

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



NICHO ECOLÓGICO Y DISTRIBUCIÓN DE TRES ESPECIES DE AGAVE EN
MÉXICO: UN ENFOQUE BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Tesis

Que presenta ROCÍO MENDIETA OVIEDO

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo Coahuila

Diciembre 2022

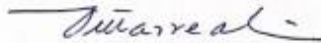
NICHO ECOLÓGICO Y DISTRIBUCIÓN DE TRES ESPECIES DE AGAVE EN
MÉXICO: UN ENFOQUE BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Tesis

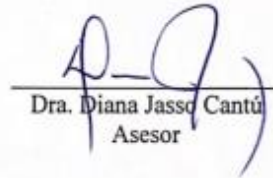
Elaborada por ROCÍO MENDIETA OVIEDO como requisito parcial para obtener el
Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría.



Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal



Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla
Asesor



Dra. Diana Jasso Cantú
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirección de Postgrado
UAAAN

Agradecimientos

A dios por darme la fuerza y sabiduría de llegar hasta aquí, mi agradecimiento es infinito. A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por otorgarme un hogar durante esta etapa de mi vida permitiéndome realizar mis estudios profesionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico el cual me permitió continuar con mis estudios profesionales.

Al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción aunado al personal académico y administrativo por su infinito apoyo en este lapso de mi vida.

Al Dr. Jorge Méndez González por apoyarme en todo momento, por confiar en mí y darme la inspiración de seguir con mi formación profesional, por compartir sus conocimientos sin escatimación alguna, por sus consejos, por su infinita paciencia, simplemente gracias, por tanto.

Al Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla, M.C. José Oscar Manuel López Díaz y a la Dra. Diana Jasso Cantú por formar parte de este equipo en esta investigación, por sus recomendaciones, disponibilidad de apoyo en todo momento y por la amistad brindada.

A las maravillosas personas con las que compartí grandiosos momentos en este lapso de mi vida: Fátima Méndez Encina y familia mi agradecimiento es infinito hacia ustedes, Ervidan Pérez Días, Marisol Gomes Santos, Marcela Rivera Contreras, Fátima Argüello García y Elena.

Sin omitir a nadie gracias a todas esas personas que han formado parte de mi vida.

Dedicatoria

A mis bellos padres Juan Mendieta Sanjuan y Honorina Oviedo Arredondo por su cariño y apoyo incondicional día a día, por los consejos y la inspiración de seguir mi vida profesional, por la confianza en mí, por estar siempre ahí cuando los necesito, gracias, por tanto.

A mis adorables tíos, mis segundos padres Isidoro Mendieta Sanjuan y Carolina Mendieta Sanjuan por su cariño y apoyo incondicional en todo momento, por ser los motores de mi vida desde que tengo memoria, si he llegado hasta aquí en gran parte se los debo a ustedes mis fieles y leales consejeros.

A los hermanos más lindos que dios me regalo Juan Martin Mendieta Oviedo, Juan Mendieta Oviedo, Rosalina Mendieta Oviedo y Oscar Isidoro Mendieta Oviedo ustedes mi inspiración para seguir y ser un buen ejemplo, por su apoyo sin escatimación alguna mi agradecimiento es infinito para ustedes mis niños ¡los adoro!

A mis primos consentidos Isidoro Mendieta Salinas y Efraín Mendieta Salinas por su cariño incondicional, quienes han sido como mis hermanos.

A mis tiernos abuelitos Isidoro Mendieta Salinas[†], aunque no estés en estos momentos siempre estarás en mi corazón y siempre habrá un cariño que nos unirá más allá de lo terrenal, Teresa Sanjuan Flores mi viejita chula siempre apoyándome desde que tengo memoria, Ruperto Oviedo[†] y Polonia Arredondo por su cariño incondicional siempre, a la Sra. Guadalupe González González no es mi abuelita de sangre, pero es como si lo fuera realmente, por sus consejos y cariño incondicional desde que la conocí.

A todos mis familiares por su cariño incondicional siempre.

Índice General

Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
Índice de Cuadros.....	viii
Índice de Figuras	ix
Resumen.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract	xiii
Abstract	xiv
Introducción	1
Revisión de Literatura.....	3
Descripción, distribución e importancia de <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave duranguensis</i> , <i>Agave salmiana</i> ssp.	3
Modelos de distribución de especies (MDS) y nicho ecológico (MNE).....	4
Diagrama de BAM	5
Cambio climático	5
Modelos de Circulación General (MCG)	5
Trayectorias de concentración representativas	6
MaxEnt (Máxima Entropía) y Programa estadístico R	6
Estudios sobre distribución de especies	7
Materiales y Métodos	9
Área de estudio	9
Registros de presencia de la especie y limpieza.....	9
Variables bioclimáticas y selección.....	10
Área de calibración.....	10

Proceso de modelación	11
Selección del modelo.....	11
Estratificación de modelos de idoneidad	11
Estimación de la incertidumbre del modelo de nicho	12
Tipo de áreas idóneas identificadas al transferir el modelo de nicho.....	12
Validación de la transferencia del modelo de nicho.....	12
Perfil Bioclimático	12
Resultados	14
Modelos de idoneidad de <i>A. cupreata</i> , <i>A. durangensis</i> y <i>A. salmiana</i> ssp.....	14
Variables que predicen la distribución de <i>A. cupreata</i> , <i>A. durangensis</i> y <i>A. salmiana</i> ssp.....	14
Nicho fundamental de <i>A. cupreata</i> , <i>A. durangensis</i> y <i>A. salmiana</i> ssp.....	15
Respuesta de las variables ambientales	17
Áreas de idoneidad climática actual y futura (2050).....	18
Incertidumbre del modelo de nicho y transferencia del modelo (MOP).....	20
Nuevas áreas idóneas, vulnerables y no vulnerables al cambio climático	23
Perfil bioclimático de <i>A. cupreata</i> , <i>A. durangensis</i> y <i>A. salmiana</i> ssp.	28
Vulnerabilidad de <i>A. cupreata</i> , <i>A. durangensis</i> y <i>A. salmiana</i> ssp. al 2050.....	32
Discusión.....	33
Modelos candidatos en MNE	33
Registros de presencia e importancia de variables bioclimáticas.....	33
Idoneidad climática actual y futura (2050).....	35
Transferencia de los modelos al 2050	36
Perfil bioclimático	37
Conclusiones	38

Referencias.....39

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Modelos candidatos generados, estadísticos de ajuste y validación para las tres especies de <i>Agave</i>	14
Cuadro 2. Contribución porcentual de las variables bioclimáticas en los modelos de distribución de <i>Agave cupreata</i> ¶, <i>Agave durangensis</i> § y <i>Agave salmiana</i> £ ssp.	15
Cuadro 3. Diferencia porcentual de superficie de idoneidad actual comparada con proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general para el 2050 estimadas a través del modelo de nicho para <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> , y <i>Agave salmiana</i> ssp.....	20
Cuadro 4. Tipos de áreas calculadas estimadas a partir de un umbral de idoneidad climática de ≥ 0.33 , del modelo de nicho, promedio de climatologías de tres modelos de circulación general, ante dos escenarios climáticos al 2050.	25
Cuadro 5. Variables de mayor contribución al modelo de idoneidad de <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> y <i>Agave salmiana</i> ssp. que componen el perfil climático actual y futuro.	31
Cuadro 6. Criterios para evaluar la vulnerabilidad de <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> y <i>Agave salmiana</i> ssp. al cambio climático.	32

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de las especies de <i>Agave</i> en el área de calibración, a) <i>Agave cupreata</i> , b) <i>Agave durangensis</i> y c) <i>Agave salmiana</i> ssp.....	9
Figura 2. Espacio ambiental (a, c, e) y geográfico (b, d, f) de, <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> y <i>Agave salmiana</i> ssp. creado con la Bio 1 y la Bio 12, los puntos grises (5000) corresponden a los valores de las Bios, verdes (151) a los registros de <i>Agave cupreata</i> , azules (74) <i>Agave durangensis</i> y rojos (80) <i>Agave salmiana</i> ssp.	17
Figura 3. Respuesta de la idoneidad climática a las dos variables climáticas de mayor contribución al modelo de <i>Agave cupreata</i> (a, b), <i>Agave durangensis</i> (c, d) y <i>Agave salmiana</i> ssp (e, f).	18
Figura 4. Idoneidad actual (a, d, g) y futura al 2050 en el área M (área de calibración) utilizando el promedio de tres modelos de circulación general, CCSM4, HadGEM y MIROC5 en dos escenarios de concentración de CO ₂ 4.5 (b, e, h) y 8.5 (c, f, i) para <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> , y <i>Agave salmiana</i> ssp.	19
Figura 5. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promediada de tres MCG (CCSM4, HadGEM y MIROC5), en dos escenarios de concentración de CO ₂ , RCP 4.5 (a, e, i) y 8.5 (b, f, j) para el modelo de nicho ecológico de <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> y <i>Agave salmiana</i> ssp. incertidumbre promedio de las predicciones de idoneidad climática de los modelos de circulación general en los dos escenarios 4.5 (c, g, k) y 8.5 (d, h, i) de las tres especies.	22
Figura 6. Áreas (NAI, AIV, AINV) estimadas en el área M (a, c, e, g, i, k) y en todo el mundo (b, d, f, h, j, l) para <i>Agave cupreata</i> , <i>Agave durangensis</i> y <i>Agave salmiana</i> ssp. utilizando tres MCG (CCSM4, HadGEM y MIROC5) bajo dos escenarios de concentración de CO ₂ RCP 4.5 (a, b, e, f, i, j) y 8.5 (c, d, g, h, k, l).	25
Figura 7. Prueba de Kruskal-Wallis and Dunn pairwise Tests (p-values) realizada los valores de altitud de los diferentes tipos de áreas donde: NAI = Nuevas Áreas Idóneas, AINV = Áreas Idóneas no Vulnerables, AIV = Áreas Idóneas Vulnerables, en dos escenarios climáticos, moderado (RCP 8.5, arriba) y drástico (RCP 8.5 (abajo).	26
Figura 8. Relación de idoneidad con altitud para <i>Agave cupreata</i> (a), <i>Agave durangensis</i> (b) y <i>Agave salmiana</i> ssp. (c).	27

Figura 9. Cambios de precipitación y temperatura esperados al 2050 sobre el área de distribución actual de *Agave cupreata* (a, b), *Agave durangensis* (c, d) y *Agave salmiana* ssp. (e f) promedio de tres MCG bajo dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) relacionados con altitud y latitud, en la variable bioclimática de mayor contribución de cada especie.28

Resumen

**NICHO ECOLÓGICO Y DISTRIBUCIÓN DE TRES ESPECIES DE AGAVE EN
MÉXICO: UN ENFOQUE BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

POR:

ROCÍO MENDIETA OVIEDO

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

ASESOR PRINCIPAL: JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ

Saltillo, Coahuila, diciembre 2022

Resumen

Los Agaves en México son importantes por sus múltiples usos. El aprovechamiento de *Agave cupreata* Trel. & Berger, *Agave durangensis* Gentry y *Agave salmiana* Otto Salm Dick ssp. *crassispina* (Trel Gentry), está ejerciendo presión sobre sus comunidades por la producción de mezcal, siendo necesario actividades de conservación por los posibles escenarios climáticos futuros. El objetivo de este estudio fue analizar los efectos del cambio climático sobre la distribución potencial de las tres especies a través de modelos de nicho ecológico (MNE). El estudio se realizó en México con registros de presencia de la especie y variables bioclimáticas actuales y futuras (2050). Se generó el área de calibración de cada especie, se crearon y evaluaron los modelos en kuenm, un paquete de R que usa como algoritmo de modelación a Maxent, los modelos candidatos se eligieron con base a varios criterios estadísticos. El modelo final se estratificó en idoneidad alta, media y baja; la transferencia del modelo se evaluó a través del MOP. Se crearon 490 modelos para *A. cupreata*, 560 para *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. Las variables de precipitación: Bio 17 y Bio 13, determinan la distribución de *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp., contribuyendo al modelo con 62.8 y 56.8 %. En *A. cupreata* la temperatura mínima del mes más frío (Bio 6) determina su distribución (62.5 %), siendo esta especie la más vulnerable al cambio climático junto con *A. salmiana* ssp. bajo posibles escenarios climáticos. Las tres especies podrían perder hasta 88.5 % del área de idoneidad alta actual bajo escenarios drásticos (R.C.P. 8.5). Para *A. cupreata* y *A. salmiana* ssp., se predicen pequeñas nuevas áreas idóneas en otros países, mismas que fueron validadas por el MOP. En *A. salmiana* ssp. y *A. durangensis* existe una relación positiva entre idoneidad y altitud, lo cual no ocurre en la otra especie. En el área de calibración se podrían registrar hasta 0.50 ° C más al 2050 (*A. cupreata*), -0.9 mm (*A. durangensis*) y 20 mm (*A. salmiana* ssp.) en Bio 6, Bio 17 y Bio 13.

Palabras clave: Agaves, kuenm, Maxent, Modelos de Nicho Ecológico

Abstract

ECOLOGICAL NICHE AND DISTRIBUTION OF THREE AGAVE SPECIES IN
MEXICO: AN APPROACH UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

BY

ROCÍO MENDIETA OVIEDO

MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

PRINCIPAL ADVISOR: JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ

Saltillo, Coahuila, december 2022

Abstract

Agaves in Mexico are important for their multiple uses. The use of *Agave cupreata* Trel. & Berger, *Agave durangensis* Gentry and *Agave salmiana* Otto Salm Dick ssp. *crassispinata* (Trel Gentry) is putting pressure on their communities for the production of mezcal, conservation activities being necessary due to possible future climate scenarios. The objective of this study was to analyze the effects of climate change on the potential distribution of the three species through ecological niche models (ENM). The study was carried out in Mexico with records of the presence of the species and current and future bioclimatic variables (2050). The calibration area of each species was generated, the models were created and evaluated in kuenm, an R package that uses Maxent as a modeling algorithm. Candidate models were chosen based on various statistical criteria. The final model was stratified into high, medium, and low suitability; the transfer of the model was evaluated through the MOP. A total of 490 models were created for *A. cupreata*, 560 for *A. durangensis* and *A. salmiana* ssp. Precipitation variables: Bio 17 and Bio 13, determine the distribution of *A. durangensis* and *A. salmiana* ssp., contributing to the model with 62.8 and 56.8 %. In *A. cupreata* the minimum temperature of the coldest month (Bio 6) determines its distribution (62.5 %), this species being the most vulnerable to climate change together with *A. salmiana* ssp. under possible climate scenarios. The three species could lose up to 88.5% of the current high suitability area under drastic scenarios (R.C.P. 8.5). For *A. cupreata* and *A. salmiana* ssp., small new suitable areas are predicted in other countries, which were validated by the MOP. In *A. salmiana* ssp. and *A. durangensis* there is a positive relation between suitability and altitude, does not occur in the other species. In the calibration area, could be registered 0.50 ° C more than 2050 (*A. cupreata*), -0.9 mm (*A. durangensis*) and 20 mm (*A. salmiana* ssp.) in Bio 6, Bio 17 and Bio 13.

