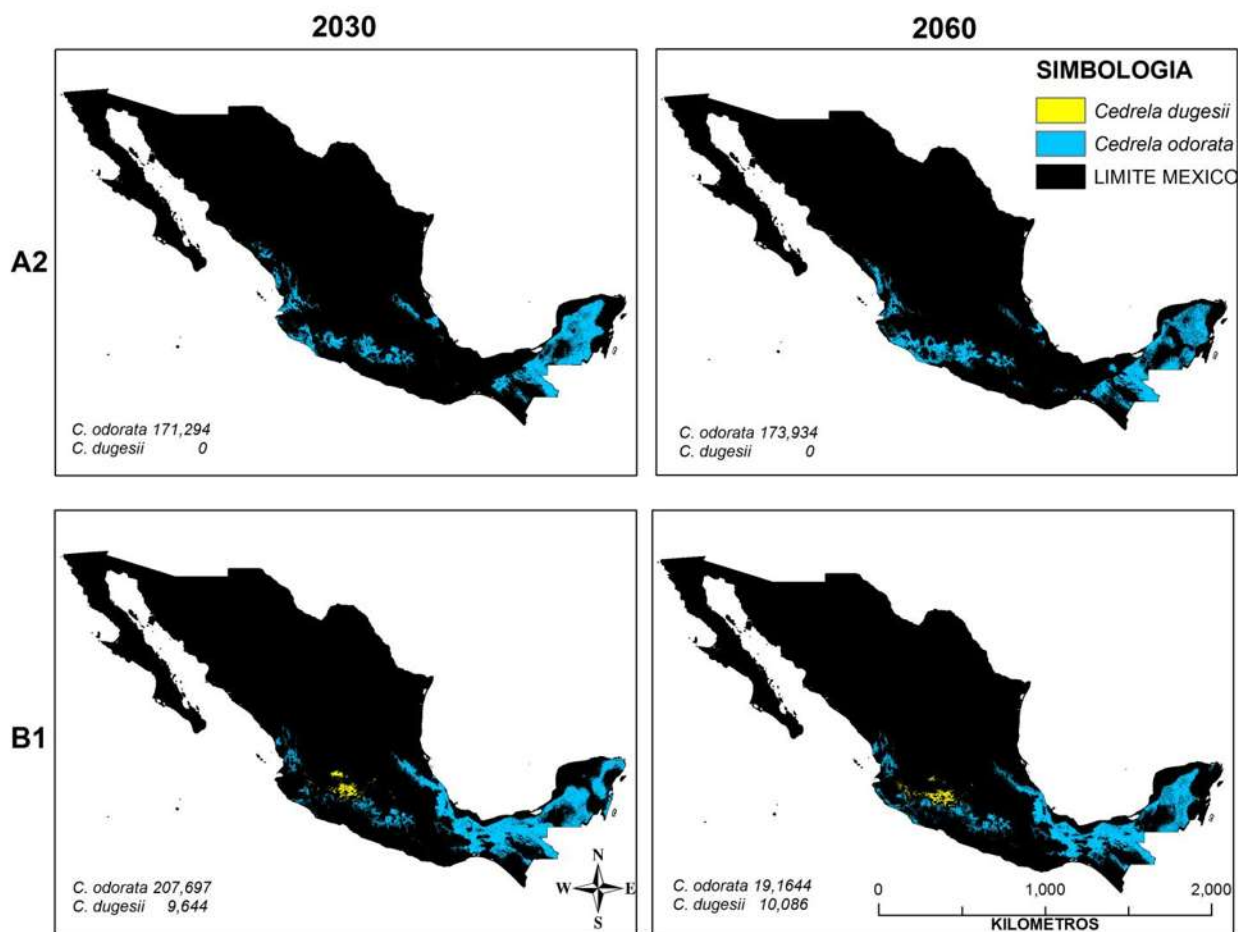


Figura 8 .- Mapas de cambio climático para las especies *C. dugesii* y *C. odorata* en México.

VI. DISCUSIÓN

Distribución Potencial

En el presente trabajo se observó que *Cedrela odorata* y *C. dugesii* se distribuyen de manera distinta dentro del territorio mexicano, lo que estaría acorde con otros autores que consideran a ambas especies como claramente diferenciadas en términos taxonómicos, filogenéticos y biogeográficos. Genéticamente, Muellner *et al.* (2009), en su trabajo sobre la familia Meliaceae muestra que *C. odorata* y *C. dugesii* se distribuyen en dos clados distintos agrupándose con especies distintas y existiendo una considerable distancia genética entre ellas (Muellner *et al.* 2009, Muellner *et al.* 2010). Los modelos de consenso de nicho ecológico de ambas especies muestran que se distribuyen de manera diferente. La especie con mayor superficie ocupada en los modelos corresponde a *C. odorata*, abarcando la mayor parte de la vertiente del Golfo de México y una pequeña porción de la vertiente del Pacífico. Por otro lado, *C. dugesii* se distribuye esencialmente en el centro del país. Esto contradice lo que instituciones como CONABIO 2012a, SEMARNAT 2010, CONAFOR 2013, las cuales consideran a las dos especies como una sola, interpretando erróneamente las características ambientales en las que se presentan ambas especies. Por ejemplo, en la ficha técnica de CONABIO, se menciona que *C. odorata* se presenta en varios tipos de bosques, entre los que se mencionan los de pino-encino, de pino y el mesófilo de montaña, que se conoce que se presentan a elevaciones que van de los 1500 hasta los 3600 msnm (Rzedowski 2006, CONABIO 2012a). Sin embargo, *C. odorata* se presenta desde el nivel del mar y hasta los 1200 msnm, mientras que *C. dugesii* se encuentra desde los 1850 hasta los 2400 msnm (Cintrón 1990, Calderón y Germán 1993, Pennington y Sarukhán 2005, Rzedowski 2006). El intervalo de elevaciones que CONABIO presenta, es más propio de *C. dugesii* que de *C. odorata*. Probablemente, parte de la confusión entre ambas especies, se pueda deber a que *C. odorata* produce híbridos con otras especies del mismo género, lo cual ocasiona que algunos de estos presenten características morfológicas que hacen que se asemejen a *C. dugesii* (Cintrón 1990, Muellner *et al.* 2009, Muellner *et al.* 2010).

Estudios recientes como el de Muellner *et al.* (2010), mencionan que el género *Cedrela* se distribuía en dirección sur a norte en América del Sur, mientras que en América Central se observan dos linajes que sugiere que uno de ellos lo hacía de norte a sur en el Mioceno-

Plioceno, adaptándose a los bosques tropicales húmedos y bosques premontanos húmedos. Durante el Plioceno-Pleistoceno en México existió una intensa actividad volcánica la cual involucró principalmente el centro del país creando especialmente el Eje Volcánico Transversal y en menor medida las partes de la planicie costera del noroeste, el extremo sur de Chiapas, mismo que constituye una zona volcánica amplia de Centroamérica promoviendo la expansión, fragmentación y divergencia de las poblaciones (Rzedowski 2006, Rojas-Soto *et al.* 2012). Los modelos de nicho ecológico de *C. dugesii* predicen que se encuentra dentro en el Eje Volcánico Transversal, esto pudo haber servido de barrera geográfica para que por medio de un proceso de especiación alopátrica, se separará de su especie hermana generando estas dos especies distintas. Sin embargo, se ha demostrado que el conservacionismo de nicho con especies crípticas; tiende a ocupar nichos similares, porque tienen los mismos caracteres adaptativos que les permiten sobrevivir en sus nichos (Daubenmire 1982, Wiens y Graham 2005, Ortega-Rodríguez 2009). Kozak y Wiens (2006) y Martínez-Cabrera *et al.* (2012), mencionan que para la especie pierda el nicho ancestral por separación alopátrica primero se tiene que adaptarse a la barrera y luego restringir el flujo de los genes. Sin embargo, cuando la divergencia entre especies no es adaptativa y esta se da por aislamiento de la población y fluctuaciones climáticas, el nicho tenderá a conservarse (Peterson *et al.* 1999a, Martínez-Cabrera *et al.* 2012). En general, se ha llegado a la conclusión que los nichos ecológicos de las especies son estables durante periodos de tiempo moderados evolutivamente, pero los cambios comienzan a ser observados durante periodos de tiempo más largos (Peterson 2003).

Los índices de Schoener (D) y de Hellinger (I), indican que no existe traslape en los nichos ecológicos de las dos especies, apoyando la hipótesis de que son distintas (Warren *et al.* 2008).

Efecto del cambio climático en la distribución de las especies.

Los modelos de distribución de las especies para los escenarios de cambio climático, muestran, como se esperaba, cambios en el área potencial de distribución. El escenario catastrófico (A2), muestra que el nicho climático de *C. odorata* persiste para 2030 y 2060, sin embargo *C. dugesii*, reduciría dramáticamente su área de distribución, de tal manera que para 2030, prácticamente podría desaparecer. En general, la distribución de la especies

sigue la tendencia observada en otros estudios (Sáenz-Romero *et al.* 2009, Ackerly *et al.* 2010, Pacheco *et al.* 2010, García-Valdés *et al.* 2013), en los cuales la redistribución de la temperatura y la precipitación, podría ocasionar que el nicho climático de las especies se desplace hacia lugares de mayor elevación. El incremento de la temperatura en el 2030 años es de 4.14% y un decremento de precipitación de 6.34% en el escenario catastrófico, lo cual teóricamente afectará a *C. dugesii* ya que su rango de elevación es de 1850-2400 msnm por lo cual su nicho climático desaparecerá al no encontrarse con elevaciones adecuadas donde esta pudiera establecerse. De manera similar sucede con *C. odorata*, donde pierde hasta 32.63% área de distribución, pero al ser una especie que se encuentra desde los 0-1200 msnm, tiene más opciones de encontrar su nicho climático en altitudes mayores en este escenario para ambas décadas previstas. Sin embargo el escenario B1 describe un aumento de temperatura de 2.67% en la década 2030 y aumentara hasta un 5.89% en 2060, mientras el descenso de la precipitación será de 2.75% para 2030 y llegará a 5.76% en el 2060. En el escenario B1, se observa en los modelos áreas donde las especies tendrían condiciones ambientales para su supervivencia. No obstante, *C. dugesii* pierde hasta un 77.52% de su nicho climático, el cual se va contrayendo hacia el centro del país. En este mismo escenario, *C. odorata* pierde alrededor del 24.62% para 2060, principalmente en la península de Yucatán y parte de la vertiente del Golfo de México, con algunos incrementos en la vertiente del Pacífico.

El escenario más parecido a las condiciones actuales es el A2: a) existe un incremento de la población, b) desarrollo económico mundial desestabilizado y c) un cambio tecnológico relativamente lento en lo referente al uso de fuentes alternativas y renovables de energía y un uso indiscriminado de combustible fósil, que repercute en un aumento de CO₂ y otros gases de efecto invernadero a nivel mundial (IPCC 2001, 2007, Rojas-Soto *et al.* 2012, IPCC 2013).

VII. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados de distribución potencial actual, las especies ocupa nichos climáticos distintos.
- El nicho climático actual de *Cedrela dugesii* se presenta en el centro de México, mientras que *C. odorata* se ubica hacia la vertiente del Golfo de México y menos en la vertiente del Pacífico.
- El cambio climático podría afectar menos el nicho climático de *C. odorata* por ser una especie que se distribuye a altitudes menores.
- La distribución de *C. dugesii* se pierde en el escenario catastrófico, mientras que la distribución de *C. odorata* estará perdiendo área en la vertiente del golfo e incrementara hacia la vertiente del Pacífico.

Capítulo II

EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE TRES ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES EN LA CUENCA DE CUITZEO, MICHOACÁN.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales son ecosistemas muy importantes ya que albergan más de la mitad de las especies del planeta, ya que son muy antiguos, complejos y diversos (Murphy y Lugo 1986, Meli 2003, Rzedowski 2006). Los bosques tropicales están caracterizados por una vegetación que presenta una cobertura densa de árboles, lianas y epifitas, y una competición dinámica por la luz. Además, los bosques proveen de alimento, comida y refugio a muchas especies (Murphy y Lugo 1986, Gillespie *et al.* 2000, Quigley y Platt 2003, Rzedowski 2006, Murphy y Bowman 2012). Muchas especies en estos bosques brindan servicios ambientales y poseen especies de alto valor intrínseco y extrínseco (Meli 2003, Rubén 2003, Dick y Wriqth 2005, Cayuela 2006, Wright 2010, Murphy y Bowman 2012). Los bosques tropicales están sujetos a procesos de un cambio de uso de suelo además de verse sometidos a otras actividades antropogénicas que los afectan severamente (Gillespie *et al.* 2000, Kalacska *et al.* 2004, Rzedowski 2006, Quesada *et al.* 2009, Cuevas-Reyes y Vega-Gutiérrez 2012).