Key words: Agaves, kuenm, Maxent, Ecological Niche Models

Introducción

Los Agaves son especies importantes culturalmente y económicamente para las actividades humanas desde hace más de 10000 años por sus diferentes usos entre los más importantes la producción de bebidas como pulque y mezcal (Figueredo *et al.*, 2021). Son especies interesantes por su diversidad y sus adaptaciones en zonas áridas y semiáridas (Eguiarte *et al.*, 2021) y son endémicas de México (Nava *et al.*, 2014). Considerando la información de Consejo Regulador del Mezcal (CRM) en la última década la producción de mezcal ha aumentado 37 % en exportación y 10 % en México la cual viene principalmente de los estados Oaxaca con (90%), Puebla (3,2%), Durango (2,5%), Zacatecas (1,7%) y Guerrero (1,1%) (CRM, 2020; Olvera *et al.*, 2022). Las especies de estudio (*Agave cupreata* Trel., *Agave durangensis* Gentry y *Agave salmiana* Otto Salm Dick ssp. *crassispina* (Trel Gentry)) aportan a la producción de mezcal en el país (Almaraz *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2011; Lara y Alpuche, 2016) aunque actualmente su aprovechamiento intensivo está provocando presión sobre ellas (Martínez *et al.*, 2011; Loera *et al.*, 2018).

Actualmente los cambios significativos en el clima han repercutido en la biodiversidad (Hosni *et al.*, 2020). El cambio climático ha conllevado a condiciones ambientales más secas (Stewart, 2015) y aunque las especies de Agave sean resistentes a condiciones drásticas con altas y bajas temperaturas se ha demostrado que su distribución se ve afectada por dicho suceso (Gómez y Lacher Jr, 2019), sometiéndolas a estrés provocando que disminuya su potencial productivo y en algunos casos a que mueran (Rodríguez *et al.*, 2018).

Los Modelos de nicho ecológico (MNE) y distribución de especies (MDS) son un conjunto de técnicas para analizar los factores que afectan la distribución potencial de las especies (Mohammadi *et al.*, 2019), que tienen como objetivo predecir la idoneidad de las especies en función de sus registros de presencia y variables tanto ambientales (precipitación y temperatura) como no ambientales (topográficas) (Phillips *et al.*, 2006). Maxent (Máxima Entropía) es una de las herramientas más actuales para modelar distribución de especies (Pliscoff y Fuentes, 2011) está comprobado que es uno de los

software's más viables para inferir y predecir aunado a tolerancias ambientales a través de datos de presencia (Warren y Seifert, 2011).

El cambio climático se ha convertido un tema de interés en los últimos años por los posibles efectos en los ecosistemas (Blois *et al.*, 2013). Los métodos de modelado se han convertido en una técnica viable para evaluar los efectos del cambio climático en las especies considerando que a través de registros de presencia se puede predecir la distribución de las especies bajo diferentes escenarios (Dormann, 2007; Pliscoff y Fuentes, 2011). Está demostrado que bajo los efectos del cambio climático las especies disminuyen su idoneidad actual (Gómez y Lacher Jr, 2019; Vargas *et al.*, 2020) estimándose que a futuro estas migren a mayores altitudes (Gómez y Lacher Jr., 2019).

Los objetivos de este estudio fueron: 1) generar un modelo de nicho ecológico para predecir la distribución actual y potencial de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. usando climatologías actuales y proyecciones climáticas al 2050 de tres modelos de circulación (MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4), bajo dos vías de concentración una moderada (RCP 4.5) y otra drástica (RCP 8.5), 2) crear el perfil bioclimático actual y futuro de las tres especies de Agave a través de las variables bioclimáticas que definen su distribución y 3) evaluar el efecto del cambio climático en las áreas actuales y futuras identificando nuevas áreas idóneas, áreas de alto impacto y áreas de bajo impacto.

Revisión de Literatura

Descripción, distribución e importancia de *Agave cupreata*, *Agave duranguensis*, *Agave salmiana* ssp.

Agave cupreata mide más de 1.15 m de altura con un diámetro de roseta de más de 2.17 m, sus hojas miden alrededor de 0.88 m de longitud y 0.25 m de ancho aproximadamente rodeadas de espinas de 7.1 a 12.1 mm de largo y 1.2 a 1.8 mm de grosor, sus flores son amarillas de 0.18 a 0.24 mm de longitud de antera, es una especie endémica de México que se distingue por sus espinas color cobre, hojas verdes y anchas con espinas muy notables en su contorno, alcanzando su madurez a los 15 años aproximadamente y se reproduce solo por semilla (Arrazate *et al.*, 2015). Es utilizada para la producción de mezcal lo cual hace que las poblaciones estén diezmadas porque se aprovecha antes de la floración, se distribuye en regiones semiáridas a altitudes que van 1220 a 1850 msnm (Martínez *et al.*, 2011), temperaturas promedio de 19.1 °C y precipitaciones de 961 mm (Sáenz *et al.*, 2012).

El maguey (*A. duranguensis*) es una especie endémica de México que llega a medir hasta 1.20 m de altura con un diámetro de copa que mide más de 1.50 m, de color gris glauco, sus hojas toman forma de roseta de 0.14 a 0.22 m de ancho y de 0.40 a 0.90 m de largo, su espina terminal mide de 4 a 6 cm aproximadamente, sus flores son amarillas con 8 cm de largo, tépalos externos de 12 mm de longitud aproximadamente y se reproduce por semilla o por rizomas (Gentry, 1982). Tiene importancia social y económica por el uso de las comunidades locales para la producción de Mezcal principalmente en Durango (Almaraz *et al.*, 2009). Se distribuye desde el sur de Durango hasta el Norte de Zacatecas en una pequeña parte de la Sierra Madre Occidental (Gentry, 1982) en regiones con temperaturas medias anuales que varían de 16.1 a 38.7 °C, precipitaciones de 400 a 600 mm, altitudes de 1500 a 3000 msnm, se desarrolla en suelos calcáreos, líticos éutricos y xerosoles es intolerante a áreas planas por la acumulación de agua que provoca que la planta muera (Olivas *et al.*, 2007), predomina en áreas con clima templado-semiárido, suelos francos con afloramiento rocoso (Ríos *et al.*, 2018).

La especie de *A. salmiana* ssp. tiene un ciclo de vida de 20 años aproximadamente se propaga por medio de vástagos y semilla, alcanza alturas de 1.8 m su roseta (Gentry,

1982), sus hojas lanceoladas miden más de 0.75 m de largo y 0.20 m de ancho de color verde grisáceo con una espina terminal de 5 a 9 cm de largo (Tello, 1983), se utiliza para producir mezcal (Lara *et al.*, 2016) y para la recolección de insectos comestibles que se desarrollan en esta especie como son el gusano blanco (*Acentrocneme hesperiaris* W.), rojo (*Comadia redtenbacheri* Hammerschmidt) y escamoles (larvas de *Liometopum apiculatum* Mayr) (Frausto *et al.*, 2008). Se encuentra en áreas áridas y semiáridas donde predominan precipitaciones de 350 a 400 mm (Lara *et al.*, 2016) y Zacatecas en regiones con clima BS1kw (w) semiárido templado con temperaturas que varían de los 10 a los 18 °C y precipitación media anual de 450 mm donde además predominan los suelos litosoles y xerosoles (Martínez, 2005).

Modelos de distribución de especies (MDS) y nicho ecológico (MNE)

Los registros de presencia también conocidos como localidades de presencia son puntos de latitud y longitud (coordenadas) donde se ha encontrado la especie, estos se pueden obtener de diferentes fuentes en su mayoría en bases de datos disponibles en internet, artículos científicos y colectas propias, el buen rendimiento de los MNE depende en gran parte de estos registros por lo que se deben depurar evitando usar datos erróneos (Mota *et al.*, 2019), aunado a las variables bioclimáticas o topográficas son las principales herramientas para modelación (Phillips *et al.*, 2006).

El concepto de nicho ecológico se desarrolló desde el siglo XX por diferentes investigadores entre ellos Hutchinson (1957) quien definió este término como el conjunto de condiciones óptimas (bióticas y abióticas) para que una especie se desarrolle y subsista en una determinada área.

Los modelos de distribución de especies cada vez más se utilizan con fines de conservación (Guisan *et al.*, 2013). Aunque es interesante saber las diferencias de los modelos de distribución de especies (MDS) y modelos de nichos ecológicos (MNE) considerando la estrecha relación que existe entre ambos términos, en algunos casos tienden a ser confundidos por lo que es importante usarlos apropiadamente según el objetivo de estudio del investigador (Soberón *et al.*, 2017). Estos dos procesos no son iguales, los MDS abarcan subconjuntos de toda el área de estudio (Espacio G) que depende de más factores comparado con el área del nicho que es elemento del espacio ambiental E

(Soberón y Peterson, 2005; Soberón *et al.*, 2017). En otras palabras, los MDS abarca áreas del planeta donde se juntan las condiciones para que esté presente una especie en cambio los MNE son áreas donde las condiciones ambientales y bióticas se unen a las especies (Peterson y Soberón, 2012).

Diagrama de BAM

Diferentes factores definen la distribución de una especie: 1) bióticos, 2) abióticos, 3) regiones accesibles y 4) capacidad evolutiva, se desarrolló el diagrama de BAM con la finalidad de definir regiones con los tres primeros factores considerando zona A los factores abióticos (variables ambientales), zona B los bióticos (disponibilidad de recursos) y M que en la zona accesible de la especie (Soberón y Peterson, 2005). Este diagrama se fundamenta en intersecciones, la primera intersección es de los tres factores antes mencionados, zona donde la especie está presente (Go), la segunda es área entre las condiciones adecuadas para la especie de la zona A y B, pero no accesibles siendo esta una zona potencial (Gi), la suma de Go y Gi generan el espacio potencial (Soberón, 2010; Mota *et al.*, 2019).

Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno repetitivo en la historia del planeta, aunque en las últimas 10 décadas la tasa de aumento ha sido mayor, el conocimiento de cómo el calentamiento global influye en las interacciones de las especies en tiempos pasados nos sirve para comprender como influye en tiempos actuales y futuros con dicho aumento (Blois *et al.*, 2013). En la actualidad el cambio climático es un tema de interés por el efecto notorio que tiene en la distribución de especies alterando sus procesos ecológicos (Gómez y Lacher, 2019) contribuyendo en los límites de distribución (Tomas, 2010).

Modelos de Circulación General (MCG)

El análisis del clima en tiempo y espacio y su predicción son procesos de interés para diferentes investigadores a lo largo de la historia y actualmente, considerando la importancia que estos tienen para la vida en la tierra (Houghton *et al.*, 2001). Los Modelos de Circulación General (MCG) son modelos numéricos tridimensionales del sistema

climático, fundamentados en las propiedades físicas, químicas y biológicas de la atmósfera, océanos y superficie terrestre a través de los cuales se estima el comportamiento atmosférico global, también se emplean para estimar cambios en las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) (Colman, 2003; Rivera y Amador, 2008; Harris *et al.*, 2014), que actualmente son alarmantes por su aumento repercutiendo en el cambio climático (Houghton *et al.*, 2001; Colman, 2003) provocado por actividades humanas (Houghton *et al.*, 2001).

Trayectorias de concentración representativas

Las trayectorias de concentración representativas son niveles de concentración de Dióxido de Carbono CO₂ conocidas también como RCP's o escenarios, drásticos o moderados dependiendo de su valor (Vargas *et al.*, 2020). En la actualidad se conocen cuatro niveles de RCP's el 2.6, 4.5, 6.0 y el nivel drástico 8.5 (Detlef *et al.*, 2011). Los escenarios de emisiones son esenciales para estudios climáticos considerando que se pueden estimar los posibles cambios a futuro (Detlef *et al.*, 2011).

MaxEnt (Máxima Entropía) y Programa estadístico R

R project es un software gratuito diseñado para análisis estadísticos con un conjunto de herramientas denominadas paquetes que facilitan cada proceso que se puede realizar en este programa (Arévalo y Padilla, 2016).

Maxent es un modelo estadístico que estima la probabilidad de distribución de las especies a través de registros de presencia basado en máxima entropía (cercana a la uniforme) en relación con las variables ambientales climáticas o topográficas (Phillips *et al.* 2006; Cruz *et al.*, 2014; Bañuelos *et al.*, 2019), es un software probado por diferentes investigadores considerándolo como uno de los mejores programas para modelar distribución de especies (Ibarra *et al.*, 2016), en la actualidad se ha combinado con “R studio” donde se creó el paquete kuenm permitiendo una selección detallada (significancia estadística, rendimiento y simplicidad) del mejor modelo, donde también se puede manipular el set de variables a utilizar para modelación, así como la facilidad de transferencia del modelo a futuro (Cobos *et al.*, 2019; Méndez *et al.*, 2021).

Estudios sobre distribución de especies

Gomez y Lacher, (2019) analizaron la distribución potencial de *Leptonycteris nivalis* y las plantas de Agave que polinizan (*Agave americana* L., *Agave aspérrima* Jacobi, *Agave gentryi*, *Agave havardiana* Trel., *Agave parryi* Engelm., *Agave horrida* Lem. ex Jacobi, *Agave inaequidens* K. Koch y *Agave palmeri* Engelm.) durante su migración del centro de México al sur de Estados Unidos, se modeló en Maxent y GARP con la finalidad de comparar el rendimiento de los modelos creados en cada algoritmo, con más de 20 registros para cada especie y 19 variables bioclimáticas. Se estimaron las distribuciones futuras de las especies mediante los Modelos de Circulación General (MCG) Met Ofce Hadley Centre (HadGEM2-AO), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC-ESM), NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R), and Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5) bajo dos escenarios un moderado (RCP 4.5) y drástico (RCP 8.5). Todas las especies fueron sensibles al cambio climático y tienden a tener mayor idoneidad a mayores altitudes, los Agaves más vulnerables son *A. gentryi*, *A. salmiana* y *A. horrida* que pierden más del 80 % de su idoneidad actual. En general analizando la superposición de *Leptonycteris nivalis* y las ocho especies de Agave se estima una reducción de idoneidad mayor al 50 %.