La pérdida de estos bosques se da principalmente en países en vías de desarrollo, en donde la pobreza es persistente y la tasa de natalidad es alta. Motivo por lo cual, los bosques tropicales son muy afectados con la actividad de corta, rosa y quema, para uso agrícola o para actividades de ganadería, con los consecuentes cambios ambientales (Meli 2003, Cayuela 2006, Wright 2010). Estos cambios han alterado la estructura y composición de los bosques, a nivel físico, químico, climático, ecológico, entre otros. Su deterioro a nivel global ha causado pérdida del hábitad, fragmentación, pérdida de biodiversidad y consigo eliminación de variabilidad genética, a nivel de población y de especies (Meli 2003, Herrerías-Diego *et al.* 2005, Cayuela 2006, Rzedowski 2006, Wright 2010). Sin embargo, el mayor impacto que tiene la presión sobre estos bosques son alteraciones en el albedo y el balance del agua atmosférica, afectando los patrones climáticos contribuyendo al calentamiento global, aumentando las concentraciones de CO₂ atmosférico (Meli 2003, IPCC 2007, Pacheco *et al.* 2010, Wright 2010, Reed *et al.* 2011). Si a estos tipos de hábitad existiera un cambio en su temperatura o los regímenes de precipitación, posiblemente algunas especies cambiarían, se moverían hacia lugares donde se encuentren sus requerimientos o simplemente se extinguirían (Sáenz-Romero *et al.* 2009). De los bosques más susceptibles a este cambio podrían ser los bosques tropicales secos, ya que está

conformado por árboles que pierden sus hojas entre 4 a 6 meses del año y en época de lluvias las renuevan.

Estos cambios en la temperatura y precipitación son un hecho que ha ocurrido durante toda la historia del planeta, pero en la actualidad está ocurriendo demasiado rápido. Se ha observado que este incremento ha crecido de manera exponencial desde los inicios de la industrialización, emitiendo el CO₂ hacia la atmósfera por causa de la quema de combustibles, el incremento de la población y el desarrollo económico de los países y ha sido causa de que el último siglo haya aumentado la temperatura 3.5 °C a finales de este siglo. Estas preocupaciones han inquietado y consternado a varios países del mundo, creando así un Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (**IPCC**), establecido desde el año de 1988 (IPCC 2001, 2007, 2013). La función que realiza la IPCC es de analizar de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica recabada por expertos en varias disciplinas y evaluar los resultados por homólogos a esas disciplinas. Ante tal preocupación, se han unido gobiernos y universidades de varios países del mundo para estudiar el cambio climático. El resultado del esfuerzo realizado por los grupos de trabajo de la IPCC, ha sido la generación de modelos climáticos proyectados a diferentes décadas, creando así diferentes escenarios, los cuales varían la emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles emitidos a la atmosfera. Los escenarios construidos son: **A** (escenario catastrófico) donde aumenta la tasa de natalidad, la economía, la emisión de gases y la temperatura a un 3.5°C al final del siglo. El escenario contrastante es el **B** (escenario moderado) en el cual la economía, el crecimiento poblacional son moderadas y un cambio de uso de combustibles fósiles a energías limpias aumentando solo 2 °C al final del siglo (IPCC 2001, QiJin y GuangSheng 2011, CCCma 2013). Estos modelos han sido utilizados en varias investigaciones, sobre todo el efecto que podría tener el cambio climático sobre los diferentes ecosistemas naturales, pudiendo observar la distribución potencial de muchas especies y bajo diferentes escenarios de cambio climático con el modelaje de nicho ecológico (Peterson *et al.* 2001, Anderson *et al.* 2002, Peterson *et al.* 2002, Peterson 2003, Peterson y Robins 2003, Anderson y Martínez-Meyer 2004, Illoldi-Rangel *et al.* 2004, Martínez-Meyer 2005, Soberón y Peterson 2005, Pearson *et al.* 2007, Ortega-Huerta y Peterson 2008, Pliscoff y Fuentes-Castillo 2011).

El objetivo de modelos de nicho ecológico es predecir aquellas áreas en donde presentan condiciones ambientales similares a aquellas en donde las especies han sido observadas, como una aproximación al nicho fundamental de las mismas. Las metodologías implementadas para la modelación de nicho ecológico han surgido a partir del desarrollo de sistemas computacionales de alto rendimiento, los sistemas de información geográfica (**SIG**) y los aportes de la informática y las matemáticas que llevaron a la aparición de algoritmos computacionales que permitieron modelar la distribución de las especies, teniendo como soporte conceptual la teoría del nicho ecológico. Los insumos que se requieren para la modelación son registros de presencia de las especies y las variables ambientales (topográficas, edáficas, geológicas, climáticas, etc.) que puedan estar relacionadas con la supervivencia y la presencia de las especies (Peterson *et al.* 1999b, Peterson *et al.* 2002, Soberón y Peterson 2005, Hurtado-Aguilar 2007, Elith *et al.* 2011). Estos modelos han sido de gran ayuda en muchas disciplinas científicas tales como la biogeografía, evolución, ecología, conservación, epidemiología, manejo de especies invasivas, entre otros campos (Anderson *et al.* 2002, Peterson *et al.* 2002, Peterson 2003, Illoldi-Rangel *et al.* 2004, Phillips *et al.* 2006, Hurtado-Aguilar 2007, Pliscoff y Fuentes-Castillo 2011, QiJin y GuangSheng 2011).

II. HIPÓTESIS

La distribución actual de las especies estudiadas será distinta en comparación con los escenarios de cambio climático.

III. OBJETIVOS

Objetivo particular

Analizar la distribución actual de tres especies de árboles tropicales en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán y modelar su distribución potencial mediante el modelaje de nicho ecológico bajo escenarios contrastantes de cambio climático.

Objetivos generales

1. Generar una base de datos de localidades de presencia geo-referenciados de las especies a estudiar, mediante la revisión de herbarios y literatura científica, así como de trabajo de campo.
2. Crear una base de datos geográfica de variables climáticas a la resolución espacial apropiada, para escenarios contrastantes: un escenario climático actual y dos escenarios diferentes de emisiones de gases de efecto invernadero.
3. Aplicar el modelaje de nicho ecológico (MNE), para los diferentes escenarios climáticos.
4. Analizar y comparar los modelos climáticos de los MNE de las especies de estudio

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES

Familia Leguminosae (Subfamilia Mimosoideae)

***Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose**

Sinonimia.- *Albizia occidentalis* T. S. (Rzedowski 2007, Rico-Arce *et al.* 2008)

Nombres comunes.- Parotilla, palo blanco, frijolillo, tepehuaje blanco

Descripción morfológica.- Árbol de hasta 30 m de alto, caducifolio, de corteza liza o algo rugosa, de color gris claro, ramillas cafés, densamente purulentas en la juventud, glabradas, lenticelas de color claro (Fig. 9). Hojas ovadas generalmente, hasta de 45 cm de largo y 25 de ancho, con estipulas deltoides, raquis de 2 a 6 pares de foliolos subsésiles, oblongos a elípticos u ovados, agudos a truncados y a menudo finamente apiculados en el ápice, oblicuos en la base, verde oscuros y glabros casi desde el principio del haz y pilósulos a lo largo de las nervaduras del envés. Flores sésiles, agrupadas en número de 10 a 35 en capítulos esféricos, estos sobre pedúnculos hasta 5cm de largo. Cáliz campanulado, corolino, glabro. Corola tubular blanquecina, glabra. Fruto solitario, sobre un pedúnculo de 3 a 4 cm de largo y estípite solido de hasta 4 cm de largo cuerpo linear- oblongo, indehiscente de color morado en la madurez, glabro. Semillas (5)8 a 13 cafés, algo lustrosas (Rzedowski 2007, Rico-Arce *et al.* 2008).



Figura 9 .- *Albizia plurijuga*

Foto: Gerardo A. Reyes Abrego.

La correcta definición y circunscripción de este taxón está pendiente ya que muchos autores separan a *A. plurijuga* como dos especies y otros consideran una sola (Rzedowski 2007). Sin Embargo, la controversial incertidumbre que prevalece en materia de la circunscripción de *Albizia* en general, en esta contribución se prefiere seguir el criterio conservador de McVaugh (1987).

Ecología y distribución.- Especie aparentemente endémica de México de los bosques tropicales caducifolios. En la actualidad se ha encontrado mayormente en matorrales secundarios, la cantidad de individuos no es grande y la repoblación es escasa. Altitud de 1600-2300 msnm, florece en abril; colectado con frutos en julio y agosto. Permanece sin follaje de noviembre a mayo. Se le ha observado en Guanajuato, Querétaro y Michoacán (Rzedowski 2007, Rico-Arce *et al.* 2008).

En la NOM-050-SEMARNAT-2010 esta especie se encuentra **Amenazada (A)** (SEMARNAT 2010).

Familia Meliaceae

***Cedrela dugesii* (S. F. Blake) S. Wats.**

Sinonimia.- *C. ciliolata* S. F. Blake (Calderón y Germán 1993).

Nombres comunes.- Cuatal, cuaterani, cueteramba (lengua Purépecha [Michoacán]), nogal, nogal Corriente, nogalillo, nogalillo cimarrón.

Descripción morfológica.- Árbol de 10-15 m de alto, de tronco tortuoso hasta 60 cm de diámetro lisa en la juventud y fisurada en forma de placas rectangulares en la madurez, de color grisáceo y con algunas porciones de la planta con ligero olor a ajo (Fig. 10). Hojas paripinadas de (10) 20 a 35 (55) cm de largo con peciólulos opuestos a sub-opuestos, de 1 a 3 cm de largo, 3 a 5 (7) pares, con foliolos blanco-ciliados en el margen,

envés más o menos pubescentes sobre todo en las nervaduras. Ápice por lo común largamente acuminado y falcado. Flores aromáticas sobre pedicelos de 1 a 1.5 mm de largo con cáliz acopado pubescente. Las flores masculinas presentan 5 estambres incluidos con filamentos de 1.5 a 2 mm de largo, con anteras oblongas de 1 mm aprox. de largo y las flores femeninas tienen ovario globoso. Cápsulas colgantes de color café-rojizo, con



Figura 10.- *Cedrela dugesii*

Foto: Gerardo A. Reyes Abrego

lenticelas blancas, con semillas elípticas de alrededor de 2 cm de largo y 5 mm de ancho, con el ala ocupado a la mitad de la superficie.

Ecología y distribución.- habita particularmente en suelos someros y afloramientos rocosos, en la actualidad poco frecuente en los bosques tropicales caducifolios del Bajío y existe cierta abundancia en los malpaíses. Florece en mayo a junio, el fruto se ha colectado de abril a noviembre. Permanece sin follaje en época de secas. Se localiza algo dispersas en localidades de Guanajuato, norte de Michoacán como en el cerro del Punhuato, Tócuaro y Uruapan y alrededores de Querétaro y San Juan del Rio. Se le puede encontrar a una altitud de (1500) 1850-2400 msnm (Calderón y Germán 1993).

En la NOM-050-SEMARNAT-2010 la especie se encuentra **Sujeta a Protección Especial. (Pr)** por encontrarse con sinónima con *C. odorata* (SEMARNAT 2010).

Familia. Bombacaceae

***Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britten & Baker.**

Sinonimia.- *Bombax aesculifolium* H.B.K.
(Carranza-González y Blanco-García 2000)

Nombres comunes.- Palo puchote, pochote, puchote, ceiba, lantá de cerro, pochota.

Descripción morfológica.- Árbol de 4 a 8 (12) m de alto, de copa regular (Fig. 11). Tronco de 15 30 (60) cm de diámetro, con espinas fuertes, cónicas, de 3 a 5 cm de largo, ramas jóvenes con numerosas espinas, glabras o casi. Hojas dispuestas en espiral, estipulas de 2 a 5 mm de largo, peciolo de 3 a 12 cm de largo, pubescentes a tomentulosos, peciolulo de 0.3 a 1.4 cm de largo, foliolos de 6 a 8, ápice acuminado o



Figura 11.- *Ceiba aesculifolia*

Foto: Gerardo A. Reyes Abrego

largamente atenuado, margen aserrado o dentado, glabros. Flores solitarias o dispuestas en pares, cáliz de 3 a 4.5 cm de largo. Pétalos oblongo-lineares, café- tomentosos en el

exterior y glabro y blancos internamente. Fruto cilíndrico- elipsoide, café-grisáceo, liso, glabro, cáliz persistente. Semillas moreno oscuro, de 8 a 9 mm de largo, embebidas en abundante y suave fibra sedosa de color blanco (Carranza-González y Blanco-García 2000).

Ecología y distribución.- Planta encontrada en matorral subtropical o en el bosque tropical caducifolio. Altitud de 1650-2200 msnm. Florece en mayo a octubre y sus frutos maduran de septiembre a febrero. Se distribuye desde el centro de México hasta Honduras. Encontrada en Sinaloa, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Tabasco, Chiapas, Campeche. Aunque esta especie no es muy abundante localmente el deterioro del hábitat podría incrementar su vulnerabilidad. Sin embargo, existe evidencia sobre los sucesos reproductivos que puede beneficiar a la especie en condiciones de fragmentación (Herrerías-Diego *et al.* 2005).

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Cuenca de Cuitzeo se localiza en el sistema Volcánico Transversal entre los paralelos 19°30' y 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°30' y 101°35' de longitud oeste (Fig. 12), tiene una superficie de aproximadamente 4,000 km² (Mendoza *et al.*, 2001), abarca 28 municipios de los cuales 23 corresponden a la parte norte de Michoacán (92.8%) y 5 al sur del estado de Guanajuato (7.2%) (Ortega-Rodríguez 2003, Leal-Nares *et al.* 2010) (Tabla 7).

Tabla 7.- Municipios que conforman la Cuenca de Cuitzeo

	MUNICIPIO	SUPERFICIE TOTAL (ha)	SUPERFICIE EN LA CUENCA (ha)	PORCENTAJE DEL TOTAL MUNICIPAL
Michoacán	ACUITZIO	18041.198	14057.159	77.9
	ALVARO OBREGON	15694.996	15694.996	100.00
	COPANDARO	17552.307	17552.307	100.00
	CUITZEO	25641.931	25591.299	99.8
	CHARO	32454.809	20005.089	61.6
	CHUCANDIRO	19184.107	18313.274	95.5
	HIDALGO	115459.016	1628.252	1.4
	HUANDACAREO	9107.398	9077.290	99.7
	HUANIQUEO	20442.349	745.978	3.7
	HUANIQUEO	8147.682	6526.747	80.1
	INDAPARAPEO	17723.501	16781.056	94.7
	LAGUNILLAS	8130.582	7829.920	96.3
	MADERO	101981.074	306.017	0.3
	MORELIA	119522.100	105743.038	88.5
	MORELOS	18172.708	4518.276	24.9
	PATZCUARO	43470.238	8345.142	19.2
	QUERENDARO	23067.622	15923.945	69.0
	QUIROGA	21823.368	2942.246	13.5
	SANTA ANA MAYA	10366.504	10366.504	100.0
	TACAMBARO	78809.377	76.363	0.1
TARIMBARO	26237.449	26237.449	100.0	
TZINTZUNTZAN	16891.086	260.513	1.5	
ZINAPECUARO	59976.281	42836.935	71.4	
Guanajuato	ACAMBARO	87402.646	14634.016	16.7
	MOROLEON	15821.093	3213.835	20.3
	SALVATIERRA	58637.867	6420.260	11.0
	URIANGATO	11470.016	2944.929	25.7
	YURIRIA	66953.112	1755.743	2.6

LÍMITE DE LA CUENCA DE CUITZEO

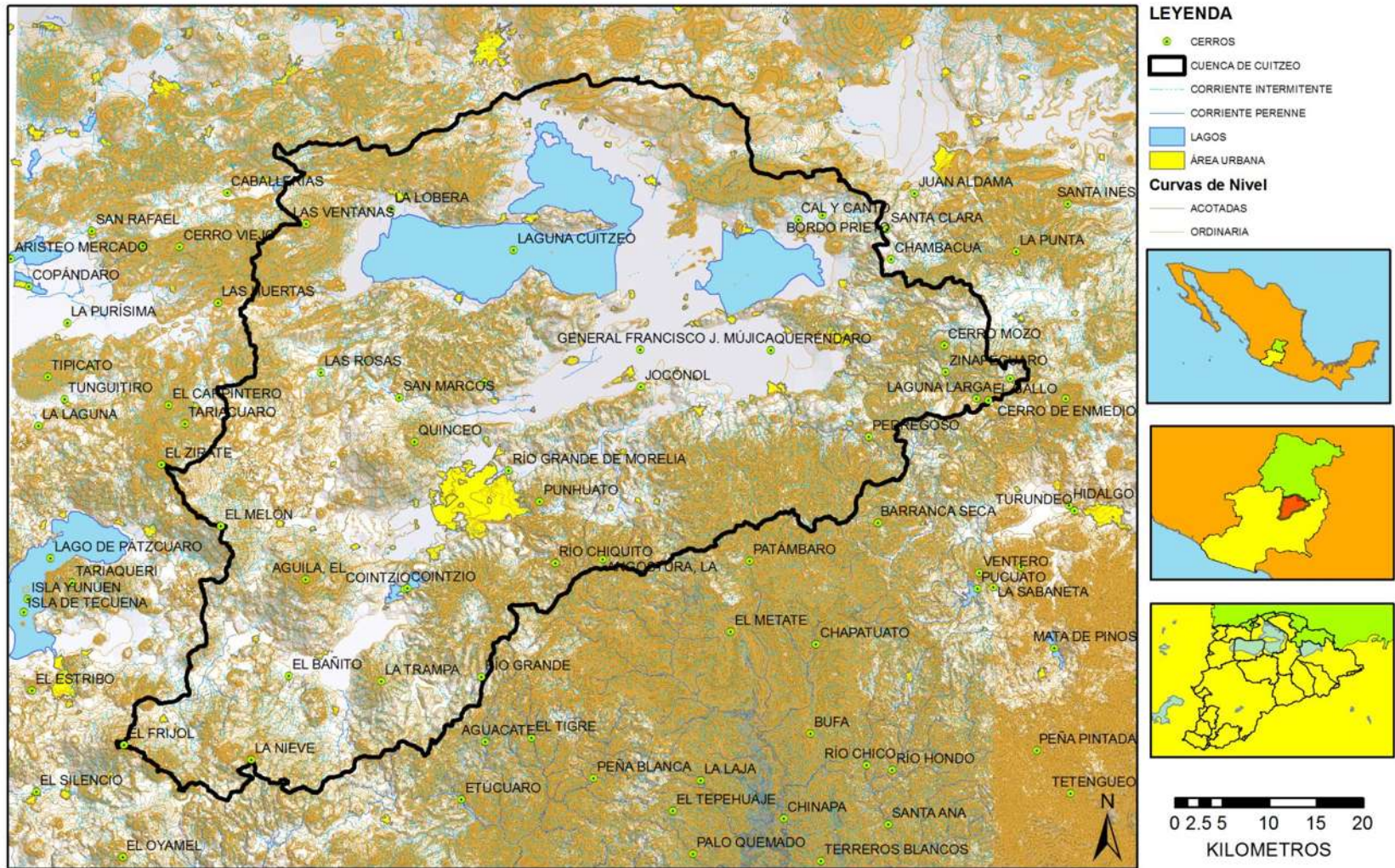


Figura 12.- Ubicación geográfica de la Cuenca de Cuitzeo (INEGI 2013b)

Clima

De acuerdo a la cartografía de efectos climáticos regionales de INEGI, que se divide en dos períodos que van de los meses de noviembre a abril (época de secas) y de mayo a octubre (época de lluvias) (Tabla 8) (INEGI 2013a). Es posible reconocer tres tipos de climas en toda la cuenca, (A) C (W₀), es el más cálido de los semicálidos, corresponde al más seco de los templados subhúmedos con lluvias en verano, se presenta en la porción más baja de la cuenca (centro norte), el C(W₁), desplazándose hacia el sur, el clima cambia a templado subhúmedo con lluvias en verano y un grado intermedio de humedad principalmente y el C(W₂) se encuentra en la porción sur de la cuenca el clima sigue siendo templado subhúmedo con lluvias de verano, pero con un grado mayor de humedad (Fig. 13).

Tabla 8.- Aspectos climáticos más importantes de la Cuenca de Cuitzeo (Ortega-Rodríguez 2003).

Periodo	Precipitación media (mm)	Superficie (ha)	Temperatura media máxima(°C)	Superficie (ha)	Temperatura media mínima (°C)	Superficie (ha)
Mayo a Octubre	< 700	155425.17	<18°	4631.37	<6°	9496.19
	700 a 800	136842.65	18° a 21°	30408.49	6° a 9°	51373.62
	800 a 900	27586.74	21° a 24°	120486.37	9° a 12°	180717.02
	900 a 1000	41808.36	24° a 27°	175729.82	>12°	158736.12
	1000 a 1200	28706.84	>27°	69067.20		
	>1200	9953.42				
Noviembre a Abril						
	<75	203433.35	<18°	5995.94	<0°	940.27
	75 a 100	141711.80	18° a 21°	34846.75	0° a 3°	15384.99
	100 a 125	46556.98	21° a 24°	338283.55	3° a 6°	70107.15
	125 a 150	8172.84	>24°	21196.96	>6°	313890.91
	>150	448.33				

Clima en la Cuenca de Cuitzeo

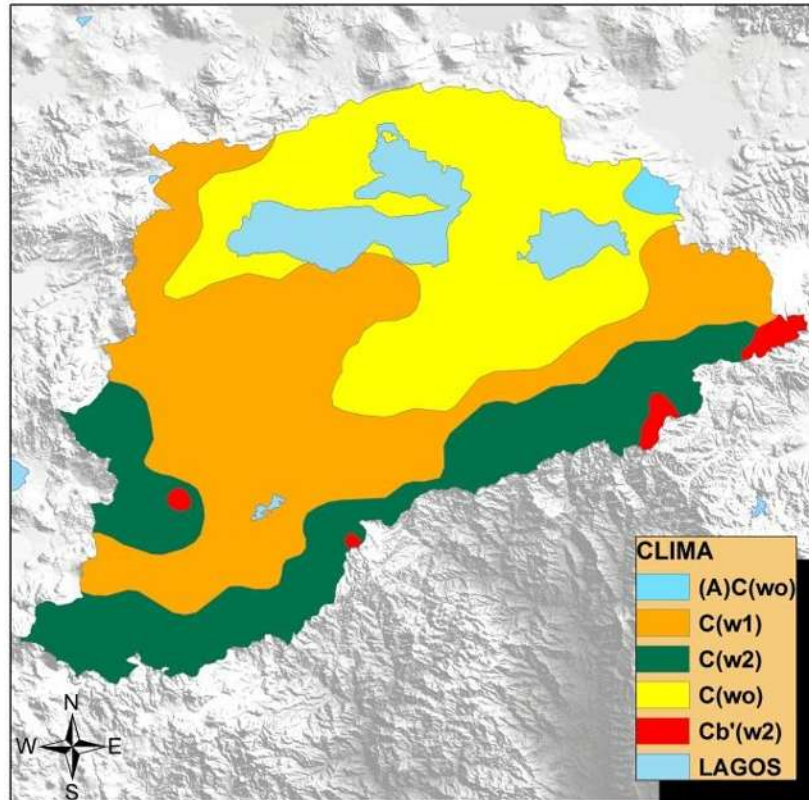


Figura 13.- Clima en La Cuenca de Cuitzeo (CONABIO 2012b).

Vegetación

En la cuenca se registran los siguientes tipos de vegetación: bosque de coníferas o pino, bosque de encinos (de esta comunidad vegetal, Rzedowski (2006), describe tres variantes de comunidades con diferente composición y estructura: comunidades xerófilas, mesófilas y termomesófila), bosque de oyamel, bosque mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio, matorral subtropical, pastizal y bosque de galería (Fig. 14).

USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN LA CUENCA DE CUITZEO

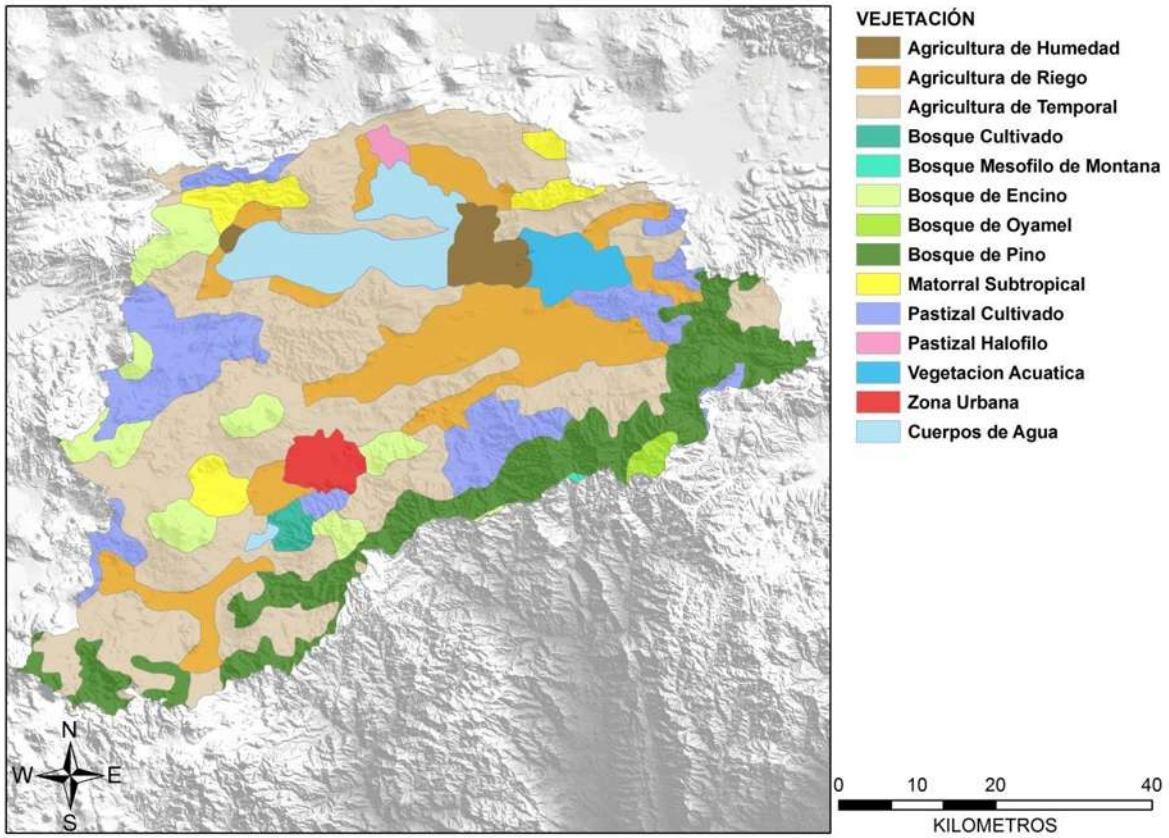


Figura 14.- Vegetacion en la Cuenca de Cuitzeo. (INEGI 2013b).