Hernández et al. (2020) estudiaron *Euphorbia antisyphilitica* Zucc., el área de estudio comprendió una superficie de 684 031.12 km² en tres regiones: el Desierto Chihuahuense, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán y el Desierto Sonorense, se seleccionaron 326 sitios (registros) de los cuales el 75 % se utilizó para entrenamiento y el 25 % para validación, utilizaron las 19 variables bioclimáticas de Worldclim con una resolución de 1 km, Se modeló con dos algoritmos Maxent donde los modelos se evaluaron mediante prueba del área bajo la curva (AUC) 0.934 y Bioclim, por su parte, el AUC de la validación del modelo fue de 0.892; es decir, un rendimiento bueno, las variables de mayor contribución en este estudio fueron de precipitación contribuyendo con el 67.7 %, aportando más la (Bio12) contribuyendo el 23.6 %, las variables de temperatura aportaron el 32.4 %, con Bioclim de Diva-Gis se estimó una superficie de 16 577.23 km² con potencial para *E. antisyphilitica*, mientras que con Maxent se estimó 111 836.50 km² (6.74 veces la superficie calculada con Bioclim). Las áreas de distribución de *E. antisyphilitica* se

encuentran principalmente en el Desierto Chihuahuense y en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Becerra et al. (2020) evaluaron la disponibilidad de hábitat para la presencia y uso de la especie *Dasyllirion wheeleri* S. Watson ex Rothr., *Dasyllirion cedrosanum* Tlberación, y *Dasyllirion duranguense* Trelease, los registros se obtuvieron del portal de Servicio de Información sobre Biodiversidad Global (GBIF), se depuraron eliminando los que no coincidían con la distribución conocida, para ello se tomó como referencia la información proporcionada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias obteniendo un total de 107 registros geográficos para *D. cedrosanum*, 25 para *D. durangense*, y 136 de *D. wheeleri* en esta investigación se utilizaron 19 variables bioclimáticas actuales y datos de elevación disponibles en la base de datos WorldClim, para su selección se dispersaron 1000 puntos en el área de estudios de las tres especies con la finalidad de extraer valores de cada Bio, se realizó un análisis de correlación bivariada, las Bios correlacionadas (≥ 0.7) fueron excluidas, se modeló en Maxent con las Bios seleccionadas y capas del suelo de litosol y regosol calcáreo, se proyectó a México considerando el escenario climático propuesto por el Modelo del Sistema Climático del Centro Climático de Beijing (BCC-CSM1-1) para el año 2050 bajo dos concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) RCP 2.6 W/m² y RCP 855 W/m². Para las especies *D. cedrosanum*, *D. durangense*, y *D. wheeleri* se obtuvo un valor de AUC de 0.94, 0.80 y 0.83 respectivamente, la variable de mayor contribución fue la Bio 14 (precipitación del mes más seco) contribuyendo con 58.6 % para las dos primeras especies (*D. cedrosanum*, *D. durangense*) para la otra especie fue la Bio 1, temperatura media anual (34.2%). Los resultados obtenidos en la modelación para el año 2050 bajo condiciones RCP 2.6 y RCP 8.5 muestran un ligero incremento en la aptitud del hábitat para *D. durangense* y *D. wheeleri*. Sin embargo, para *D. cedrosanum*, solo se muestran las zonas de idoneidad de hábitat baja considerándose así en este estudio la especie más vulnerable al cambio climático.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Las especies *A. cupreata*, *A. duranguensis* y *A. salmiana* ssp son endémicas de México y se distribuyen en diferentes áreas principalmente en las zonas áridas y semiáridas (Gentry, 1982; Arrazate *et al.*, 2015; Lara *et al.*, 2016) del norte hasta el sur del país (Figura 1) en la mayoría de climas desde áridos hasta semifríos y templados con temperaturas que varían de los 3 a los 22 ° C, precipitaciones que van de 5 a 10.2 % del total anual (García, 1998) y altitudes de los 492 a 2780 msnm.

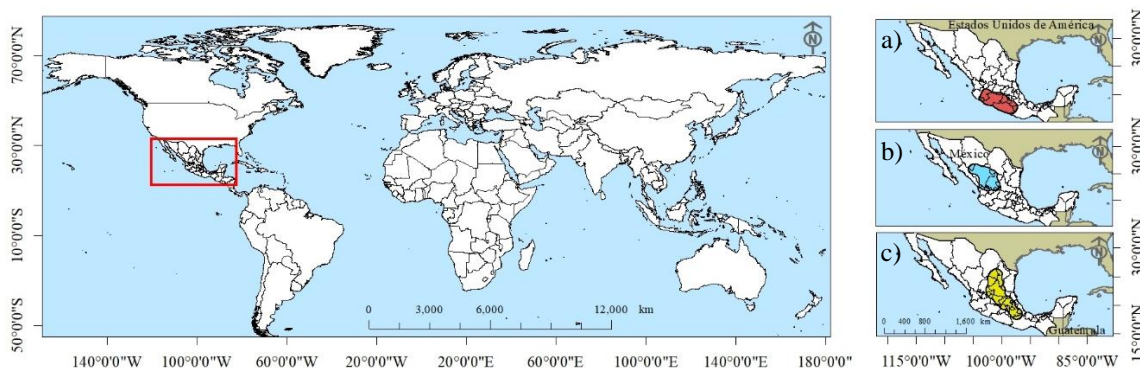


Figura 1. Distribución de las especies de Agave en el área de calibración, a) *Agave cupreata*, b) *Agave duranguensis* y c) *Agave salmiana* ssp.

Registros de presencia de la especie y limpieza

Los registros se obtuvieron de REMIB (Red Mundial de Información portal sobre Biodiversidad), INFyS (Inventario Nacional Forestal y de Suelos), artículos científicos y del portal GBIF (Global Biodiversity Information Facility).

La limpieza de presencias se basó acorde a los criterios utilizados por Méndez *et al.* (2021) eliminando registros sin precisión, duplicados, sin autor de identificación, fuera de su rango geográfico respecto a latitud y longitud, fuera de la elipse creada (99 %) de un Análisis de Componentes Principales (ACP) con ayuda del paquete “FactoMiner” en R studio utilizando 15 de las variables bioclimáticas y altitud (Lê *et al.*, 2008) y finalmente eliminando la autocorrelación espacial entre registros con ayuda del paquete “spThin” quedando un solo registro por pixel a un espaciamiento de 5 km (Aiello *et al.*, 2015). Los diversos criterios de selección ayudan a definir un número de registros de presencia

correctos evitando así resultados falsos que afecten las estadísticas del modelo (Gómez y Lacher Jr., 2017).

Variables bioclimáticas y selección

Se utilizaron 15 variables bioclimáticas de las 19 que se encuentran en el portal CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) (Karger *et al.*, 2017) considerando que está comprobado que las Bio 8, Bio 9, Bio 18 y 19 combinan información (Escobar *et al.*, 2014; Méndez *et al.*, 2021).

Diferentes autores han detectado problemas en las variables bioclimáticas como colinealidad, correlación y algunas no informativas por ello la necesidad de seleccionar las variables para el análisis de MNE (Braunisch *et al.*, 2013; Gómez y Lacher Jr, 2017), los criterios de selección de basaron en los utilizados por Méndez et al. (2021) eligiendo las variables no correlacionadas mediante correlación de Pearson ($r < 0.8$) paramétrica ($\alpha \leq 0.05$), analizando las propiedades de sus distribuciones de frecuencias escogiendo las variables con distribuciones normales o sesgadas (izquierda o derecha) y determinado su capacidad predictiva de la variable realizando una pre-modelación en Maxent con las variables individualmente eligiendo las de menor sobrestimación aunado a lo anterior está demostrado que proyecciones de precipitación de modelos de circulación general (MCG) resultan sesgadas a mayores altitudes sobreestimando la idoneidad climática (Karger *et al.*, 2017).

A través de los criterios de selección de las variables climáticas para cada Agave se obtuvieron cinco grupos diferentes de variables (sets) utilizadas para el área de calibración de las cuales se obtuvo el mejor set para predecir la distribución de las tres especies a futuro (Cobos *et al.*, 2019; Jiménez y Méndez, 2021).

Área de calibración

El área de accesibilidad de las especies (área M o área de calibración) es indispensable para desarrollo, prueba y comparación de los modelos, su amplitud influye en el resultado del modelo final considerando que si esta es muy estrecha la importancia de los factores ambientales para delimitar la distribución de las especies puede subestimarse (Barve *et al.*, 2011)

Se delimitó a través de los registros limpios de las especies de agave de este estudio aplicando un buffer de radio 70 km (Jiménez y Méndez, 2021).

Proceso de modelación

El proceso de calibración, creación y evaluación de modelos se realizó en el paquete kuenm el cual utiliza el algoritmo de modelación MaxEnt (máxima entropía). Para este proceso en el paquete kuenm se utilizaron 14 multiplicadores de regularización para *A. cupreata* (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5) y 16 para *A. durangensis* y *A. salmiana* (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 y 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4), siete tipos de respuesta l, q, p, lq, lp, qp, lqp (l=lineales, q=cuadrática y p= producto) en las tres especies.

Con el set de variables que cumplió los criterios de selección se realizó la transferencia del modelo final al futuro con salida logística utilizando el 50 % de los registros (independientes) de *A. cupreata*, 20 % de las otras dos especies de Agave del total de registros con los que se modeló, bajo tres MCG, CCSM4 (Gent *et al.*, 2011), HadGENM (Martin *et al.*, 2011) y MIROC5 (Moya *et al.*, 2015), creándose a través de tres tipos de extrapolación: libre, clamping y no extrapolación (Cobos *et al.*, 2019).

Selección del modelo

El mejor modelo se seleccionó mediante cinco criterios, a) ROC parcial (Curva Operada por el Receptor) b) tasas de omisión < 0.05 %, y c) Criterio de Información Aikaike (AICc) (Peterson *et al.*, 2008; Cobos *et al.*, 2019), d) curvas de respuesta de las especies a factores ambientales (Merrow *et al.*, 2013) y e) significancia estadística del modelo (Cobos *et al.*, 2019).

Estratificación de modelos de idoneidad

El modelo final de idoneidad de cada especie de Agave (mapas raster) se estratificó en idoneidad baja (0-0.33), idoneidad media (0.33-0.66) e idoneidad alta (0.33-1) esto con la finalidad de definir las áreas más importantes de idoneidad (idoneidad alta) de las tres especies (Méndez *et al.*, 2021).

Estimación de la incertidumbre del modelo de nicho

Se evaluó la incertidumbre predicha del modelo (Elith y Leathwick, 2009) a través de los estadísticos Desviaciones Estándar (DE), Varianza (S^2), Media (\bar{X}), Mediana (Me) de 10 repeticiones del modelo final, se realizó un promedio de las DE y la \bar{X} de los MCG de cada RCP (4.5 y 8.5) con lo cual se determinó el Coeficiente de Variación (CV) con la siguiente fórmula: $CV = \frac{DE}{\bar{X}} * 100$.

Tipo de áreas idóneas identificadas al transferir el modelo de nicho

El modelo de idoneidad estratificado de cada especie se binarizó en cero (valores de 0 al segundo umbral 0.33) y uno (valores del segundo umbral 0.33 al tercero 1), con cada modelo (mapa raster) binarizado se realizó algebra raster estimando tres áreas de idoneidad: 1) NAI (Nuevas Áreas Idóneas) áreas que actualmente no son idóneas, pero se estima que a futuro si lo son, 2) AIV (Áreas Idóneas Vulnerables) áreas que actualmente son idóneas, pero se estima que a futuro no lo serán y 3) AINV (Áreas Idóneas no Vulnerables) Áreas Idóneas actualmente e idóneas al 2050 (Jiménez y Méndez, 2021).

Validación de la transferencia del modelo de nicho

En el paquete kuenm también se puede evaluar el riesgo de extrapolación a través de Paridad Orientada a la Movilidad (MOP) el cual se obtuvo promediando los MCG que se utilizaron en esta evaluación con su respectivo RCP (4.5 y 8.5) (Cobos *et al.*, 2019), proceso que evalúa la similitud entre el área de calibración y el área proyectada a futuro, identificando las áreas de extrapolación estricta, cabe mencionar que este proceso es una modificación de Superficies de Similitud Ambiental Multivariante (MESS) (Owens *et al.*, 2013). El MOP también da lugar a reafirmar que las NAI y AIV sean correctas o incorrectas.

Perfil Bioclimático

A través del proceso en el paquete kuenm se seleccionó el set de variables que mejor estima la distribución de cada especie donde con ayuda de las pruebas de jackknife se obtienen las variables de mayor contribución con las que se determina el perfil bioclimático actual y futuro (Méndez *et al.*, 2021) en este estudio para determinar el perfil

bioclimático futuro se analizaron las AINV donde se registraban los tres Agaves para de esa manera determinar las tolerancias futuras de las especies de Agave.

Resultados

Modelos de idoneidad de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp.

Se generaron 490 modelos para *A. cupreata*, 560 para *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp., de ellos, 97.5, 98.57 y 57.50 %, pasaron la tasa de omisión (5 %), significancia estadística ($\alpha = 0.05$). El tipo de respuesta de la idoneidad con la variable ambiental fue (l) lineal y (q) cuadrático en los tres Agaves. El algoritmo de Maxent seleccionó el multiplicador de regularización menor a 0.5 en las tres especies (Cuadro 1), esto indica una predicción que se ajusta más estrechamente a los registros de presencia de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

Cuadro 1. Modelos candidatos generados, estadísticos de ajuste y validación para las tres especies de Agave.

Criterio/Especie	<i>A. cupreata</i>	<i>A. durangensis</i>	<i>A. salmiana</i> ssp.
Evaluación de modelos candidatos			
TmC	490	560	560
mES	490	560	560
mTO	478	552	322
mAIC	2	11	15
n de mES y mTO	478	552	322
n de mES y mAIC	2	11	15
n de mES, mTO y mAIC	2	9	15
Modelo seleccionado	M_0.2_F_lqp ⁽³⁾	M_0.5_F_lq ⁽⁴⁾	M_0.1_F_lqp ⁽⁵⁾
Estadísticos de ajuste			
Media AUC ratio	1.434	1.660	1.652
AICc	1338.929	452.179	692.729

TmC = Total de modelos candidatos; mES = Modelos estadísticamente significantes; mTO = Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión, mAIC = Modelos que cumplen con el criterio AICc; AICc = Criterio de Información Aikaike, ^(1,2,3) = Número de set.

Variables que predicen la distribución de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp.

Las variables de precipitación: Bio 17 y Bio 13, determinan la distribución de *A. durangensis* y *A. salmiana*, contribuyendo al modelo con 62.88 y 56.86 % (Cuadro 2); contrastando la segunda variable de mayor contribución, temperatura máx. del mes más

cálido (Bio 5) (22 a 32 °C) y temperatura media del ¼ más cálido (Bio 10) (16 a 24 °C) (Figuras 3df), respectivamente. En *A. cupreata* la temperatura mínima del mes más frío (Bio 6) determina su distribución contribuyendo 62.54 %.

Cuadro 2. Contribución porcentual de las variables bioclimáticas en los modelos de distribución de *Agave cupreata*¶, *Agave durangensis*§ y *Agave salmiana*£ ssp.