MÉTODOS

La metodología del Capítulo II es similar en muchos aspectos al Capítulo I, lo cual soló ha variado un poco ajustándolo al área de la Cuenca de Cuitzeo y otros métodos que se describen a continuación. En este capítulo se realizó:

1. **Datos de localidades de presencia de las especies.** En este paso, además de realizar una revisión de herbarios, consulta de dato en línea, búsqueda de datos bibliográficos, al igual que el capítulo I.
2. **La búsqueda de campo** se realizó con la finalidad de obtener localidades georeferenciadas. Los datos obtenidos se utilizaran para ajustar y verificar los modelos de distribución potencial obtenidos con modelaje de nicho ecológico.

Variables para la modelación.

Las variables topográficas fueron Modelo Digital de Elevación (MDE), a partir del cual se derivaron las variables de aspecto (orientación de laderas) y pendiente del terreno, ambas expresadas en grados.

Las variables climáticas se obtuvieron de la base de datos de **WorldClim** (WorldClim 2005) con una resolución de 1 km² (30 segundos de arco por lado) (Hijmans *et al.* 2005). Esta contiene 19 variables bioclimáticas las cuales se realizó un análisis de correlación ($r \leq 0.5$) (Loiselle *et al.* 2008) quedando únicamente **Bio02** [media del rango diurno media del mes (max temp-min temp)]; **Bio03** [isotermalidad (Bio2/Bio7) (*100)]; **Bio04** [temperatura estacional (desviación estándar * 100)]; **Bio07** (rango de temperatura anual); **Bio12** (precipitación anual); **Bio13** (precipitación del mes más húmedo); **Bio16** (precipitación del cuarto más húmedo); **Bio18** (precipitación del cuarto más caliente) y **Bio19** (precipitación del cuarto más frío). A los modelos se les adiciono el modelo digital de elevación (MDE), a partir del cual se derivaron las variables de aspecto (orientación de laderas) y pendiente del terreno, ambas expresadas en grados.

Para los modelos de cambio climático se usaron los del **Intergovernmental Panel on Climate Change** (IPCC) 4^a aproximación (CIAT 2012). Se seleccionó El Centro Canadiense para la Modelación del Clima y Análisis (**CCCma** por sus siglas en inglés) es uno de los muchos encargados de generar proyecciones para los reportes de la IPCC. Dentro de este modelo se seleccionaron el escenario **A2** (catastrófico) con altas emisiones

de CO₂ y otros gases de efecto invernadero y el **B1** (conservador) que contiene bajos niveles de CO₂. Ambos escenarios se proyectaron para la década del **2030** y **2060**.

Algoritmos utilizados

GARP

GARP es un algoritmo heurístico, lo que indica que evoluciona o cambia a través de las iteraciones generando soluciones estocásticas, a través de un conjunto de reglas, el cual describe en un mapa regiones similares a las ocurrencias. Este algoritmo genera pseudoausencias y selecciona al azar puntos geográficos y los compara con las presencias actuales (Stockwell y Peters 1999, Ganeshaiah *et al.* 2003, Papes y Gaubert 2007, Peterson *et al.* 2007, Peterson *et al.* 2008, Banks *et al.* 2013).

MaxEnt

Por otro lado, MaxEnt es un algoritmo determinístico, el cual estima la distribución de destino mediante la búsqueda de la distribución de máxima entropía (es decir, que está más cerca de la uniformidad) que está sujeto a la restricción que se espera de cada característica (capa climática, edafológica, topográfica, etc.) bajo esta estimación dada que coincida con su promedio empírico. Este algoritmo a comparación con GARP trabaja mejor con pocos puntos de presencia y es mejor para interpolar puntos de ocurrencia que prediciendo áreas no adecuadas (Phillips *et al.* 2004, Phillips *et al.* 2006, Pearson *et al.* 2007, Peterson *et al.* 2007, Peterson *et al.* 2008, Elith *et al.* 2011, Banks *et al.* 2013).

Validación de los modelos

La evaluación estadística de los modelos de nicho ecológico se realizó por medio de un análisis de curva ROC, los cuales miden valores de sensibilidad (proporción de presencias conocidas predichas, = 1 – Falso rango negativo) contra 1 – especificidad (proporción de ausencias predichas, = Falsos rango positivo). El área bajo la curva ROC (AUC) es comparada contra las especulaciones nulas [el área bajo la línea enlazados con el origen con la esquina derecha del grafico (1,1), =0.5] ya sea de manera probabilística o mediante manipulaciones de remuestreo (Barve 2008, Peterson *et al.* 2008). Sin embargo, la curva

ROC tradicional se menciona que tiene problemas ya que ésta toma toda el área teniendo mayor probabilidad de que caiga un punto de presencia y solo interesa tomar el área del umbral (0.05) para que los modelos sean más predictivos en una menor área llamado curva ROC parcial. El resultado de esta curva mostró que ambos algoritmos con ambas especies fueron predictivos ya que el valor de rango que se sugiere debe ser ≥ 1 .

Mapas de consenso de los algoritmos.

El resultado de los modelos de ambos algoritmos se sumó para obtener un solo mapa, al que se denominó consenso. Este mapa contiene cuatro clases, de las cuales: 1) es el área donde ninguno de los modelos predice presencia; 2) indica el área donde MaxEnt predice presencia; 3) corresponde al área donde GARP predice presencia y 4) corresponde a aquellos lugares en donde tanto GARP y MaxEnt concuerdan en la presencia de la especie. Al igual que los modelos de cada algoritmo, el mapa de consenso fue evaluado, esta vez con el modelo estadístico χ^2 . Con ello, generamos una matriz de confusión o error, donde de nuevo tomamos el 50% de los datos localidades de prueba para comparar las ausencias y presencias predichas por los modelos con las ausencias y presencias predichas reales.

Ajuste del área de distribución

Para realizar el ajuste correspondiente a la Cuenca de Cuitzeo, se utilizó un área de proyección mayor al de la cuenca. Esto se realizó, ya que muchas de los puntos de presencia de las localidades de las especies eran insuficientes para realizar una buena predicción dentro de la Cuenca de Cuitzeo. Por lo tanto, el aumentar de área permitía colocar un mayor número de puntos de localidades de presencia para obtener mejores resultados al momento de proyectar. Después de ello, el resultado generado por los algoritmos fue recortado al área de la Cuenca de Cuitzeo, para observar cómo fue su proyección. Para aproximarnos más al nicho realizado, este se sobrepuso los puntos de presencia en un mapa de uso y vegetación de la cuenca para cada especie.

Análisis de los modelos en su espacio ecológico.

El análisis ecológico es realizado a partir de la combinación de las variables de temperatura media anual y precipitación anual de WorldClim para todos los escenarios, además del

DEM. La combinación es a partir del valor que presenta cada pixel para cada capa que representa su espacio ecológico. Los valores obtenidos se recortan aquellas capas donde los modelos predijeron el área de presencia de la especie. Con ello, se puede observar las condiciones ambientales dentro de las áreas predichas por los modelos.

Modelos de consenso

El uso de los distintos algoritmos indica áreas y distribuciones distintas, por lo que se decidió hacer un mapa de consenso. Esto se utilizó principalmente porque los algoritmos generan una sobrepredicción (GARP) y subestimación (MaxEnt) en los modelos como se observa en el capítulo I.

V. RESULTADOS

Datos de localidades de presencia de las especies.

Los resultados muestran que los puntos de localidades de presencia para la Cuenca de Cuitzeo eran insuficientes sobre todo para *Cedrela dugesii* que presentó 7 presencias (Tabla 9). Al ampliar la zona de trabajo y buscar más puntos de presencia se encontró que *Ceiba aesculifolia* presentó mayor número de registros, pero en cuanto se realizó los ajustes necesarios ésta llegó a hacer la especie con menores registros lo que quiere decir que presentaba mayor error en los datos.

Tabla 9.- Especies registradas en los diferentes herbarios.

Herbario	<i>Albizia plurijuga</i>	<i>Cedrela dugesii</i>	<i>Ceiba aesculifolia</i>	Total
EBUM	10	28	10	48
IEB	15	25	20	60
GBIF	33	22	54	109
REMIB	3	3	3	9
Fascículos	11	18	19	48
TOTAL	72	96	106	274
Ajuste 1	46	73	57	176
Ajuste 2	38	48	46	132
Cuenca	26	7	20	53
Campo	8	10	10	28

Nota: Puntos encontrados en los diferentes herbarios, Herbario de la Facultad de Biología de la UMSNH (EBUM); Herbario del Instituto de Ecología-Bajío (IEB); Global Biodiversity Information Facility (GBIF); Red Mundial de la Información sobre la Diversidad (REMIB); Ajuste 1.- eliminación de dato repetidos y cercanos a 1 km²; Ajuste 2.- eliminación de datos altitudinales fuera de rango; Campo.- localidades observada en la Cuenca de Cuitzeo; Cuenca.- Puntos de las localidades ajustadas que caen dentro de la cuenca.

La Cuenca de Cuitzeo presentaba pocos puntos de presencia, sobre todo para *C. dugesii* (Fig. 15). Al expandirse más el área se observa que la especie tiene mayor representatividad, al igual que las otras especies.

MAPA DE REGISTROS DE PRESENCIA

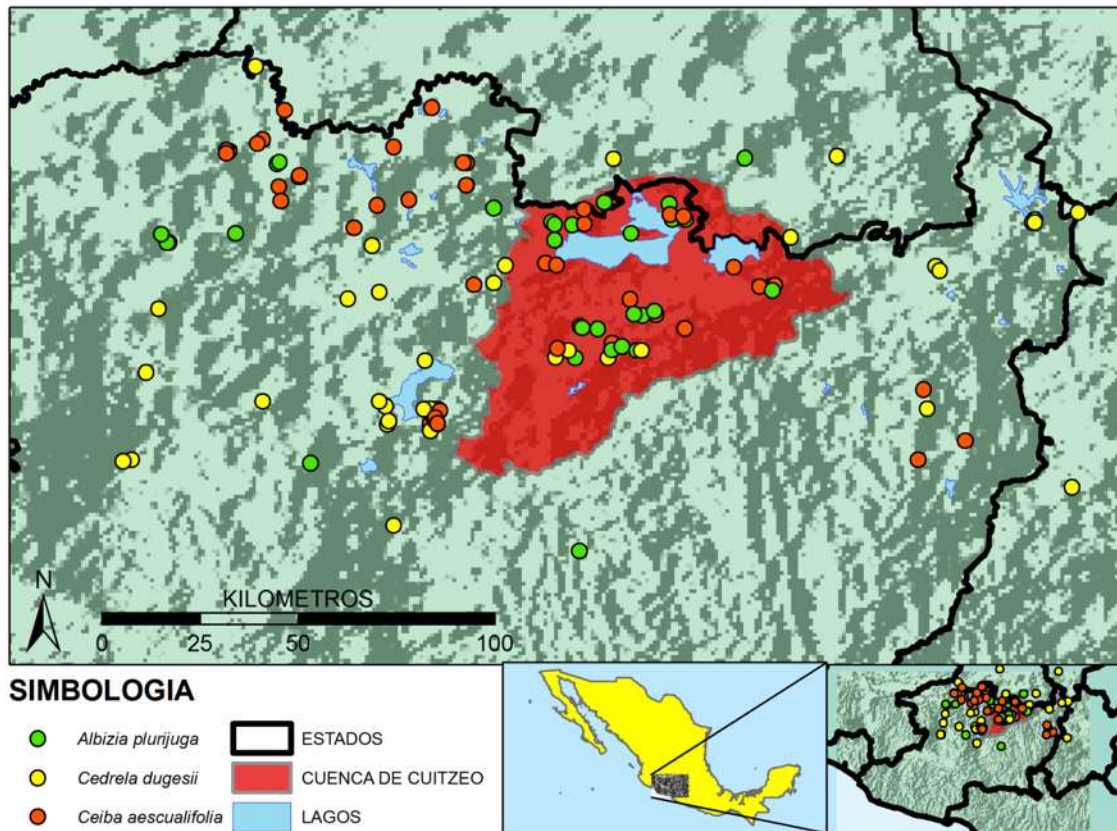


Figura 15.- Registro de Puntos de presencia para las especies.

Se muestra los puntos de presencia para *Albizia plurijuga*, *Cedrela dugesii* y *Ceiba aesculifolia*. El mapa mostrado es la zona donde se realizarán los modelos con los diferentes escenarios, proyectados para la Cuenca de Cuitzeo.

Análisis de distribución potencial con variables climáticas actuales

El mapa de consenso presenta un área más reducida en comparación con los dos algoritmos (Fig. 16). En los modelos de consenso la especie *Albizia plurijuga* presenta la mayor área distribuyéndose alrededor de la cuenca hacia la periferia. La distribución de *C. aesculifolia* es hacia alrededor del lago principalmente. Por último, *C. dugesii* su distribución es más hacia la orilla de la parte oeste hasta el sur de la cuenca, siendo esta la que menor área presenta.

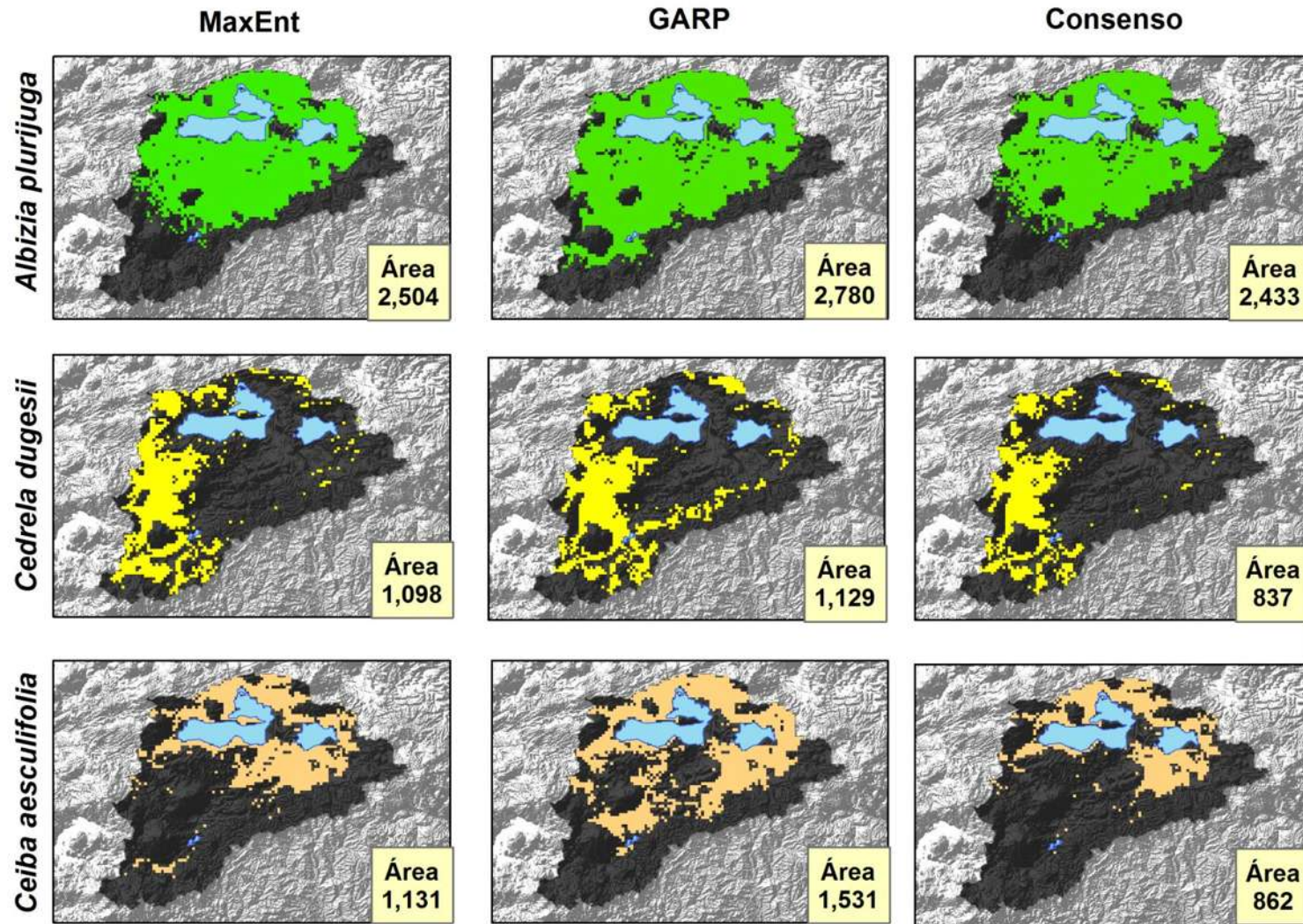


Figura 16.- Modelos de distribución potencia con variables actuales para la Cuenca de Cuitzeo.

Se muestran las especies de estudio con los algoritmos GARP y MaxEnt y un mapa de consenso el cual es donde converge la distribución de ambos algoritmos

Validación de los modelos.

Los modelos validados con la curva ROC parcial muestran que las tres especies fueron predictivas en ambos algoritmos, ya que la media de las 1000 iteraciones indica que la media de los rangos o razón se encuentra por encima del umbral ≥ 1 , indicando la predictividad de los modelos (Tabla 10). Entre los algoritmos se observa que GARP resulta más alejado del umbral indicando que es más predictivo que MaxEnt.

Tabla 10.-Validación de la curva ROC Parcial para ambos algoritmos.

		Máximo	Mínimo	Media	Desv. std
GARP	<i>A. plurijuga</i>	1.8282	1.0008	1.2961	0.2959
	<i>C. dugesii</i>	1.8449	1.0061	1.3027	0.2778
	<i>C. aesculifolia</i>	1.8681	1.0120	1.2701	0.2420
MaxEnt	<i>A. plurijuga</i>	1.2369	0.9867	1.0215	0.0453
	<i>C. dugesii</i>	1.0639	0.9841	1.0018	0.0078
	<i>C. aesculifolia</i>	1.0609	0.9896	1.0023	0.0100

Nota: Razón de la ROC parcial, representan la proporción del Valor AUC (área bajo la curva) en el umbral de omisión para las AUC en el 50% de localidades al azar de cada especie.

Para el mapa de consenso se le realizó una prueba de χ^2 para comprobar la predictividad, para observar que no estuviesen los modelos hechos al azar (Tabla 11). Estos modelos resultaron altamente predictivos sobrepasando el umbral de $P \geq 0.05$ para las tres especies.

Tabla 11.- Validación de la χ^2 para los modelos de consenso.

	A. T.	A. P.	A. A.	P. D	P. F.	D	F	Ji- sqd	<i>p</i>
<i>A. plurijuga</i>	155898	7346	148552	11	9	0.9424	19.0576	112.6444	2.582E- ²⁶
<i>C. dugesii</i>	155898	9370	146528	11	9	1.2021	18.7979	84.9689	3.031E- ²⁰
<i>C. aesculifolia</i>	155898	8270	147628	13	11	1.2731	22.7269	114.0668	1.26E- ²⁶

Nota: A T. Área Total; A. P. Área de Presencia; A. A Área de Ausencia; P.D. Puntos Dentro; P. F. Puntos Fuera; D. Dentro; F. Fuera, Ji-sqd. χ^2 ; *p*. Probabilidad.

Observaciones del nicho ecológico

Altimetría de los distintos modelos

El mapa de consenso elimina los datos extremos como se observó en el Capítulo I (Fig. 17). La especie que menor elevación presenta es *C. aesculifolia* 2325 m seguida por *A. plurijuga* con 2480 m y con mayor elevación es *C. dugesii* con 2555 msnm.

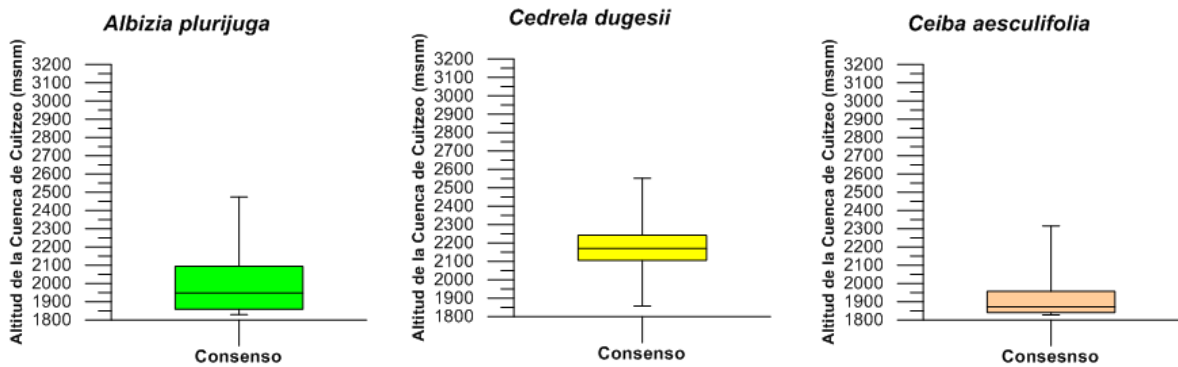


Figura 17.- Representación de altitudes con diferentes modelos.

En el eje de la Y se muestra la altitud mínima y máxima de la Cuenca de Cuitzeo y en el eje de las X los distintos modelos utilizados para su comparación.

Clima Altitud de la Cuenca de Cuitzeo (msnm)

El requerimiento de la temperatura y precipitación de las especies es distinta entre ellas (Fig. 18). Se observa que las especies de estudio no ocupan todo el nicho climático de la cuenca. La especie que requiere menor precipitación es *C. aesculifolia* (939-673 mm), seguida por *A. plurijuga* (1066-667 mm) y la que ocupa mayor precipitación es *C. dugesii* (1178-717 mm). En cuanto a la temperatura, *A. plurijuga* tolera temperaturas elevadas (19-15 C), seguida por *C. aesculifolia* pero con un rango menor (18.6-16 C), mientras que *C. dugesii* fue la especie que presentó temperatura más baja en comparación con las demás especies (18-14 C).

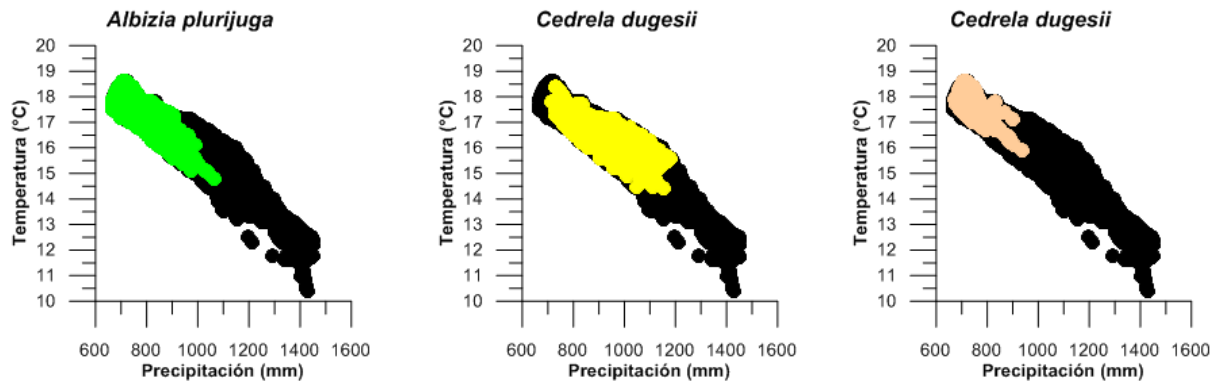


Figura 18.- Temperatura y precipitación de las especies dentro de la cuenca.

Se muestra en negro los rangos de temperatura de la cuenca, mostrando en el eje X la precipitación y en Y la temperatura del mapa de consenso. En los diferentes colores se encuentra la tolerancia en cuanto a la precipitación y temperatura dentro de la cuenca.

Aspecto y pendiente

En cuanto al aspecto y la pendiente de la cuenca se observa que son distintos requerimientos entre especies. Se realiza una prueba de uniformidad de Rayleigh el cual calcula la probabilidad de la hipótesis nula el cual indica si los datos se distribuyen de manera uniforme para datos circulares. Una probabilidad menor que el nivel de significancia (0.05) al igual que un valor de Z elevado se rechaza la probabilidad de que los datos se distribuyen de manera uniforme. En cuanto a la orientación (aspecto) se analiza la distribución de los datos que van de 0 a 360°. Cuando se usa la orientación de la ladera se toma el valor 0 como el punto norte, mientras que el sur es de 180, 90 el este y el oeste de 270°.

Los valores de Rayleigh indican que no existe una preferencia en cuanto a la orientación y a la pendiente de los datos (Fig. 19). El vector medio indica *A. plurijuga* y *C. dugesii* se distribuyen en S-E y *C. aesculifolia* se distribuye en W N W.

En cuanto a la pendiente, *A. plurijuga* es la especie que se presenta en una máxima de la pendiente más elevadas cercanas a 20° con una media de 2.6°. Para *C. dugesii* y *C. aesculifolia* se encuentran entre las especies con la menor pendiente de sus datos máximos

de 14° difiriendo en la media donde *C. dugesii* se encuentra de 2.93° mientras *C. aesculifolia* 1.76°.