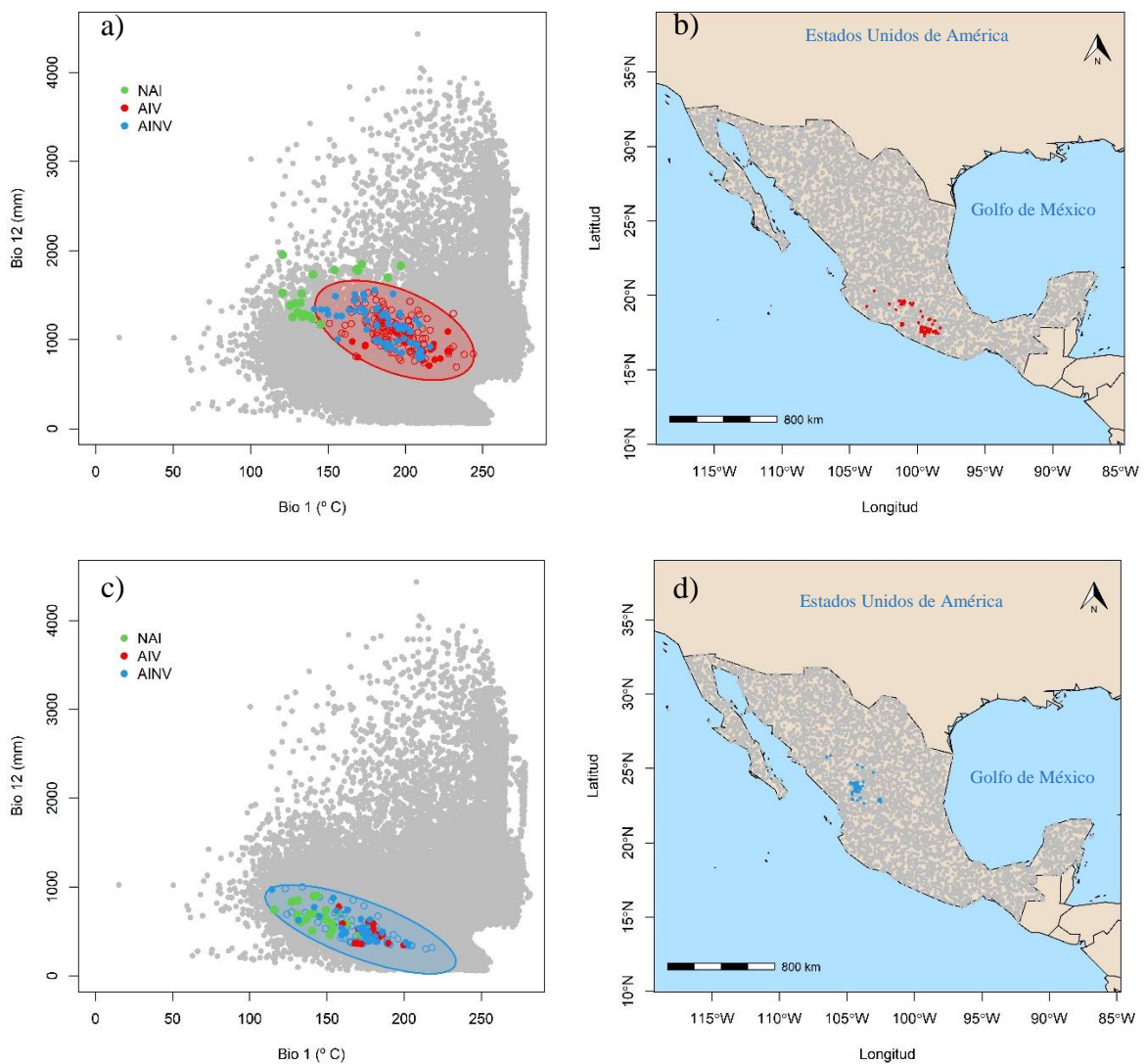
Descripción de la variable	sp1¶	sp2§	sp3£
Bio 1 Temperatura Media Anual (°C x 10)			
Bio 2 Rango Diurno Medio Anual (°C x 10)			
Bio 3 Isotermalidad (%)			
Bio 4 Estacionalidad de la Temperatura (%)			
Bio 5 Temperatura Máx. del Mes más Cálido(°C x 10)	8.64	20.34	
Bio 6 Temperatura Mín. del Mes más Frío (°C x 10)	62.54	8.90	
Bio 7 Rango de Temperatura Anual (°C x 10)			
Bio 10 Temperatura Media del ¼ más cálido (°C x 10)			29.84
Bio 11 Temperatura Media del ¼ más Frío (°C x 10)			11.98
Bio 12 Precipitación anual (mm)	19.90		
Bio 13 Precipitación del Mes más húmedo (mm)			56.86
Bio 14 Precipitación del Mes más Seco (mm)	8.92		1.36
Bio 15 Estacionalidad de la Precipitación (CV,%)			
Bio 16 Precipitación del ¼ más húmedo (mm)		7.88	
Bio 17 Precipitación del ¼ más seco (mm)		62.88	

Nicho fundamental de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp.

Del total de registros de sp1¶, sp2§, sp3£ solo el 24.31, 57.67, 58.82 % respectivamente quedaron depurados, de los cuales más del 50 % se utilizó para entrenamiento del modelo y el resto para validación. Acorde a los registros de presencia, *A. salmiana* posee la mayor distribución latitudinal (16 a 27 ° N) y longitudinal (94 a 103 ° W), *A. cupreata* (16 a 19 ° N y 93 a 102 ° W) la de menor (Figuras 2b, f).

La tolerancia de temperatura media anual (Bio 1) de *A. cupreata* (13 a 24 ° C), *A. durangensis* (11 a 24 ° C) y *A. salmiana* spp. (12 a 22 ° C), según los registros de presencia de cada especie varía teniendo mayor *A. durangensis* y menor *A. salmiana* ssp que de igual manera resiste precipitaciones bajas (100 a 900 mm) con un nicho fundamental más estrecho. *A. salmiana* requiere de mayor precipitación (500 a 1800 mm) resistiendo temperaturas de hasta 24 ° C siendo la especie de nicho fundamental más amplio (Figura 2).

Las NAI se encuentran a mayores precipitaciones y menores temperaturas contrastando con las AIV, el mismo patrón se ve reflejado en las tres especies de Agave (Figuras 2a, c, e).



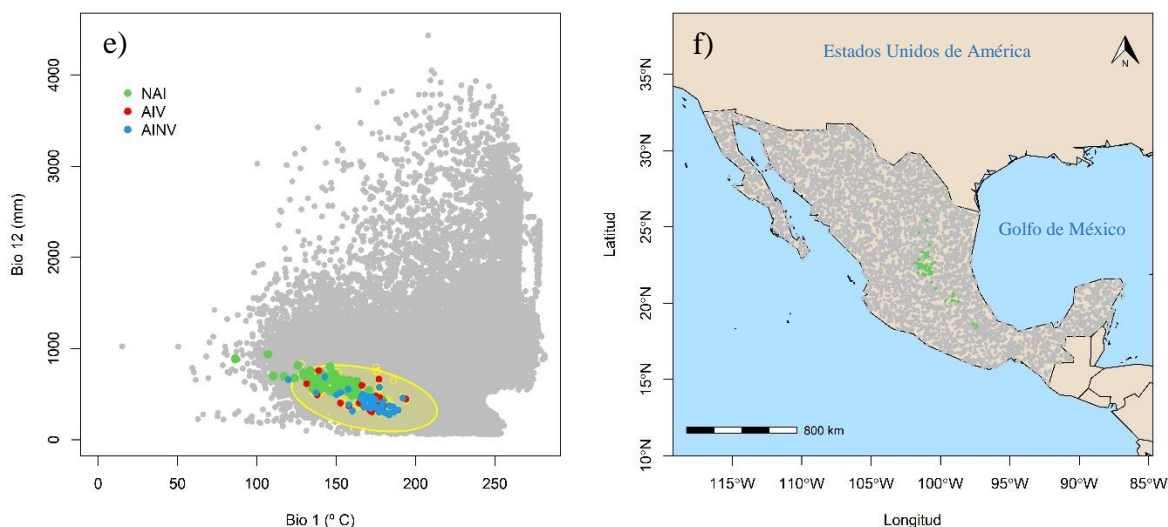


Figura 2. Espacio ambiental (a, c, e) y geográfico (b, d, f) de, *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana* ssp. creado con la Bio 1 y la Bio 12, los puntos grises (5000) corresponden a los valores de las Bios, verdes (151) a los registros de *Agave cupreata*, azules (74) *Agave durangensis* y rojos (80) *Agave salmiana* ssp.

Respuesta de las variables ambientales

Se predicen valores más alto de idoneidad en *A. durangensis* (0.1 - 0.9) y menos en *A. cupreata* (0.1 - 0.7). La Bio de mayor contribución en el modelo de *A. cupreata* y de *A. salmiana* está representada por un solo mes del año, lo que las hace más vulnerables al 2050; mientras que en *A. durangensis*, la Bio se constituye por un trimestre. La distribución de *A. cupreata* está determinada por temperatura (Bio 6, mes más frío), preferentemente entre 5 y 18 °C (Figura 3a). En contraste, la idoneidad climática de *A. durangensis* y *A. salmiana* lo determina la precipitación, Bio 17 y Bio 13, preferentemente entre 6 y 19 mm; y 50 y 160 mm, respectivamente (Figura 3c y e). Las tolerancias de temperatura de estas especies (Figura 3a, f) varían considerablemente, ya que depende de la variable, sin embargo, el rango es más amplio en *A. cupreata* (13 °C) y muy corto en *A. salmiana* (7 °C), (Figura 2a, e). La respuesta de la idoneidad de la variable es cuadrática con temperatura (Figura 3a) y lineal con precipitación (Figura 3b); positiva con precipitación total (*A. cupreata*, Figura 3b), pero negativa cuando la precipitación es intra-anual (Figuras 3c y e).

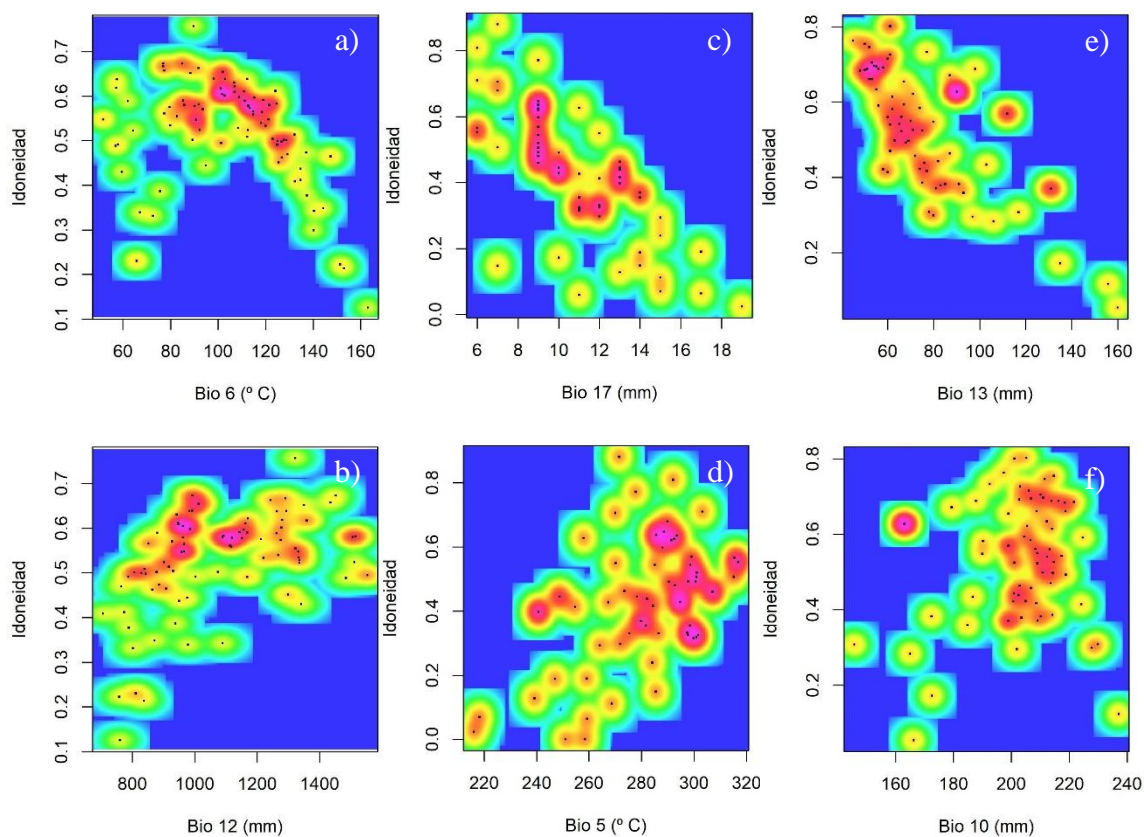


Figura 3. Respuesta de la idoneidad climática a las dos variables climáticas de mayor contribución al modelo de *Agave cupreata* (a, b), *Agave durangensis* (c, d) y *Agave salmiana* ssp (e, f).

Áreas de idoneidad climática actual y futura (2050)

El modelo de nicho, predice 9833.80, 5381.95 y 4453.09 km² de idoneidad alta (> 0.66) para *A. salmiana*, *A. cupreata* y *A. durangensis*, (Figuras 4a, d, g), representan 3.63, 2.78 y 2.20 % del área de M. A pesar de que *A. salmiana* posee el nicho fundamental más pequeño que las otras dos especies (Figura 4g) se distribuye en 11 de 32 estados del país (Figura 4g), diez de ellos tienen idoneidad alta, los más importantes son San Luis Potosí (53.15 %) e Hidalgo (20.59 %). Seis de los ocho estados donde se distribuye *A. cupreata* (Figura 4a) poseen alta idoneidad, los de mayor superficie son Guerrero, Michoacán y Oaxaca con 28.53, 25.98 y 22.16 % del total de idoneidad alta (Figura 4a). *A. durangensis* se registra en nueve estados, Zacatecas y Durango poseen la mayor superficie de áreas de alta idoneidad (58.82 y 39.21 % de M) (Figura 4d).