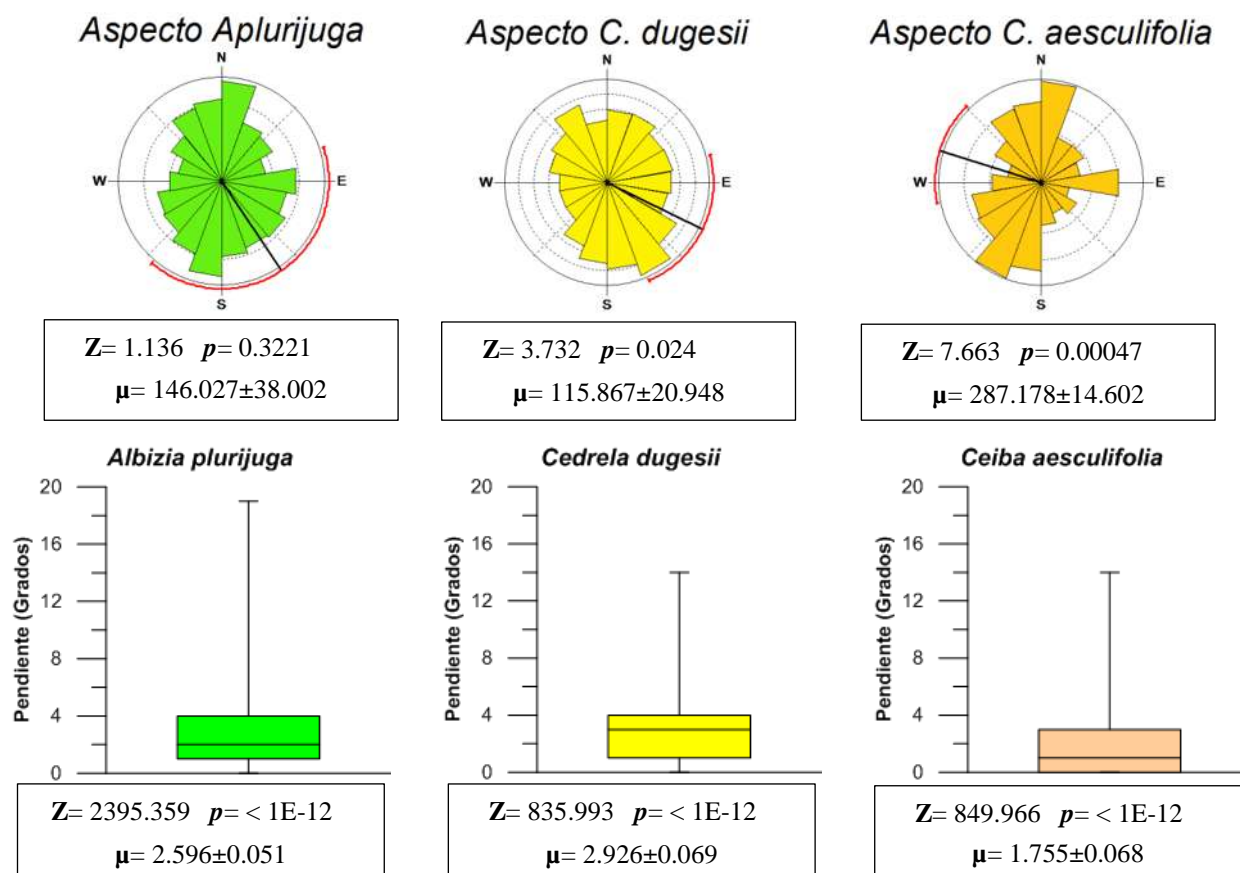


Figura 19.- Distribución de la orientación y pendiente.

En la orientación, la línea negra representa el vector medio que parte del centro hacia la periferia del modelo de consenso. La línea roja representa el intervalo de 95%. En pendiente se muestra los cuartiles partiendo de 0 a 20 grados.

Modelos de cambio climático

Los distintos escenarios de circulación general de gases de efecto invernadero acoplado océano-atmosfera del modelo CCGM3 indican que las especies dentro de la cuenca tienen una susceptibilidad distinta, sobre todo en el escenario B1 para las décadas 2030 y 2060. Para la especie *Ceiba aesculifolia* el modelo acoplado predice que el nicho climático podría desaparecer para los escenarios moderados (B1) y los escenarios catastróficos (A2) (Fig. 20). Sin embargo, *A. plurijuga* y *C. dugesii* únicamente se presentan en el nicho climático

en los escenarios moderados mientras que en los escenarios catastróficos desaparecen en ambas décadas.

Ambas especies presentan distintas áreas en distintas zonas en el escenario moderado siendo más afectada *A. plurijuga* en el escenario A2 2030 encontrándose en el límite de la Cuenca de Cuitzeo en el municipio de Chucándiro teniendo una elevación de 2140 msnm. Mientras que el escenario A2 2060, se encuentra en la parte sur de Morelia y Lagunillas, la parte norte de Huiramba y Acuitzio por el cerro del Bañito llegando a altitudes de 2058 a 2020 msnm (Fig. 21).

El área del nicho climático de *C. dugesii* en el escenario B1 2030 abarca los municipios del Sur de Morelia colindando con el norte de Acuitzio y el norte de lagunillas colindando con Huiramba, teniendo elevaciones de 1190 hasta 2157 msnm. Para el escenario B1 2060 se predice que de los 5 km² que tendrá de nicho climático dentro de la Cuenca de Cuitzeo 4 estarán en el norte del municipio de Huiramba de 2177 a 2319 msnm aproximadamente y 1 km² en el sur municipio de Lagunillas con una altitud de 2087 msnm (Fig. 22).

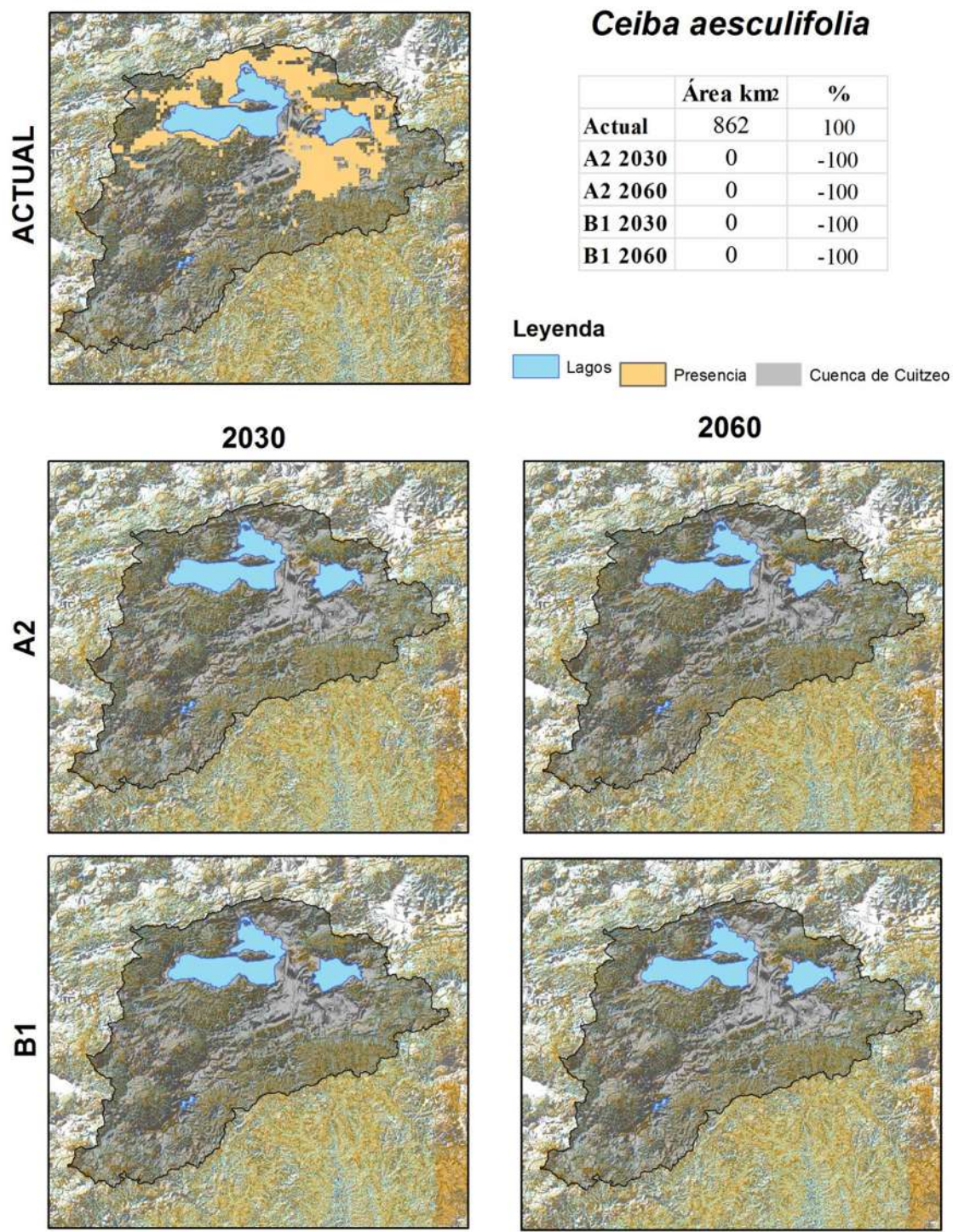


Figura 20.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para *Ceiba aesculifolia*.

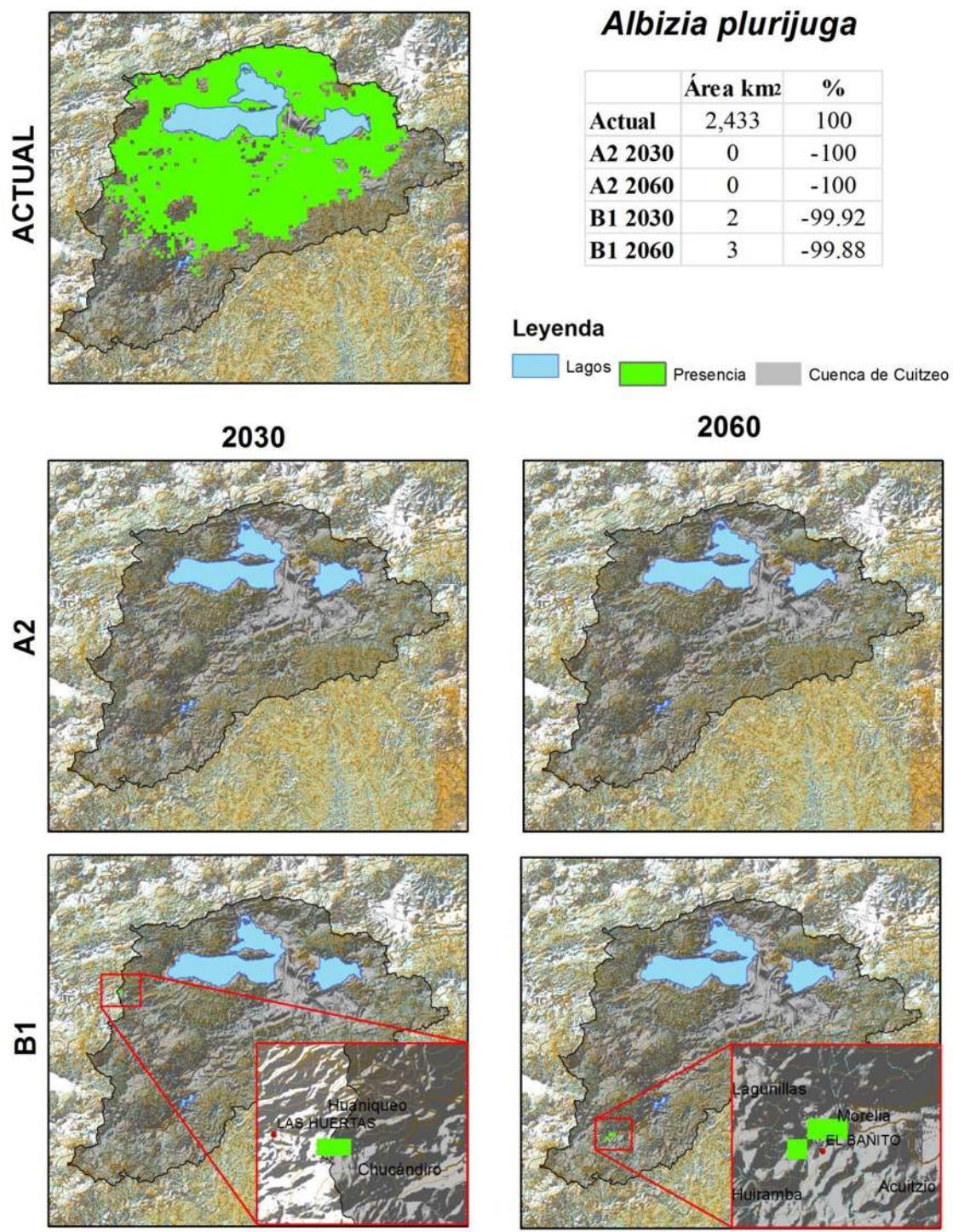


Figura 21.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para *Albizia plurijuga*.

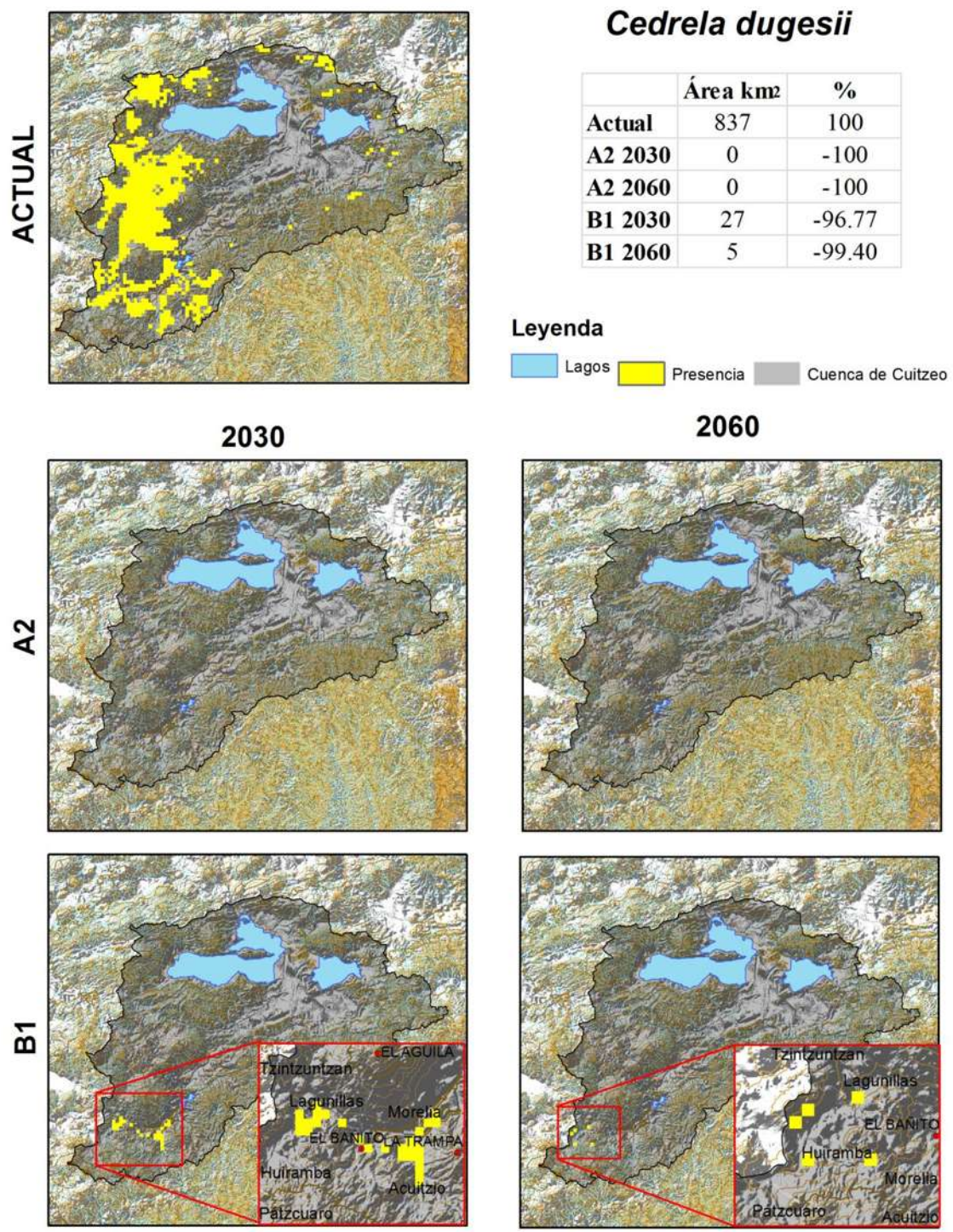


Figura 22.- Modelos de nicho ecológico con distintos escenarios de cambio climático para *Cedrela dugesii*

VI. DISCUSIÓN

Modelos de consenso

Dentro de la Cuenca de Cuitzeo, se observa que existe una diferencia en la distribución de las especies en los modelos climáticos actuales. La especie que presenta una mayor área de nicho climático dentro de la cuenca según ambos algoritmos es *A. plurijuga*, seguida por *C. aesculifolia* y la de menor área *C. dugesii*. Al realizar el modelo de consenso se observa que el área del nicho climático de las tres especies se reduce considerablemente, conservándose *A. plurijuga* como la de mayor área, seguida por *C. aesculifolia* y por último *C. dugesii*. La orientación que mayor coincidencia existe del nicho climático para las tres especies es en la parte noroeste de la Cuenca de Cuitzeo.

La distribución de los modelos de nicho climático está relacionada con la elevación donde se encuentra las especies (Sáenz-Romero *et al.* 2009, Ackerly *et al.* 2010, Pacheco *et al.* 2010, García-Valdés *et al.* 2013). También se reconocen la relación entre la altitud y el clima del lugar, la cual la temperatura decae aproximadamente 0.65 °C por cada 100 m (Sáenz-Romero *et al.* 2009). Esto se observa principalmente que las especies que se distribuyen en las partes bajas de la cuenca cerca del Lago de Cuitzeo donde es la elevación más baja (altitud de 1820 msnm) la temperatura será más cálida y a medida que nos alejemos a las partes elevadas (límites sur, oeste y este) las especies tendrían una preferencia más templada. De acuerdo al modelo, *C. dugesii* presenta una distribución hacia la parte oeste del lago en dirección al sur de la cuenca. Esta distribución le confiere a esta especie un rango de tolerancia climático más amplio en comparación con las otras especies. La distribución de *A. plurijuga* concuerda con el gradiente altitudinal propuesto por Arce *et al.* (2008), distribuyéndose cerca del Lago de Cuitzeo y expandiéndose hacia el sur, teniendo un gradiente de temperatura inferior a *C. dugesii* pero mayor que *C. aesculifolia*. Sin embargo, *C. aesculifolia* fue la especie que presentó un rango de temperatura y precipitación más reducida en comparación con las otras dos especies, distribuyéndose cerca del lago. Las tres especies concuerdan encontrarse dentro de un bosque tropical seco que según las condiciones ambientales que Pennington y Sarukhán (2005) y Rzedowski (2006) mencionan que presentan precipitaciones de 600-1200 mm y una temperatura de anuales superiores a 20 °C, quedando el modelo de consenso dentro de este rango. Aunque,

dentro de estas áreas hipotéticas de la Cuenca de Cuitzeo se encuentran bajo una fuerte presión principalmente de desarrollo urbano (asentamientos y zonas agrícolas) que han incrementándose casi el triple desde 1975 (López *et al.* 2007).

Efecto del cambio climático dentro de la Cuenca de Cuitzeo

Los escenarios catastróficos (A2) de cambio climático demuestran que las tres especies no encontrarán áreas aptas a partir de la década del 2030. Esto se debe a que ante un aumento de la temperatura su nicho climático migrará hacia partes más elevadas, para lo cual el incremento de 4.14% en la temperatura y la disminución del 6.34% de precipitación (para el modelo de cambio climático canadiense, CCGM3), no existirán altitudes dentro de la cuenca con el clima adecuado que sean aptas para las especies (Sáenz-Romero *et al.* 2009, Anderson 2013). El escenario moderado (B1) únicamente predice un aumento de 2.67% en 2030 y para el 2060 llegara a 5.89% y un decremento de precipitación de 2.75% en 2030 y bajara hasta 5.76%. En este escenario, *C. aesculifolia* desaparece de la cuenca al no existir su nicho climático en el 2030. Esto se pudiera deber a que la especie presenta un gradiente de temperatura y precipitación reducido, para lo cual el escenario moderado en el 2030 no existirá un nicho climático para la especie en la Cuenca de Cuitzeo. Mientras, el escenario moderado para las otras dos especies aún conservan un poco de su nicho climático dentro de la cuenca. Para *A. plurijuga* solo proyecta 2 km de su nicho climático al oeste de la cuenca en el 2030 para luego desplazarse hacia el sur encontrando únicamente 4km de su nicho climático para el 2060. Mientras, *C. dugesii* presenta una pérdida de 96.77% del área en el 2030 para el 2060 y disminuye 99.40% de su nicho climático en el 2060. Esto concuerda con lo sugerido por Pacheco *et al.* (2010) y García *et al.* (2013) quienes indican que aun perteneciendo al bosque tropical seco, las especies pueden responder de manera distinta al cambio climático.

Sin embargo, distintos investigadores han realizado predicciones con distintos modelos de circulación general y han llegado a estimar cual sería la velocidad con el que el nicho climático variaría en las próximas décadas. Ackerly *et al.* (2010), menciona que la velocidad del cambio climático será de 270 m cada año bajo el modelo PRISM con escenarios A1. Por otro lado, Sáenz-Romero *et al.*(2013) bajo el modelo canadiense estima que la altitud para realizar migración asistida para el escenario catastrófico en el 2030 será

de 400-450 msnm para *Pinus pseudostrobus* y para el 2060 estima que subir 600-800 msnm, para encontrar las mismas condiciones que las actuales. Aunque Fitzpatrick *et al.* (2008), en su investigación simuló una migración de 5 km² para varias especies de *Banksia* ssp, el cual obtuvo una pérdida de especies similar la simulación sin migración en tres escenarios de cambio climático. La distribución potencial en todos los escenarios de una especie (por ejemplo los lugares que tienen los ambientes adecuados para mantener las poblaciones) cuales son consideradas proyecciones geográficas de las condiciones del nicho ecológico, estas serían aún más pequeñas (colocándole los factores bióticos) si se pudiera proyectar el nicho realizado (Peterson *et al.* 1999b, Soberón y Peterson 2005, Soberón 2007, Peterson *et al.* 2008, Mateo *et al.* 2011, Anderson 2013, Franklin 2013). Estas proyecciones son preocupantes, ya que el escenario que se prevé que ocurra en un futuro es el A2 donde habrá desaparecido el nicho climático de las especies en la cuenca.

Se prevé que lo que pudiese ocurrir a las especies bajo cambio climático son tres sucesos: adaptarse, migrar o desaparecer (Peterson *et al.* 2001, FAO 2008, Fitzpatrick *et al.* 2008, Wright 2010). Las especies de los bosques tropicales presentan algunas adaptaciones como cortezas más gruesas (adaptaciones contra el fuego), hojas menores y gruesas (adaptación contra la desecación), espinas y espolones (adaptación contra herbívoros), raíces más largas (para alcanzar la capa freática que se encuentra más profunda) entre otras adaptaciones (Daubenmire 1982). Estas adaptaciones que permiten existir a un organismo en condiciones de su hábitat se debe a procesos de selección ocurridos hace millones de años en respuesta a diferentes factores. En la actualidad, este proceso se está acelerando a un ritmo alarmante en el cual muchas de las especies posiblemente no se lleguen a adaptarse con facilidad, lo que sugiere que puedan desaparecer. El área hipotética que muestran estos modelos no toma en cuenta la carpeta asfáltica que va incrementando de manera exponencial y que afecta el establecimiento de varias especies, favoreciendo más su desaparición (López *et al.* 2007). En cuanto a migrar, podría depender de la capacidad de dispersión entre otros factores, para que pudiesen llegar al nicho ecológico donde puedan mantener sus poblaciones. Sin embargo, una opción para poder ayudar a que la especie sobreviva en un futuro se puede hacer mediante migración asistida llevándola hacia lugares donde en algunos años se encontrara su nicho climático por efecto del cambio climático (Soto-Correa *et al.* 2012). Esto se debe a que la distribución que presenta las especies

actualmente, el paisaje cambiara paulatinamente a un ambiente más árido por el aumento de temperatura y el descenso de la precipitación.

De los resultados obtenidos en esta investigación sobre cambio climático se estima que el escenario climático que tiene mayor probabilidad de ocurrencia es el A2, por la tendencia del incremento de CO₂ que es similar al actual, el cual fue el escenario en el que desaparecieron todas las especies de la Cuenca de Cuitzeo.

VII. CONCLUSIONES

- La distribución geográfica y ecológica en el escenario actual de *Ceiba aesculifolia* mostró ser más restringida en comparación con otras especies.
- Bajo el escenario catastrófico (A2) el nicho climático desaparecerá para todas las especies.
- El efecto del cambio climático afectará a *C. aesculifolia* bajo dos escenarios en ambas décadas.
- El escenario moderado (B1) reducirá más del 95 hasta un 99% a *Cedrela dugesii* y para *Albizia plurijuga* será poco más del 99% de su área en comparación con su distribución actual.
- La distribución que presenta las especies actualmente, el paisaje cambiara paulatinamente a un ambiente más árido por el aumento de temperatura y el descenso de la precipitación.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ackerly, D. D., S. R. Loarie, W. K. Cornwell, S. B. Weiss, H. Hamilton, R. Branciforte y J. B. Kraft. 2010. The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16:476-487.
- Anderson, R. P. 2013. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York academy of sciences* 1297:8-28.
- Anderson, R. P., D. Lew y A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 16:211-232.
- Anderson, R. P. y E. Martínez-Meyer. 2004. Modeling species' geographic distribution for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation* 116:167-179.
- Anderson, R. P., A. T. Peterson y M. Gómez-Laverde. 2002. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South America pocket mice. *Oikos* 98:3-16.
- Banks, W. E., F. d'Errico y J. Zilhão. 2013. Human-climate interaction during the Early Upper Paleolithic: testing the hypothesis of an adaptive shift between the Proto-Aurignacian and the Early Aurignacian. *Journal of Human Evolution* 64:39-55.
- Barve, N. 2008. Tool for Partial-ROC. Biodiversity Institute, Lawrence, KS ver 1.0.
- Bolívar-Cimé, B. d. S. 2009. Análisis del hábitad óptimo y modelado de nicho ecológico para la conservación del venado cola blanca en el centro de Veracruz. Instituto de Ecología A-C, Xalapa, Veracruz. pp. 93
- Calderón, G. d. R. y M. T. Germán. 1993. Meliaceae. En: J. Rzedowski y G. d. R. Calderón, (Ed.). *Flora del bajío y regiones adyacentes. Fascículo 11.* Instituto de Ecología, A.C. (INECOL). Pátzcuaro, Michoacán. pp. 1-9
- Carranza-González, E. y A. Blanco-García. 2000. Bombacaceae. En: J. Rzedowski y G. C. d. Rzedowski, (Ed.). *Flora del bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 90.* Instituto de Ecología, A.C. Patzcuaro, Michoacán. pp. 13
- Cavers, S., A. Telford, F. Arenal-Cruz, A. J. Perez-Castañeda, R. Valencia, C. Navarro, A. Bounamici y A. J. Lowe. 2013. Cryptic species and phylogeographical structure in the *Cedrela odorata* L. Throughout the Neotropics. *Journal of Biogeography* 40:732-346.
- Cayuela, L. 2006. Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas* 15:191-196.
- CCCma. 2013. <http://www.ec.gc.ca/Publications/222FF4CC-EA94-4243-9886-36D138490C50%5CCanadianCentreForClimateModellingAndAnalysis.pdf>. (Junio, 2013).
- CIAT. 2012. <http://www.ccafs-climate.org/data/>. (Julio, 2013).
- Cintrón, B. B. 1990. *Cedrela odorata* L. En: R. M. Burns y B. H. Honkala, (Ed.). *Silvics of North America. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Washington, D.C.* pp. 128-134
- CONABIO. 2012a. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/36-melia2m.pdf. (Junio, 2012).
- CONABIO. 2012b. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (Junio, 2013).
- CONAFOR. 2013. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/898Cedrela%20odorata.pdf>. (Junio, 2012).
- Cuevas-Reyes, P. y J. I. Vega-Gutiérrez. 2012. Cambios en la estructura, composición y Fenología de plantas epífitas bajo diferentes estadios de sucesión vegetal en un bosque tropical seco. *Biologías* 14:37-44.