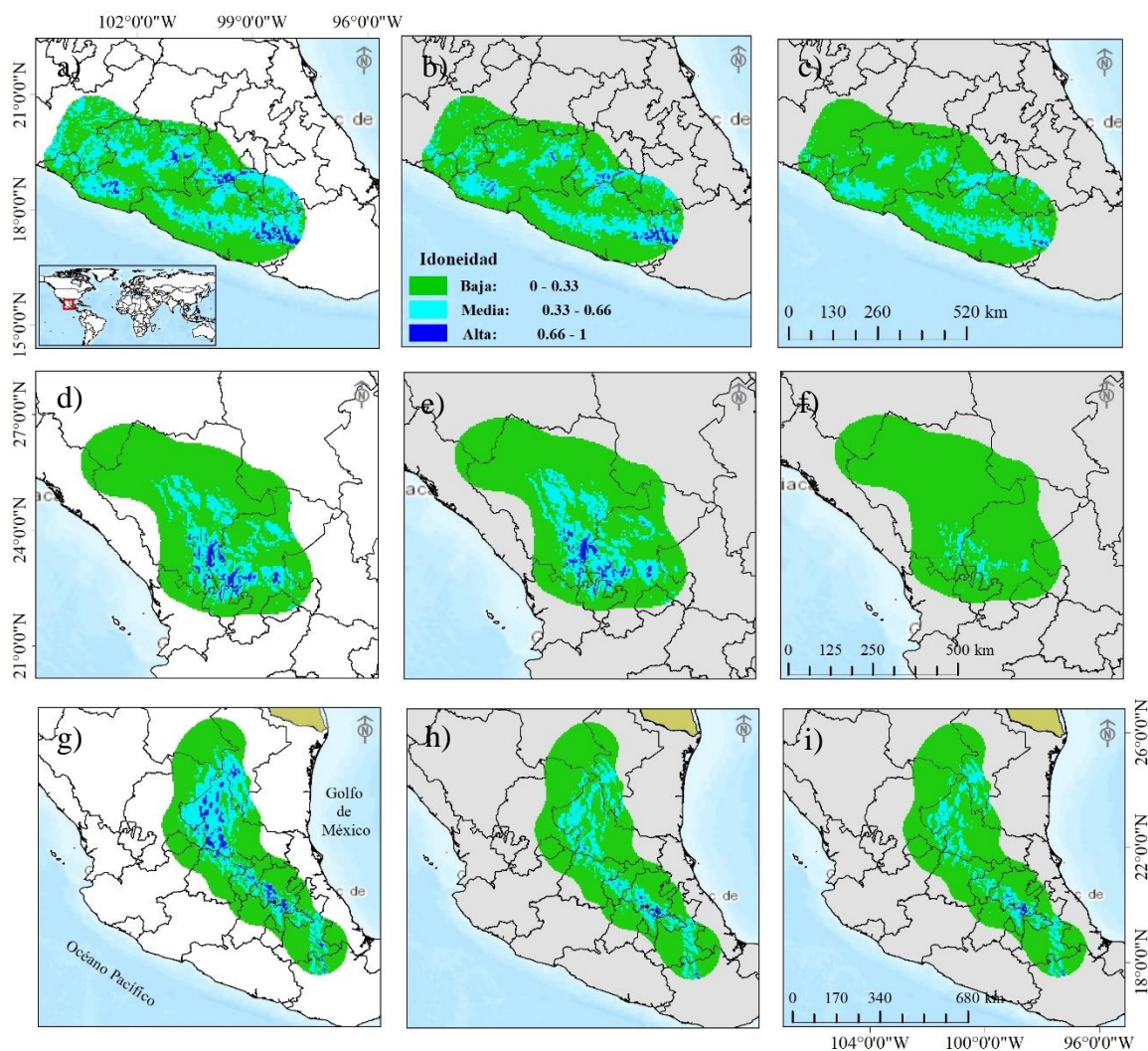


Figura 4. Idoneidad actual (a, d, g) y futura al 2050 en el área M (área de calibración) utilizando el promedio de tres modelos de circulación general, CCSM4, HadGEM y MIROC5 en dos escenarios de concentración de CO₂ 4.5 (b, e, h) y 8.5 (c, f, i) para *Agave cupreata*, *Agave durangensis*, y *Agave salmiana* ssp.

Ante un escenario climático drástico (8.5 w/m²) al 2050, las tres especies de *Agave* podrían sufrir cambios importantes en su distribución, la idoneidad alta (>0.66) podría disminuir 88.5 % y 33.4 % si el escenario fuera moderado (4.5 w/m²). En particular, *A. durangensis*, podría ser la especie más vulnerable, si el primer escenario ocurre, la tasa de pérdida de la idoneidad alta podría ser de hasta 93.05 % con respecto a la idoneidad actual, similar podría pasar con *A. cupreata* (90.30 %). Si el escenario climático es moderado al

2050, *A. salmiana* y *A. cupreata* serían las más vulnerables, podrían perder 41% de su idoneidad actual.

Cuadro 3. Diferencia porcentual de superficie de idoneidad actual comparada con proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general para el 2050 estimadas a través del modelo de nicho para *Agave cupreata*, *Agave durangensis*, y *Agave salmiana* ssp.

Idoneidad/ Superficie	Actual (km ²)	CCSM4		HadGEM		MIROC5	
		RCP (w/m ²)					
		4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
<i>Agave cupreata</i>							
Baja (<0.33)	116615.92	14.44	37.37	27.55	22.79	18.55	26.37
Media (0.33-0.66)	71581.02	-20.99	-53.59	-39.95	-30.26	-27.75	-36.10
Alta (>0.66)	5381.95	-31.65	-92.99	-62.79	-89.19	-30.61	-88.72
Total	193578.89						
<i>Agave durangensis</i>							
Baja (<0.33)	163774.10	-9.80	18.94	5.80	15.95	22.28	21.23
Media (0.33-0.66)	33782.63	34.17	-79.52	-22.31	-67.03	-95.36	-90.40
Alta (>0.66)	4453.09	97.93	-96.79	-47.62	-82.35	-100.00	-100.00
Total	202009.83						
<i>Agave salmiana</i> ssp.							
Baja (<0.33)	191076.59	-3.68	15.01	28.92	18.24	21.68	28.03
Media (0.33-0.66)	69927.99	2.33	-30.57	-64.96	-36.75	-47.68	-65.16
Alta (>0.66)	9833.80	54.86	-73.63	-99.19	-92.41	-81.43	-80.42
Total	270838.39						

Incertidumbre del modelo de nicho y transferencia del modelo (MOP)

En el área de calibración los valores de Coeficiente de Variación (CV o Incertidumbre) para *A. cupreata* van de 3.77 a 20.05 % en las áreas de alta idoneidad (Figura 5c, d), con un poco de mayor variación en *A. durangensis* de 4.19 a 28.79 % (Figura 5g, h) aunado a esto la especie de menor variación es de *A. salmiana* ssp. con valores de incertidumbre de 2.02 a 6.65 % (Figuras 5k, 5l).

Visiblemente se estiman áreas con valores de MOP > 0.80 que coinciden con superficies con CV < 0.20 por lo que se estima una aproximación climática al área M aceptable en las tres especies (Figura 4). De igual manera superficies de las NAI de *A. cupreata* y *A. durangensis* se traslapan con valores altos del MOP > 0.90 lo que corrobora la similitud climática en el área de calibración y que las NAI para esta especie son correctas, no sucede lo mismo para *A. salmiana* ssp. (Figuras 5a, b, e, f, i, j y Figuras 6b, d, f, h, j, l). Las ABI coinciden con valores MOP > 0.80 en promedio de las tres especies con menos superficies de coincidencia en *A. duranguensis* (Figuras 5a, b, e, f, i, j y Figuras 6b, d, f, h, j, l).

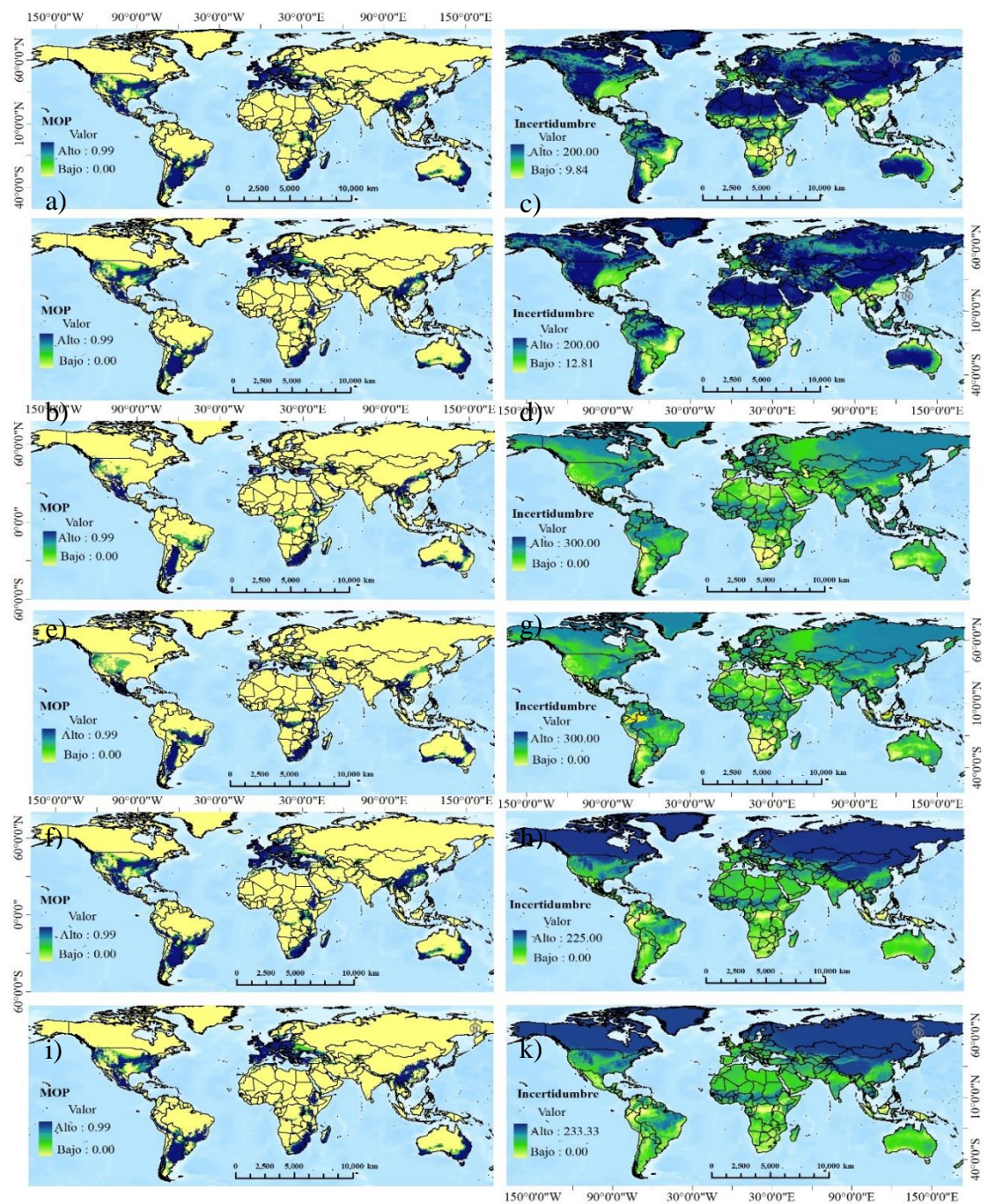


Figura 5. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promediada de tres MCG (CCSM4, HadGEM y MIROC5), en dos escenarios de concentración de CO₂, RCP 4.5 (a, e, i) y 8.5 (b, f, j) para el modelo de nicho ecológico de *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana* ssp. incertidumbre promedio de las predicciones de idoneidad climática de los modelos de circulación general en los dos escenarios 4.5 (c, g, k) y 8.5 (d, h, i) de las tres especies.

Nuevas áreas idóneas, vulnerables y no vulnerables al cambio climático

En general las NAI se estiman en mayoría bajo condiciones moderadas (883.76 km²), las especie con más NAI bajo este escenario es *A. salmiana* ssp. 1713.99 km² (2.11 %) y menor *A. cupreata* 451.18 (0.59 %) (Figuras 6a, e, i). Bajo condiciones drásticas (680.36 km²) la especie con mayor superficie de NAI es *A. cupreata* 1465.11 (1.88 %) con 0 superficie *A. durangensis* 0 (0 %) (Figuras 6c, g, k). En promedio de los dos escenarios la especie con mayor superficie de NAI es *A. salmiana* ssp. 1144.99 km² (1.42 %) (Figuras 6i, 6k) la de menor *A. durangensis* 243.06 km² (0.64 %) (Figuras 6e, 6g).

Se estima una pérdida de idoneidad para el 2050 (AIV) en el área de calibración promedio de 32693.40 (42.33 %), 22781.46 (59.69 %), 35052.35 km² (43.57 %) en *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. respectivamente, teniendo mayor superficie de AIV *A. salmiana* ssp. y menor *A. durangensis*, bajo condiciones drásticas la pérdida de idoneidad es mayor en las tres especies perdiendo aproximadamente 36682.25 km² (Figuras 6a, c, e, g, i, k).

Globalmente en promedio de los dos RCP (4.5 y 8.5) se estima para *A. cupreata* mayor superficie de NAI para el año 2050 abarcando 667984.86 km² (5.65 %) del total de áreas estimadas (NAI, AAI y ABI), en regiones de Canadá, Estados Unidos de América, China, Brazil, Colombia, Bolivia, Venezuela y Perú (Figuras 6b, 6d) y menor superficie de NAI en *A. durangensis* estimándose 3506.85 km² (0.17 %) en Sudáfrica y España.

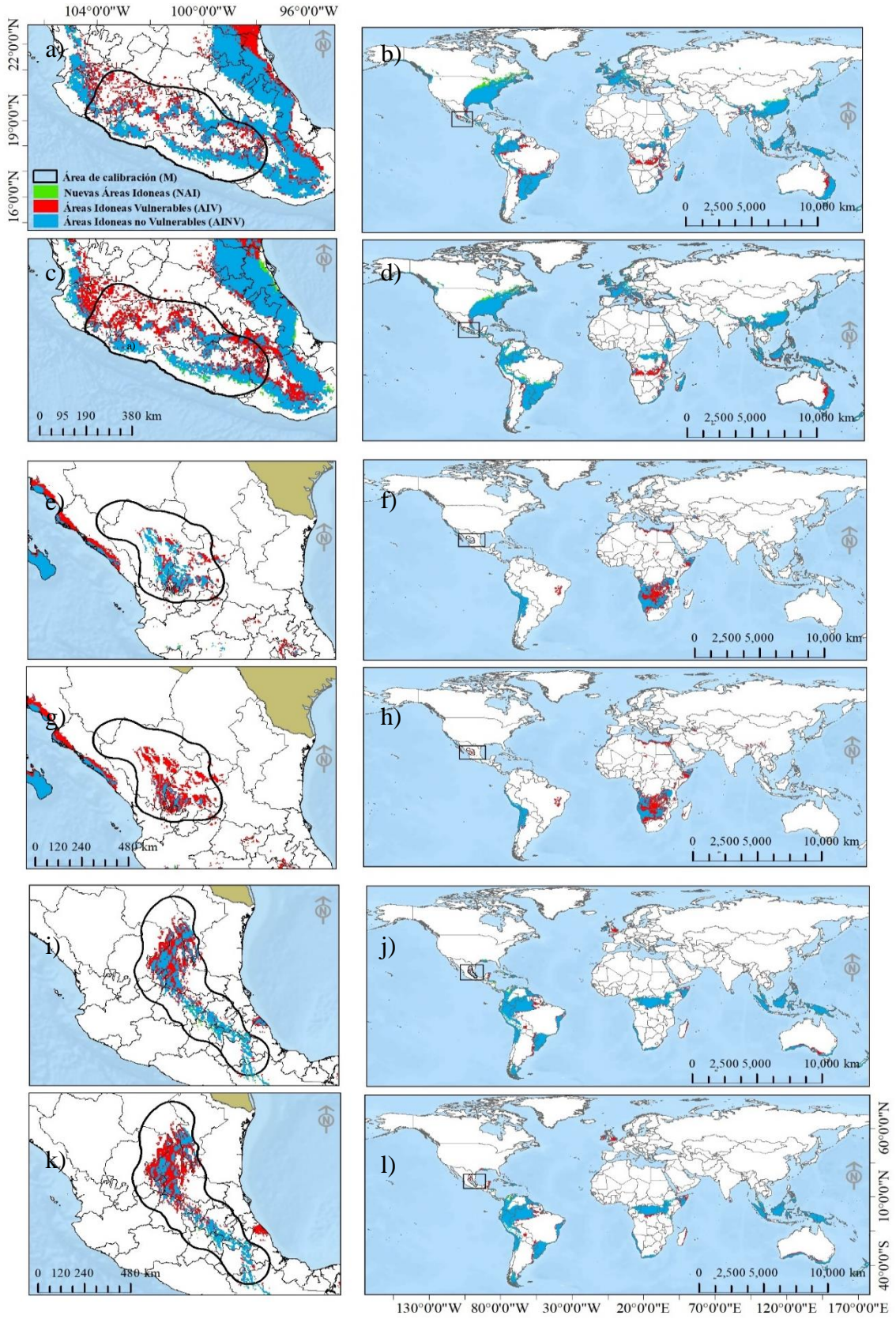


Figura 6. Áreas (NAI, AIV, AINV) estimadas en el área M (a, c, e g, i, k) y en todo el mundo (b, d, f, h, j, l) para *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana* ssp. utilizando tres MCG (CCSM4, HadGEM y MIROC5) bajo dos escenarios de concentración de CO₂ RCP 4.5 (a, b, e, f, i, j) y 8.5 (c, d, g, h, k, l).

Ante un escenario climático drástico (RCP 8.5), considerando un umbral de idoneidad ≥ 0.33 , en promedio (tres especies), 61.04 % de las áreas predichas como idóneas, podrían ser vulnerables al cambio climático; aunque en *A. durangensis* se espera sea de 84.58 %, Si el escenario es moderado, se espera sea 36.03 % en promedio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tipos de áreas calculadas estimadas a partir de un umbral de idoneidad climática de ≥ 0.33 , del modelo de nicho, promedio de climatologías de tres modelos de circulación general, ante dos escenarios climáticos al 2050.

	Tipo Área	Área (km ²): escenario		Porcentaje: Escenario	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
<i>Agave cupreata</i>	NAI	451.18	1465.11	0.59	1.88
	AIV	27182.52	38204.27	35.68	48.98
	AINV	48553.89	38323.94	63.73	49.14
	Total	76187.59	77993.32	100.00	100.00
<i>Agave durangensis</i>	NAI	486.12	0.00	1.27	0.00
	AIV	13341.60	32221.32	34.80	84.58
	AINV	24507.92	5873.65	63.93	15.42
	Total	38335.65	38094.98	100.00	100.00
<i>Agave salmiana</i>	NAI	1713.99	575.98	2.11	0.72
	AIV	30483.55	39621.16	37.60	49.55
	AINV	48872.33	39770.57	60.28	49.73
	Total	81069.86	79967.72	100.00	100.00

Donde: NAI = Nuevas Áreas Idóneas, AIV = Áreas Idóneas Vulnerables, AINV = Áreas Idóneas no Vulnerables.

En ninguno de los grupos se cumplió con normalidad ($p < 0.05$), ni con homogeneidad de varianza (Levene test, $p < 0.05$). El valor de $p < 0.05$, de la prueba de Kruskal-Wallis (casi

en todos los análisis), muestra evidencia muy fuerte en contra de la hipótesis nula (H_0); esto es, las altitudes en todos los grupos son diferentes ($p < 0.05$), excepto en *A. cupreata* (Fig. 7d) y *A. durangensis* (Fig. 7e). En general, las nuevas áreas idóneas (NAI), se ubican desde 280 m (*A. durangensis*, Fig. 7b) hasta 700 m (*A. cupreata*, Fig. 7a) por encima de las áreas no vulnerables (AINV), y en promedio 500 m más arriba que las áreas vulnerables (AIV). Partial epsilon squared (95%) muestra el efecto de la prueba de K-W es grande (> 0.15) para algunas pruebas (Figs. 7b, 7c, 7f), medio (0.07) para *A. cupreata* (Fig. 7a), pequeño (0.02) en *A. durangensis* (Fig. 7e) y muy pequeño (0.00079) para *A. cupreata* (Fig. 7d).

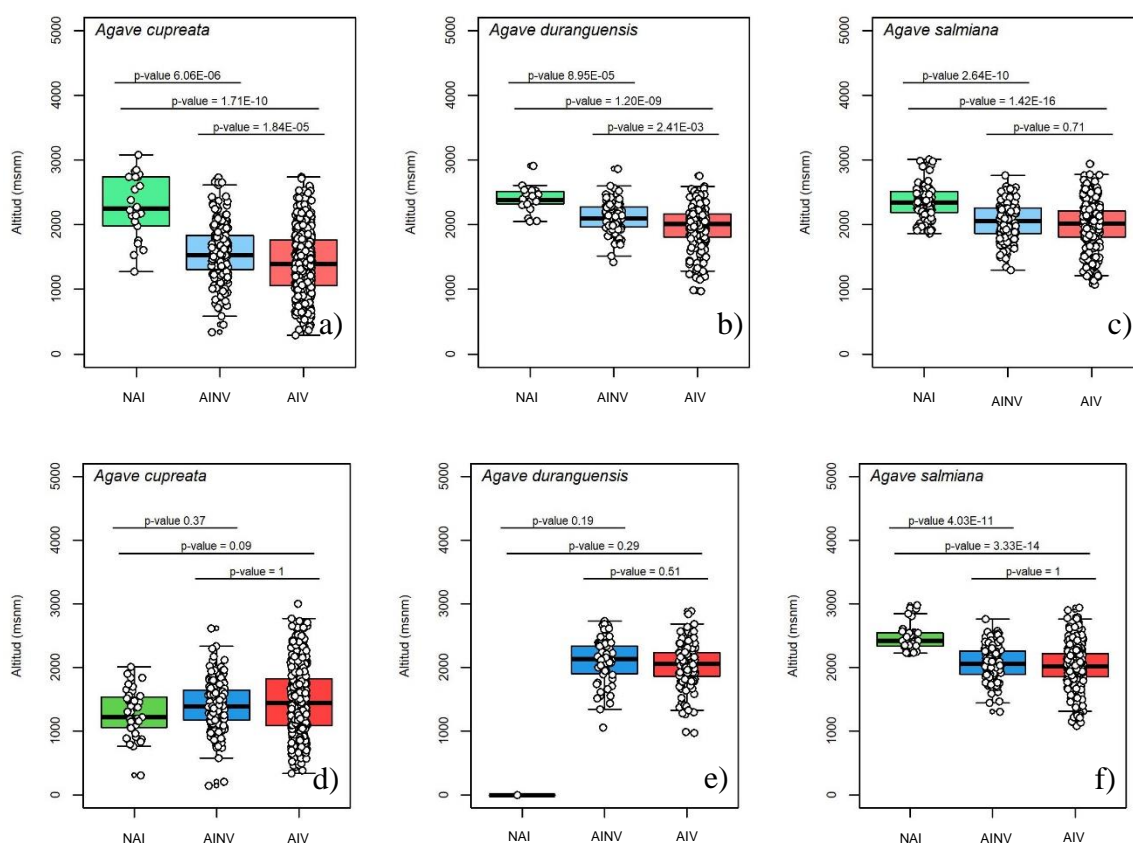


Figura 7. Prueba de Kruskal-Wallis and Dunn pairwise Tests (p-values) realizada los valores de altitud de los diferentes tipos de áreas donde: NAI = Nuevas Áreas Idóneas, AINV = Áreas Idóneas no Vulnerables, AIV = Áreas Idóneas Vulnerables, en dos escenarios climáticos, moderado (RCP 8.5, arriba) y drástico (RCP 8.5 (abajo)).

Actualmente *A. durangensis* y *A. salmiana* tiene mayor idoneidad a mayores altitudes contrario a la latitud (Figuras 8b, 8c), en la especie *A. cupreata* no hay tendencia (Figuras 8b, 8c).

Se realizó correlación Spearman para idoneidad y altitud de las tres especies obteniendo valores $\rho < 0.5$, con significancia estadística (p-valor < 0.05) para las especies de *A. durangensis* y *A. salmiana* donde visiblemente hay una tendencia entre estas dos variables (Figuras 8b, 8c), no sucede lo mismo para *A. cupreata* donde el p-valor > 0.05 (Figura 8a).

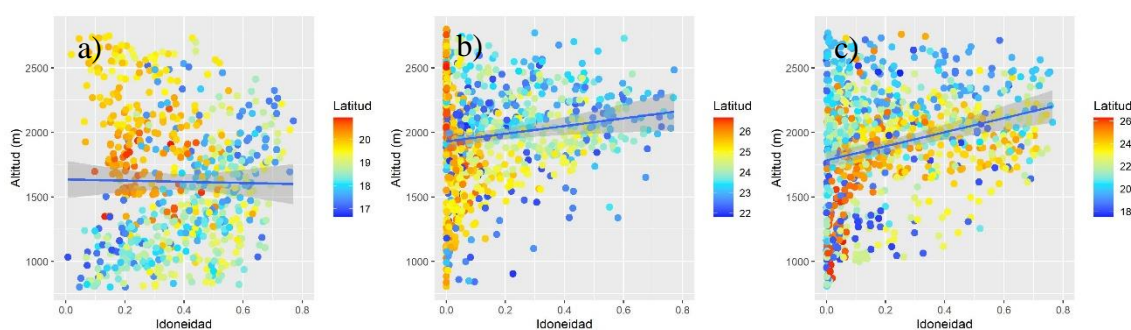


Figura 8. Relación de idoneidad con altitud para *Agave cupreata* (a), *Agave durangensis* (b) y *Agave salmiana* ssp. (c).

Se estima para el 2050 un aumento de temperatura (Bio 6) a mayores altitudes y a mayores latitudes esto para el caso de *A. cupreata* bajo condiciones moderadas (Figura 9a)

En *A. durangensis*, se espera que disminuya más la precipitación (Bio 17) a mayores altitudes y mayores latitudes (Figuras 8c, 8d), algo similar sucede con *A. salmiana* ssp. (Figuras 9e, 9f)

Las tendencias de las gráficas (a, c, d, e, d, f) que componen la figura ocho son estadísticamente significativas a un p-valor < 0.05 (Figura 9).

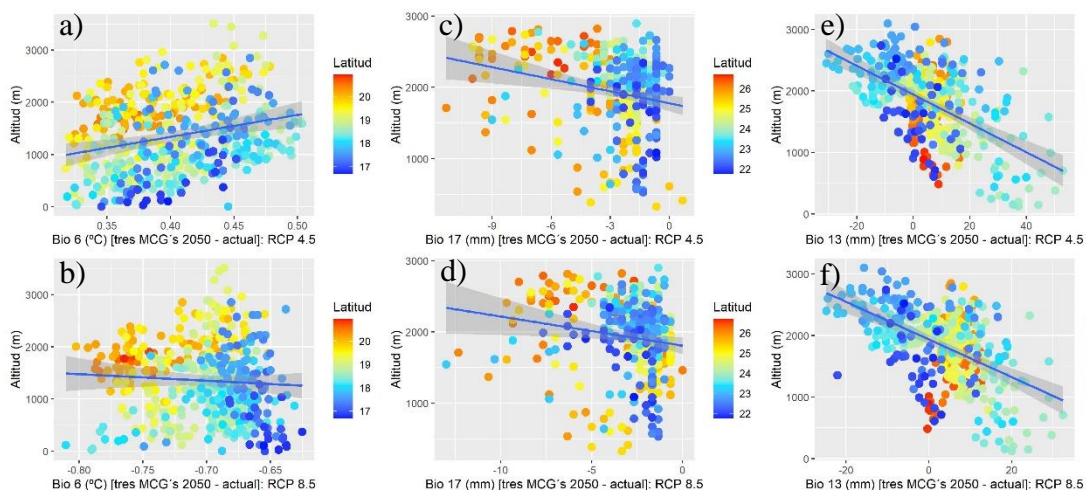


Figura 9. Cambios de precipitación y temperatura esperados al 2050 sobre el área de distribución actual de *Agave cupreata* (a, b), *Agave durangensis* (c, d) y *Agave salmiana* ssp. (e f) promedio de tres MCG bajo dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) relacionados con altitud y latitud, en la variable bioclimática de mayor contribución de cada especie.

Perfil bioclimático de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp.

En la actualidad la temperatura (Bio 6) promedio viable para *A. cupreata* es de 10.42 °C, para el 2050 esta especie tolerará un aumento de 0.51 °C. Para *A. durangensis* actualmente se estima una precipitación (Bio 17) adecuada de 10.74 mm resistiendo a futuro que esta disminuya 2.49 mm. Finalmente *A. salmiana* ssp. tolerará un aumento de precipitación de 2.67 mm (Cuadro 5)

Cuadro 5. Variables de mayor contribución al modelo de idoneidad de *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana* ssp. que componen el perfil climático actual y futuro.