- Chefaoui, R. M., J. Hortal y J. M. Lobo. 2005. Potential distribution modelling, niche characterization and conservation status assessment using GIS tools: a case study of Iberian *Copris* species. *Biological Conservation* 122:327-338.
- Daubenmire, R. F. 1982. *Ecología vegetal. Tratado de autoecología de plantas.* edición. Limusa, México. pp. 496.
- Dick, C. W. y J. Wrigth. 2005. Tropical Mountain cradles of dry forest diversity. *PNAS* 102:10757-10758.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudick, Y. E. Chee y C. J. Yates. 2011. A statistic explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57.
- FAO. 2008. http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2006/1000247/article_1000248es.html. (Julio, 2012).
- Fitzpatrick, M. C., A. D. Gove, N. J. Sanders y R. R. Dunn. 2008. Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: the *Banksia* (Proteaceae) of Western Australia. *Global Change Biology* 14:1337-1352.
- Franklin, J. 2013. Species distribution models in conservation biogeography: developments and changes. *Diversity and Distributions* 19:1217-1223.
- Ganeshiah, K. N., N. Barve, K. Chandrashekar, M. Swamy y R. U. Shaanker. 2003. Predicting the potential geographical distribution of the sugarcane woolly aphid using GARP and DIVA-GIS. *Concurrent Science* 85:1526-1528.
- García-Valdés, R., M. A. Zavala, M. B. Araújo y D. W. Purves. 2013. Chasing a moving target: projecting climate change-induced shifts in non-equilibrium tree species distributions. *Journal of Ecology* 101:441-453.
- GBIF. <http://www.gbif.org/>. (Junio, 2013).
- Germán-Ramírez, M. T. 2005. Meliaceae. En: A. N. Retana, (Ed.). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.* Fascículo 42. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D. F. pp. 24
- Gillespie, T. W., A. Grijalva y C. N. Farris. 2000. Diversity, composition, and structure of tropical dry forest in Central America. *Plant Ecology* 147:37-47.
- Gómez-Díaz, J. D., A. I. Monterroso-Rivas y J. ä. Tinoco-Rueda. 2007. Distribucion del cedro rojo (*Cedrela odorata* L) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 13:29-49.
- Herrerías-Diego, Y., M. Quesada, K. E. Stoner y J. A. Lobo. 2005. Effects of forest fragmentation on phenological patterns and reproductive success of tropical dry forest tree *Ceiba aescualifolia*. *Conservation Biology* 20:1111-1120.
- Hijmans, R., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978.
- Hsu, R. C.-C., W. L. M. Tamis, N. Raes, G. R. d. Snoo, J. H. D. Wolf, G. Oostermeijer y S.-H. Lin. 2012. Simulating climate change impacts on forest and associated vascular epiphytes in a subtropical island of East Asia. *Diversity and Distributions* 18:334-347.
- Hurtado-Aguilar, C. A. 2007. Usos de modelos de predicción como herramienta para estimar el área de distribución potencial de la especie *Aniba perutilis* Hemsley (Comino Crespo) en el departamento del Valle del Cauca. Doctorado. Fundación universitaria de Popayán, Colombia. pp. 72
- Iloldi-Rangel, P., V. Sánchez-Cordeo y A. T. Peterson. 2004. Predicting distribution of Mexican mammals using ecological niche modeling. *Journal of Mammalogy* 85:658-662.
- INEGI. 2013a. <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/>. (Junio, 2013).
- INEGI. 2013b. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescala.aspx>. (Julio, 2013).

- IPCC. 2001. Cambio Climático 2001; Informe de síntesis. 3ra edición. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al tercer Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)], Wembley, Reino Unido. pp. 38.
- IPCC. 2007. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. 4ta edición. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)], Ginebra, Suiza. pp. 104.
- IPCC. 2013. http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#UZRU3ErAGSp. (Junio, 2013).
- IUCN. 2012. <http://www.iucnredlist.org/search>. (Mayo, 2013).
- Kalacska, M., G. A. Sanchez-Azofeifa, J. C. Calvo-Alvarado, M. Quesada, B. Rivard y D. H. Janzen. 2004. Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management* 200:227-247.
- Kozak, K. H. y J. J. Wiens. 2006. Does niche conservatism promote speciation? a case study in north american salamanders. *Evolution* 60:2604-2621.
- Leal-Nares, O. A., M. E. Mendoza y E. Carranza-González. 2010. Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. *Investigaciones Geográficas*:49-67.
- Loiselle, B. A., P. M. Jorgensen, T. Consiglio, I. Jiménez, J. G. Blacke, L. G. Lohmann y O. M. Montiel. 2008. Predicting species distributions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes? *Journal of Biogeography* 35:105-116.
- López, E., M. E. Mendoza, G. Bocco y A. Acosta. 2007. Crecimiento urbano y sus consecuencias a nivel regional en la cuenca del lago de Cuitzeo, México En: R. S. Rodríguez y A. Bonilla, (Ed.). *Urbanización cambios globales en el ambiente y desarrollo sustentable en América latina*. Instituto Iberoamericano para la Investigación sobre el Cambio Global (IAI), Instituto Nacional de Ecología (INE), United Nations Environment Programme (UNEP). Sao José Campos, Brasil. pp. 216
- Luna-Vega, I., O. Alcántara-Ayala, R. Contreras-Medina y C. A. Rios-Muños. 2012. Ecological niche modeling on the effect of climatic change and conservation of *Ternstroemia lineata* DC. (Ternstroemiaceae) in Mesoamerica. *Botany* 90:637-650.
- Martínez-Cabrera, H. I., C. D. Schlichting, J. A. Silander y C. S. Jones. 2012. Low levels of climate niche conservatism may explain clade diversity patterns in the South African genus *Pelargonium* (Geraniaceae). *American Journal of Botany* 99:954-960.
- Martínez-Meyer, E. 2005. Climate change and biodiversity: some consideration in forecasting shifts in species' potential distribution. *Biodiversity Informatics* 2:42-55.
- Mateo, R. G., A. M. Felicísimo y J. Muños. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *revista Chilena de Historia Natural* 84:217-240.
- McVaugh, R. 1987. Albizia. *Flora Novo Galicia* 5:143-147.
- Meli, P. 2003. Restauración ecológica de bosques tropicales. Veinte años de Investigación académica. *Interciencia* 28:581-589.
- Muellner, A. N., T. D. Pennington y M. W. Chase. 2009. Molecular phylogenetics of Neotropical Cedreleae (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal Multiple origins of "*Cedrela odorata*". *Molecular Phylogenetics and Evolution* 52:461-469.

- Muellner, A. N., T. D. Pennington, A. V. Koecke y S. S. Renner. 2010. Biogeography of *Cedrela* (Meliaceae, Sapindales) in Central and South America. *American Journal of Botany* 97:511-518.
- Murphy, B. P. y D. M. J. S. Bowman. 2012. What controls the distribution of tropical forest and savanna? *Ecological Letters* 15:748-758.
- Murphy, P. G. y A. E. Lugo. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:67-88.
- Ortega-Huerta, M. A. y A. T. Peterson. 2008. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79:205-216.
- Ortega-Rodríguez, J. M. 2003. Evaluación multicriterio y sistemas espaciales de toma de decisiones aplicados a la planeación del uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. pp. 148
- Ortega-Rodríguez, J. M. 2009. Aplicaciones, ventajas y limitaciones del modelaje del nicho ecológico para el manejo y conservación de grupos con diferentes historias de vida. Doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia. pp. 95
- Pacheco, S., L. R. Malizia y L. Cayuela. 2010. Effects of Climate Change on subtropical forest of South America. *Tropical Conservation Science* 3:423-437.
- Papes, M. y P. Gaubert. 2007. Modelling ecological niches from low numbers of occurrences: assessment of conservation status of poorly known viverrids (Mammalia, Carnivora) across two continents. *Diversity and Distributions* 13:890-902.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura y A. T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34:102-117.
- Pennington, T. D. y J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Tercera edición. Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica, México, D. F. pp. 523.
- Peterson, A. T. 2003. Predicting the geography of species invasions via ecological niche modeling. *The quarterly review of biology* 78:419-433.
- Peterson, A. T., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberon, R. H. Buddemeier y D. R. B. Stockwell. 2002. Future Projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416:627-629.
- Peterson, A. T., M. Papes y M. Eaton. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt. *Ecography* 30:550-560.
- Peterson, A. T., M. Papes y J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modelling. *Ecological Modelling* 213:63-72.
- Peterson, A. T. y R. Robins. 2003. Using ecological-niche modeling to predicting barred owl invasions with implications for spotted owl conservation. *Conservation Biology* 17:1161-1165.
- Peterson, A. T., V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R. W. Buddemeier y A. G. Navarro-Siguenza. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling* 144:21-30.
- Peterson, A. T., J. Soberon y V. Sánchez-Cordero. 1999a. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285:1265-1267.
- Peterson, A. T., J. Soberón y V. Sanchez-Cordero. 1999b. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 286:1265-1267.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modelling* 190:231-259.

- Phillips, S. J., M. Dudik y R. E. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *International Conference on Machine Learning*:655-662.
- Plissock, P. y T. Fuentes-Castillo. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y el espacio una nueva revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* 48:61-79.
- QiJin, H. y Z. GuangSheng. 2011. The climatic suitability for maize cultivation in China. *Atmospheric Science* 57:1-9.
- Quesada, M., G. A. Sanchez-Azofeifa, M. Alvarez-Añorve, K. E. Stoner, L. Avila-Cabadilla, J. Calvo-Alvarado, A. Castillo, M. M. Espirito-Santo, M. Fagundes, G. W. Fernandez, J. Gamon, M. Lopezaraiza-Mikel, D. Lawrence, L. P. C. Morellato, J. S. Powers, F. d. S. Neves, V. Rosas-Guerrero, R. Sayago y G. Sanchez-Montoya. 2009. Succession and management of tropical dry forest in the Americas: Review and new perspectives. *Forest Ecology and Management* 258:1014-1024.
- Quigley, M. F. y W. J. Platt. 2003. Composition and structure of seasonally deciduous forest in the Americas. *ecological Monographs* 73:87-106.
- Reed, S. C., T. E. Wood y M. A. Cavalen. 2011. Tropical forests in a warming world. *New Phytologist* 193:27-29.
- REMIB. 2008. http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html. (Junio, 2013).
- Rico-Arce, M. d. L., S. L. Gale y N. Maxted. 2008. A taxonomic study of *Albizia* (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) in Mexico and Central America. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 65.
- Rojas-Soto, O., V. Sosa y J. F. Ornelas. 2012. Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity Conservation* 21:2671-2690.
- Rubén, J. 2003. Bosques y selvas tropicales como fuente de medicamentos. *Boletín latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 2:16-21.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1ra edición. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. pp. 504.
- Rzedowski, J. 2007. *Albizia*. En: J. Rzedowski y G. d. R. Calderón, (Ed.). *Flora del bajío y de regiones adyacentes*. Fascículo 150. Instituto de Ecología, A.C. Patzcuaro, Michoacán. pp.
- Sáenz-Romero, C., N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 y 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on vegetation. *Climate Change* 102:595-623.
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval y J. Beaulieu. 2009. Estimaciones de cambio climático para Michoacán. 1ra edición. Cuadernos de divulgación Científica y Tecnológica del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán, Morelia. pp. 22.
- SEMARNAT. 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Ambientales.
- Soberón, J. 2007. Grennellian and Etonian niches and geographic distribution of species. *Ecological Letters* 10:1-9.
- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2004. Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *The Royal Society*:689-698.
- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of Fundamental Ecological Niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- Soto-Correa, J. C., C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, N. Sánchez-Vargas y J. Cruz-de-León. 2012. Variación genética entre procedencias de *Lupinus elegans* Kunth, zonificación altitudinal y migración asistida. *Agrociencia* 45:593-608.

- Stockwell, D. y D. Peters. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions automated spatial prediction. *Geographical Information Science* 13:143-158.
- Warren, D. L. 2012. In defense of 'niche modeling. *Trends in ecology and evolution* 27:497-500.
- Warren, D. L., R. E. Glor y M. Turelli. 2008. Environmental Niche Equivalency versus Conservatism: Quantitative approaches to niche evolution *Evolution* 62:2868-2883.
- Wiens, J. J. y C. H. Graham. 2005. Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 36:519-539.
- WorldClim. 2005. <http://www.worldclim.org/>. (Junio, 2013).
- Wright, S. J. 2010. The future of tropical forests. *The Year in Ecology and Conservation Biology* 1195:1-27.