Var.	%	n	\bar{x}	IC(\bar{x})	0.05	0.1	0.25	Mediana	0.75	0.9	0.95	Rango	DE	CV
Perfil bioclimático actual; <i>Agave cupreata</i>														
Bio 6	62.54	151	104.23	± 104.23	63.20	63.20	90.78	101.97	120.65	128.82	138.76	111.25	22.15	0.21
Bio 12	19.9	151	1094.36	± 1094.36	804.00	839.00	954.00	1012.00	1272.00	1360.00	1510.00	1070.00	217.59	0.20
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 4.5; AIV; <i>Agave cupreata</i>														
Bio 6	62.54	127	105.41	± 105.41	64.37	81.53	95.00	105.67	119.00	128.67	129.67	80.67	18.66	0.18
Bio 12	19.90	127	1095.09	± 1095.09	825.67	879	935.67	1086.00	1250.00	1349.00	1470.46	757.33	196.94	0.18
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 8.5; AIV; <i>Agave cupreata</i>														
Bio 6	62.54	108	95.07	± 95.07	53.70	70.57	83.00	95.33	108.00	115.00	118.00	96.00	19.19	0.20
Bio 12	19.90	108	1126.7	± 1126.69	881.08	930.30	947.67	1113.50	1266.70	1432.00	1463.60	686.00	186.20	0.17
Perfil bioclimático actual; <i>Agave durangensis</i>														
Bio 17	62.88	72	10.74	10.73	6.00	7.00	9.00	10.00	13.00	14.00	15.00	13.00	2.84	0.26
Bio 5	20.34	74	283.15	283.15	240.72	248.74	270.05	286.07	298.61	307.19	316.89	124.98	24.49	0.09
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 4.5; AIV; <i>Agave durangensis</i>														
Bio 17	62.88	30	8.64	8.64	5.33	5.33	6.83	8.33	9.50	12.00	12.73	9.99	2.43	0.28
Bio 5	20.34	30	296.97	296.97	258.67	265.27	279.92	303.67	310.33	322.53	334.07	99.00	24.35	0.08
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 8.5; AIV; <i>Agave durangensis</i>														
Bio 17	62.88	6	7.83	7.83	4.42	4.50	4.91	5.67	11.42	13.33	13.33	8.99	4.29	0.55
Bio 5	20.34	6	295.50	295.50	251.58	262.17	285.75	303.00	315.25	321.33	324.00	85.67	31.06	0.10
Perfil bioclimático actual; <i>Agave salmiana</i> ssp.														
Bio 13	56.86	80	78.16	78.16	50.95	53	60.75	73.00	90.00	112.00	131.00	115.00	24.77	0.32
Bio 10	29.89	80	200.47	200.47	163.09	164.84	196.91	204.71	212.3	218.45	224.21	91.24	18.58	0.09
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 4.5; AIV; <i>Agave salmiana</i> ssp.														
Bio 13	56.86	49	80.08	80.08	54.13	55.20	63.00	73.00	93.00	115.00	115.00	102.33	22.54	0.28
Bio 10	29.89	49	217.05	217.05	179.33	179.33	214.33	222	229	235.67	240.13	83.00	19.16	0.09
Perfil bioclimático al 2050, promedio de los tres MCG;RCP 8.5; AIV; <i>Agave salmiana</i> ssp.														
Bio 13	56.86	39	81.62	81.62	54.27	57.07	66.17	74.67	97.66	112.67	114.07	96.33	22.58	0.28

Bio 10	29.89	39	218.67	218.67	183.67	183.66	208.17	225.00	232.50	236.93	243.63	79.67	20.07	0.09
--------	-------	----	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	------

Vulnerabilidad de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. al 2050.

Se emplearon 7 criterios sugeridos por los autores de esta investigación para determinar la vulnerabilidad de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp.: 1) temporalidad de la Bio mas Importante (meses), 2) amplitud de la distribución geográfica de la especie (restringida o amplia), 3) existencia o no de las AIV (km²), 4) existencia o no de las NAI (km²), 5) disponibilidad de nuevos climas, 6) amplitud de nicho fundamental y 7) número de variables bioclimáticas que constituyen el modelo (Cuadro 6), considerando esto, el Agave de este estudio con mayor vulnerabilidad al cambio climático es *A. salmiana* ssp. considerando que su distribución está definida por un mes, tiene mayor superficie de AIV, tiene menor disponibilidad de nuevos climas y es la especie con la amplitud de nicho fundamental más estrecha (Cuadro 6).

Cuadro 6. Criterios para evaluar la vulnerabilidad de *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana* ssp. al cambio climático.

Especie	<i>A. cupreata</i>	<i>A. durangensis</i>	<i>A. salmiana</i> ssp.
Temporalidad de la Bio mas Importante (meses)	3	1	3
Numero de variables bioclimáticas que constituyen el modelo	2	3	1
Amplitud de la distribución geográfica de la especie	3	2	1
Existencia o no de las AIV (km ²)	2	1	3
Existencia o no de las NAI (km ²)	2	3	1
Disponibilidad de nuevos climas	1	2	3
Amplitud de nicho fundamental	1	2	3
Total	14	14	15

1 = Menor vulnerabilidad

3= Mayor vulnerabilidad

Discusión

Modelos candidatos en MNE

Gómez y Lacher Jr. (2017) crearon 10 modelos para *A. aspérrima*, *A. gentryi*, *A. havardiana*, *A. parryi*, *A. horrida*, *A. inaequidens*, *A. palmeri*, *A. americana*, *A. salmiana* y *L. nivalis* utilizando Maxent como herramienta de modelación; sin embargo, por ser una herramienta accesible ha provocado que algunos investigadores no cuestionen los modelos que se crean (Warren y Seifert, 2011). En este estudio se crearon más de 537 modelos candidatos de las tres especies, se modeló con algoritmo de Maxent combinado con el software R studio donde se creó el Paquete kuenm por Cobos et al. (2019), el cual ya ha sido utilizado por diferentes investigadores, obteniendo mayor número modelos candidatos (<1300) seleccionando el mejor lo que lo hace un proceso más robusto (Méndez *et al.*, 2020; Méndez *et al.*, 2021; Jiménez y Méndez, 2021).

Diferentes investigadores consideran el área bajo la curva ROC (AUC) como medida de significancia estadística del mejor modelo, Ríos et al. (2018) encontraron un valor de 0.93 en su estudio de *A. durangensis*, Hernández et al. (2020) un valor de 0.934 para *E. antisyphilitica*, en general estos valores entre más se acerquen a uno mejor rendimiento del modelo (Gómez y Lacher Jr, 2017); no obstante, este estadístico se considera no apropiado (Jiménez, 2012), por lo que en este estudio se utilizó la ROC parcial (Cobos *et al.*, 2019) obteniendo valores mayores que uno, 1.434 (*A. cupreata*), 1.660 (*A. durangensis*), 1.652 (*A. salmiana* ssp.) considerándose así un buen ajuste del modelo (Peterson *et al.*, 2008).

Registros de presencia e importancia de variables bioclimáticas

Después de la limpieza de presencias solo fueron válidos 78, 27 y 40 registros de *A. cupreata*, *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. respectivamente, en una investigación de candelilla (*E. antisyphilitica*) realizada en Zacatecas, México se modeló con 18 registros considerando un número viable (Bañuelos *et al.*, 2019), al igual que Elith et al. (2006) quienes consideran 30 presencias por lo menos para su estudio. Existen casos como el de Gómez y Lacher Jr. (2017; 2019) que modelaron con menos de 20 registros, utilizaron 5 registros para *A. horrida* y 7 para *A. havardiana*, en realidad no se tiene un número

definido como mínimo para los MNE considerando que, aunque los registros sean escasos se ha demostrado capacidad predictiva, aunque se debe ser cauteloso al interpretar resultados, cabe mencionar que es importante considerar especies con pocos registros en áreas que son poco conocidas y requieren actividades de conservación (Pearson *et al.*, 2007).

Las variables bioclimáticas son importantes para crear MDS y MNE (Booth, 2022), en dichos análisis las variables dependientes se pueden combinar utilizando variables climáticas y topográficas (Ríos *et al.*, 2018; Bañuelos *et al.*, 2019), aunque según investigadores las variables bioclimáticas son las que mejor explican la distribución de especies (Soberón y Peterson, 2005; Franklin, 2009), en este estudio se utilizaron solamente las variables bioclimáticas considerando que además de ser las que mejor explican la distribución de especies son las más influyentes en los impactos del cambio climático (Gómez y Lacher Jr, 2019).

En los agaves (*A. durangensis* y *A. salmiana ssp.*) las variables bioclimáticas que determinan su distribución son de precipitación (Bio 17 y Bio 13), Ríos *et al.* (2018) encontraron la Bio 19 (40.6 %) como mejor predictora para *A. durangensis*, aunque es la misma especie existen diferencias en la metodología, los investigadores antes mencionados consideraron como área de distribución el estado de Durango en este estudio se analizó toda la distribución de la especie, según Méndez *et al.* (2021) es recomendable que los registros abarquen toda la distribución de las especies para que las respuestas de las variables sean viables (Guisan *et al.*, 2014) además de que la contribución de las variables depende también del número de presencias (registros) (Elith *et al.*, 2006). En los estudios de MDS y MNE es muy importante la selección de variables bioclimáticas considerando que se han detectado variables correlacionadas y no informativas (Braunisch *et al.*, 2013; Booth, 2022), así como variables que combinan información de precipitación y temperatura (Escobar *et al.*, 2014). Este procedimiento también diferencia lo realizado aquí con el otro estudio de *A. durangensis* aunado a esto también el uso de *kuenm*, con lo anterior se justifican las diferencias de resultados. Para *A. cupreata* la variable que mejor predice su distribución es de temperatura (Bio 6), algo similar sucede con *D. wheeleri* donde la variable climática de mayor contribución es la Bio 1 (34.2%) (Becerra *et al.*, 2020). Comúnmente variables explicativas, número de registros, área de estudio,

algoritmo de modelación, análisis estadístico difieren en cada estudio de MNE lo que da lugar a las diferencias de resultados incluso siendo investigaciones de la misma especie como se mencionó anteriormente (Elith *et al.*, 2006; Jiménez y Méndez, 2021; Méndez *et al.*, 2021).

El nicho fundamental de los Agaves se definió por la Bio 1 y la Bio 12, con la finalidad de analizar las tolerancias ambientales de estas especies y considerando que uno de los objetivos de este estudio es analizar la sensibilidad de las especies a escenarios climáticos futuros. Otros investigadores como Méndez *et al.* (2021) y Jiménez y Méndez (2021) con objetivos similares utilizaron estas mismas variables para construir su espacio ambiental incluyendo la Bio 5 y la Bio 6, aunque también existen casos donde se utilizan otras variables como son altitud y variables de materia orgánica (Cruz *et al.*, 2014) en realidad las variables a utilizar para construir el espacio ambiental dependerá de los factores (climáticos, topográficos o de suelo) a considerar para el análisis de MNE.

La respuesta de idoneidad de las especies fue lineal (*A. durangensis* y *A. salmiana*) a excepción de *A. cupreata* donde la respuesta es cuadrática definiendo mejor su distribución siendo más realista que las respuestas lineales (Méndez *et al.*, 2021) la forma de estas en los MNE va depender de las características de idoneidad y los valores de precipitación y temperatura que definen la distribución de las especies (Olthoff *et al.*, 2016).

Idoneidad climática actual y futura (2050)

Según Méndez *et al.* (2021) la estratificación nos ayuda a identificar las áreas más importantes para conservación principalmente las áreas que se encuentran en el último estrato (0.66-1) de alta idoneidad, en este análisis se determinaron tres estratos de idoneidad (0-0.33, 0.33-0.66, 0.66-1), otros autores como Vargas *et al.* (2020) y Ríos *et al.* (2018) consideraron viables cinco estratos sin idoneidad, baja, media baja o media, media alta y alta o muy alta, de igual manera existen estudios de MNE donde se basan en criterios estadísticos para realizar dicha estratificación apoyándose del paquete 'stratifyR' (Méndez *et al.*, 2021) en realidad este proceso depende del criterio de cada investigador, lo importante es distribuir la idoneidad en partes para un mejor análisis e identificar las áreas prioritarias que requieran manejo.

Cruz et al. (2014) indican que las especies *Liquidambar styraciflua* L., *Quercus rubramenta* Trel., *Roldana robinsoniana* (Greenm.) H. Rob. and Brettell. tienen mayor idoneidad a mayores altitudes donde la precipitación es mayor y las temperaturas son bajas lo mismo encontraron Méndez et al. (2021) en *Dendroctonus mexicanus* Hopkins, *Pinus leiophylla* Schl. & Cham, *Pinus teocote* Schiede ex Schltldl. y *Pinus devoniana* Lindley) este mismo patrón sigue *A. durangensis* y *A. salmiana*, no sucede lo mismo con *A. cupreata* la cual no muestra una relación entre idoneidad y altitud.

Las tres especies de Agave bajo condiciones moderadas (RCP 4.5) disminuye menos de la mitad de su idoneidad alta, lo contrario sucede bajo condiciones drásticas (RCP 8.5) donde la idoneidad alta disminuye más de la mitad, Gómez y Lacher Jr. (2017) contrastaron estos resultados donde *A. parryi*, *A. havardiana*, y *A. Gentry* tienen mayor pérdida de idoneidad bajo condiciones del escenario moderado (RCP 4.5) deduciendo así una mayor tolerancia de estas especies bajo condiciones drásticas (RCP 8.5).

Transferencia de los modelos al 2050

En años anteriores para estimar una extrapolación estricta se utilizaba el proceso MESS con el que se calculan similitudes de cada punto del espacio geográfico (G) al centroide del conjunto de puntos de referencia (Elith *et al.*, 2011; Owens *et al.*, 2013), en esta investigación se utilizó el MOP que de igual manera estima extrapolación estricta de distribución de las especies a futuro difiriendo con MESS en que las similitudes se obtienen de los puntos más cercanos al centroide de la nube de puntos de referencia, caracterizando mejor la incertidumbre de las áreas a las que se trasfiere el modelo lo que ya ha sido demostrado por algunos investigadores (Owens *et al.*, 2013; Jiménez y Méndez, 2021).

Se aplicaron tres tipos de extrapolación al modelo final EL “Extrapolación Libre”, EC “Extrapolación Clamping” y NE “no extrapolación” en las que se analizaron las curvas de respuesta para saber cuál tipo de extrapolación utilizar, siendo viable EL en la que las curvas de respuesta no se truncaron lo que evita problemas al transferir los modelos (Owens *et al.*, 2013; Cobos *et al.*, 2019), prediciendo mejor la distribución de las tres especies de Agave, otros investigadores consideraron viable el tipo de extrapolación NE encontrando que las otras dos modalidades de extrapolación predecían de manera ilógica, dichas

diferencias se consideran a los cambios de las Bios al transferirlas en el tiempo y espacio (Owens *et al.*, 2013; Jiménez y Méndez, 2021).

Perfil bioclimático

En *D. mexicanus*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. devoniana* se encontró que las variables de mayor contribución al perfil bioclimático son de temperatura (Bio 10, Bio 1, Bio 10 y Bio 11) (Méndez *et al.*, 2021), de las especies de Agave de esta evaluación solo *A. cupreata* (Bio 6) coincidió con estos resultados, los otros dos Agaves fueron variables de precipitación (Bio 17, Bio 13) las de mayor contribución, aunque en este estudio se consideró algo muy importante a través de algebra raster se obtuvieron las AINV las cuales facilitan la explicación del perfil climático futuro dando lugar a determinar las tolerancias de la especie a los posibles cambios de precipitación y temperatura al 2050 respecto a las condiciones climáticas actuales considerando que estas áreas son donde las especies están actualmente y probablemente a futuro.

Vulnerabilidad de las especies al cambio climático

Está demostrado que las especies son vulnerables al cambio climático estimándose que estas disminuyen su idoneidad en años futuros (Blois *et al.*, 2013; Gómez y Lacher Jr, 2019) aunque unas más que otras, en este estudio la más vulnerable fue *A. salmiana* ssp. seguida de *A. cupreata*. Gómez y Lacher Jr. (2019) encontraron que en su estudio las especies más vulnerables con mayor pérdida de idoneidad actual fueron *A. salmiana* y *A. horrida* dicha diferencia de sensibilidad de las especies a futuro probablemente es por las diferencias morfológicas en particular el tamaño de hoja (largo y ancho) y espina terminal considerando que se ha demostrado que estas características influyen en la distribución de especies (Sánchez *et al.*, 2019).

Conclusiones

Resultó que la variable que define la distribución de *A. cupreata* es la Bio 6 (Temperatura Mín. del Mes más Frío (°C) de *A. durangensis* es la Bio 17 (Precipitación del ¼ más seco (mm)) y de *A. salmiana* spp. Bio 13 (Precipitación del Mes más húmedo (mm)), las tres especies son vulnerables al cambio climático ya que perderían en promedio más de la mitad de idoneidad al 2050 aunque se definió que las especies con mayor sensibilidad al cambio climático son *A. cupreata* y *A. salmiana* ssp., en ambas especies su distribución está definida por un solo mes del año (Bio 6 y Bio 13) aunado a esto son las especies con mayor pérdida de áreas predichas como idóneas (AIV) más *A. salmiana* ssp. además de que también tiene la amplitud de nicho más estrecho y menor disponibilidad de climas considerándose así más vulnerable que *A. cupreata*. En general los tres Agaves tienen menor tolerancia a condiciones del escenario de concentración de CO² extremas (8.5 w/m²) reduciéndose aproximadamente el 88.5 % de su idoneidad alta. Las especies *A. durangensis* y *A. salmiana* ssp. se estimó mayor idoneidad a mayores altitudes no sucede lo mismo con la otra especie de Agave.

Considerando la presión ejercida en estas especies de agave estudiadas por su aprovechamiento, esta investigación ayuda a hacer conciencia de la problemática a futuro si no se hace un aprovechamiento sostenible implementando estrategias de manejo para conservación de estos tres Agaves.

Referencias

- Aiello, L. M.E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B y Anderson, R. P. 2015. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*. 38, 541–545. [https://doi: 10.1111/ecog.01132](https://doi.org/10.1111/ecog.01132)
- Almaraz, A. N., Delgado, A. E, A., Hernández, V. V., Ortega, CH. M., Orea, L. G., Cifuentes, D. A., Ávila, R. J. A. and Muñiz, M. R., 2009. Profiling of phenolic compounds of somatic and reproductive tissues of *Agave durangensis* Gentry (Agavaceae). *American Journal of Applied Sciences*. 6, 1076-1085
- Arévalo, D y Padilla, C. 2016. Medición de la Confiabilidad del Aprendizaje del Programa RStudio Mediante Alfa de Cronbach. *Revista Politécnica*, 37, 68
- Arrazate, A. CH., Donjuan, L., Aguilar, J.C. G., Gómez, P.L y Ayala, B. A. 2015. Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *Revista Internacional de Botánica Experimental*. 84, 148-162. <https://doi.org/10.32604/phyton.2015.84.148>
- Bañuelos, R. J. E., Palacio, Ñ. J., Martínez, M. J. F., Olmos, O. G y Flores, C. J. A. 2019. Distribución potencial y abundancia de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. *Madera y Bosques*. 25, e2511657. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511657>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez, V.A., Lira, N.A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberón, J y Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*. 222, 1810-1819. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Becerra, L.J.L., Rosales, S.R., Ehsan, M., Becerra, L.J.S., Czaja, A., Estrada, R.J.L., Romero, M. U., Santana, E.S., Reyes, R.C.M., Ríos, S.J.C y Domínguez, M.A. 2020. Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*. 12, 34-55. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Blois, J. L., Zarnetske, P. L., Fitzpatrick, M. C y Finnega, S. 2013. Climate Change and the Past, Present, and Future of Biotic Interactions. *Science*. 341, 499–504. DOI: 10.1126/science.1237184
- Booth, T. H. 2022. Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology*. 47, 1506–1514. <https://doi.org/10.1111/aec.13234>

- Braunisch, V., Coppes, J., Arlettaz, R., Suchant, R., Schmid, H y Bollmann, K. 2013. Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography*. 36, 971-983. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00138.x>
- Cobos, M.E., Peterson, A.T., Barve, N. y Osorio, O.L. 2019. kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Colman, R. 2003. A comparison of climate feedbacks in general circulation models. *Climate Dynamics*. 20, 865–873. DOI 10.1007/s00382-003-0310-z
- Consejo Regulador del Mezcal. 2020. Informe Estadístico2020. <https://comercam-dom.org.mx>
- Cruz, C. G., López, M. L., Villaseñor, J. L y Ortiz, E. 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85, 189-199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Detlef, P., Vuuren, V., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. H., Kram, T., Krey, V., Francois, L. J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J y Rose, S. K. 2003. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*. 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Dormann, C. F. 2007. Promising the future? Global change projections of species distributions. *Basic and Applied Ecology*. 8, 387—397. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2006.11.001>
- Eguiarte, L. E., Jiménez, B. O. A., Aguirre, P. E., Scheinvar, E., Gámez, N., Gasca, P. J., Castellanos, M. G., Moreno, L. A y Souza, V. 2021. Evolutionary ecology of Agave: distribution patterns, phylogeny, and coevolution (an homage to Howard S. Gentry). *American Journal of Botany* 108, 216–235. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1609>
- Elith, J. y Leathwick, J. 2009. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nacazawa, Y., Overton, J. M., Townsend, P. A., Phillips, J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., & Zimmermann, N. E. 2006. Novel methods improve prediction of species` distributions from occurrence data.

- Ecography, 29, 129–151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Escobar, L.E., Lira, N.A., Medina, V.G. y Peterson, A.T. 2014. Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: Use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9, 221–229. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- Figueredo, U. C. J., Álvarez, R. G.D., García, M.M. A y Octavio, A. P. 2021. Morphological and genetic diversity of traditional varieties of agave in Hidalgo State, Mexico. *PLoS ONE* 16, e0254376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254376>
- Franklin, J. 2009. *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 320 p
- Frausto, G. E., Macías, R. F.J., Martínez, S. M., Jiménez- G. M.A y Méndez, G. S.J. 2008. Insectos comestibles asociados a las magueyeras en el ejido Tolosa, Pinos, Zacatecas, México. *Agrociencia*. 42, 243-252
- García, E. 1998. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de koppen*. Serie de libros. 97 p
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, M. D., Neale, B. R., Rasch J. P., Vertenstein M., Worley H. P., Yang Zong-Liang, Zhang M. 2011. The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- Gentry, S. H. 1982. *Agaves of Continental North America*. Univ. Arizona Press. Tucson, AZ. 669 p
- Gómez, R. E. P y Lacher Jr, T. E. 2017. Modelling the potential geographic distribution of an endangered pollination corridor in Mexico and the United States. *Diversity and Distributions*. 23, 67–78 <https://doi.org/10.1111/ddi.12499>
- Gómez, R. E. P y Lacher Jr, T. E. 2019. Climate change, range shifts, and the disruption of a pollinator-plant complex. *Scientific Reports*. 9, 14048 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50059-6>
- Guisan, A., Petitpierre, B., Broennimann, O., Daehler, C. y Kueffer, C. 2014. Unifying niche shift studies: Insights from biological invasions. *Trends in Ecology Evolution*, 29, 260–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2014.02.009>
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J. B., Lewis, Ll. N., Sutcliffe, P. R., Tulloch, A. I. T., Regan, T. J. R., Brotons, Ll., Madden, E. M., Pringle, Ch. M., Martin, T. G., Rhodes, J.R., Maggini, R., Setterfield, S. A., Elith, J., Schwartz, M. W., Wintle, B. A., Broennimann, O., Austin, M., Ferrier, S., Kearney, M. R., Possingham, H. P y Buckley, Y. M. 2013. Predicting species distributions for conservation

- decisions. *Ecology Letters*. 16, 1424–1435. <https://doi.org/10.1111/ele.12189>
- Harris, R.M.B., Grose, M. R., Greg Lee, G., Bindoff, N. L., Porfirio, L. L., y Paul Fox-Hughes, P. F. 2014. Climate projections for ecologists. *Climate Change*. 5, 621–637. <https://doi.org/10.1002/wcc.291>
- Hernández, H. J. A., Moreno, R. A., Valenzuela, N. L. M., Flores, H. A., Zamora, M. M. C. 2020. Distribución potencial de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19, 1-14. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.19.1>
- Hosni, E.M., Nasser, M.G., Al-Ashaal, S.A., Rady, M.H y Kenawy, M. A. 2020. Modeling current and future global distribution of *Chrysomya bezziana* under changing climate. *Scientific Reports*.10, 4947. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61962-8>
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., y Johnson, C. A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis; IPCC*. Cambridge University Press. United Kingdom y New York, USA. 881 pp
- Hutchinson, G.E. Concluding remarks. 1957. *Cold Spring Harbor on Quantitative Symposi Biology. GS Search*, 22, 415–427. <http://dx.doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- Ibarra, D. V. I., Lebgue, K. T., Viramontes, O. O., Reyes, C. I., Ortega, G. J. A y Morales, N. C. 2016. Modelo de nicho fundamental para *Coryphantha chihuahuensis* (cactaceae) en el estado de Chihuahua, México. *Ecología Aplicada*. 15, 11-17. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i1.578>
- Jiménez, S. M. A y Méndez G. J. 2021. Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 27, e2732117. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732117>
- Jiménez, V. A. 2012. Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* 21, 498–507. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00683.x>
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria, A.R., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. y Kessler, M. 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, 1–20. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Lara, Á. J.P y Alpuche, S. A.G. 2016. Análisis de la diversidad genética de agaves mezcaleros del centro de México. *Fitotecnia Mexicana*. 39, 323 – 330. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.323-330>

- Lê, S., Josse, J. y Husson, F. 2008. FactoMineR: An R Package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i0>
- Loera, G. H. M., Corral, R. J. J., Montiel, A. E., Solis, M. R., Chávez, S. J. A., y González, C. G. 2018. Calidad de sitio para *Agave durangensis* Gentry en la Sierra de Registrillo, Durango. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9, 1171-1180. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1582>
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R y Hardiman, S. C. 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4, 723–757. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Martínez, M. E. 2005. Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics*, 2, 42-55. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.8>
- Martínez, P. A., Gómez, S. J. M., Sáenz, R. C., Pérez, N. N., y Sánchez, V. N. 2011. Genetic diversity of *Agave cupreata* Trel. & Berger. Considerations for its conservation. *Revista fitotecnia mexicana*. 34, 159-165. <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.3.159>
- Méndez, E. F., Méndez, G. J. y Cerano, P. J. 2020. Distribución actual y potencial de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins bajo dos escenarios de cambio climático. *Madera Y Bosques*, 26, 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622002>
- Méndez, E. F., Méndez, G. J., Mendieta, O. R., López, D. J. Ó. M., y Nájera, L. J. A. 2021. Ecological Niches and Suitability Areas of Three Host Pine Species of Bark Beetle *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Forests*, 12, 385. MDPI <https://doi.org/10.3390/f12040385>
- Merrow, C., Smith, M. J. y Silander, J. A. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Mohammadi S., Ebrahimi E., Moghadam, S. M y Bosso, L. 2019. Modelling current and future potential distributions of two desert jerboas under climate change in Iran. *Ecological Informatics*. 52, 7-3. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.04.003>
- Mota, V. C., Encarnación, L. A., Ortega, A. H. M., Prieto, T. D.A., Peña, P. A., y Rojas, S. O.R. 2019. Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. En: *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex, Ciudad de México, pp. 39-63
- Moya, Á. A. S., Ortega, L. J. M y Jurado, P. X. 2015. Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas

- sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*. 05, 02. <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>
- Nava, C. N. Y., Medina, M. M. A., Martínez, J. L., Rodríguez, R y Aguilar, C. A. 2014. Agave biotechnology: an overview. *Reviews in biotechnology*. 1, 1–14. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.923813>
- Olivas, G.U.E., J. Valdez, L.R., Aldrete, A., González, G. M.J y Gil Vera, C. G. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Fitotecnia Mexicana*. 30, 411-419. <https://doi.org/10.35196/rfm.2007.4.411>
- Olthoff, A. E., Martínez, R. C y Alday. J. G. 2016. Patrones de distribución de especies arbustivas respecto a arbóreas a lo largo de un gradiente ambiental atlántico-mediterráneo: una aproximación a partir de datos del tercer Inventario Forestal Nacional. *Ecosistemas*. 25, 22-34. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.03>
- Olvera, V. L. A., Pardo, Ñ. J., Aguilar, R. N y Contreras, M. D. I. 2022. Detección de *Agave angustifolia* y *Agave cupreata* con técnicas geomáticas en Guerrero, México. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*. 23, e2241. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2241
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E., & Peterson, A. T. 2013. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>
- Pearson, R.G., Raxworthy, Ch. G., Nakamura, M., y Peterson, A.T. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. 34, 102–117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.xd>
- Peterson, A.T., Papeş, M. y Soberón, J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, T. A., Soberón, J. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: Getting the concepts right. *Natureza & Conservação*. 10, 102-107. <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2012.019>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P y Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*. 190, 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Plissock, P y Fuentes, C. T. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques

- disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*. 48, 61-79. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Ríos, S. J. C., Reyes, R. C. M., Rosales, S. R., Domínguez, M. P. A y Jiménez, O. R. 2018. Actualización preliminar de inventarios para áreas productoras de maguey cenizo en diferentes municipios de Durango. *Ciencia e Innovación* 1: 323-332
- Rivera, E. R y Amador, J. A. 2008. Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. parte I: evaluación de los modelos de circulación general CCM3.6 y ECHAM4.5. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*. 15, 131–173
- Rodríguez, G. B., López, D. S., Rodríguez, D. J.M., Gutiérrez, M. A y Tapia, C.E. 2008. Application of in Casa Pollination and Embryo Rescue Techniques for Breeding of Agave Species in Plant Cell Culture Protocols. Loyola, V.V. M., Ochoa, A. N. in *Molecular Biology*.1815. Humana Press, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8594-4_20. 2018
- Sánchez, G. A., Octavio, A. P., Barrientos, L. L y Meerow, A. W. 2019. Effect of elevation strata on morphological variation of two agave species with different niche amplitude. *International journal of plant sciences*. 180,000–000. DOI: 10.1086/703577
- Soberón, J. M. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* 33, 159-167. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06074.x>
- Soberón, J. y Peterson, T.A. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Soberón, J., Osorio, O. L y Peterson, T. 2017. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88, 437–441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Stewart, J. R. 2015. Agave as a model CAM crop system for a warming and drying world. *Frontiers in Plant Science*. 6, 624. doi: 10.3389/fpls.2015.00684
- Tello, H. J. 1983. Utilización del maguey (*Agave* spp) en el altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Mexico, 125 pp
- Tomas, C. D. 2010. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions* 16, 488–495

- Vargas, P. G., Valdez, C. R. D., López, S. A., Flores, H. A., Hernández, Q. N y Martínez, S. M. 2020. Current and Future Potential Distribution of the Xerophytic Shrub Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) under Two Climate Change Scenarios. *Forests*.11, 530. <https://doi.org/10.3390/f11050530>
- Warren, D. L, Seifert, S. N. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications* 21:335–342 <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>