

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL MEDIANTE ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA ARDILLA DE PETERS EN EL EJE NEOVOLCANICO

[POTENTIAL DISTRIBUTION THROUGH FUTURE CLIMATE CHANGE SCENARIOS FOR PETERS SQUIRRELS IN THE TRANS-MEXICAN VOLCANIC BELT]

Enrique Buendía-Rodríguez¹, José Gilberto Chávez-León², Tomás Pineda-Ojeda¹, Adrián Hernández-Ramos³, Jonathan Hernández-Ramos⁴, and José Israel López-Martínez⁵

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, Mexico

²INIFAP- CENID-COMEF, Coyoacán, Mexico

³INIFAP-Campo Experimental Saltillo, Saltillo, Coahuila, Mexico

⁴INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, Mexico

⁵TecNM-Instituto Tecnológico de Roque, Celaya, Guanajuato, Mexico

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The high risk of extinction of fauna species has generated great interest in studies of current and potential distribution under different future scenarios of climate change in order to implement conservation policies and carry out the preservation of ecosystems that can serve as reservoirs of biodiversity. The objective was to generate maps of potential distribution in two climate change scenarios of the Mexican Squirrel (*Sciurus oculatus* Peters, 1863) to serve as a basis for determining protection, conservation and management zones for this species in the Trans-mexican volcanic belt by means of ecological niche simulation models. We used 105 pairs of *S. oculatus* occurrence data from the GBIF-Mexico database, 19 climatic and environmental variables (BioClim) for two scenarios 2041-2060 and 2061-2080, from the GCM model CNRM-CM6-1 with RCP4.5 and RCP8.5, in addition to the current potential distribution. The Maximum Entropy Algorithm was used to generate the suitability maps using suitability values of 0.4-0.6 low, 0.61-0.8 medium and 0.81-1.0 high. The largest area with high suitability was the northwestern region of the State of Mexico; the areas with high suitability comprised 6359 ha (4 %), medium of 23,510 ha (14.7 %) and low of 26750 ha (16.7 %), for a present potential distribution. It is concluded that the modeling with Maxent's algorithm allowed generating potential distribution maps in two future scenarios for the Mexican Squirrel (*Sciurus oculatus* Peters, 1863) with values of AUC > 0.959 and kappa > 0.8923.

KEYWORDS: Biogeographic patterns, climate change, drastic future scenario, maxent, spatial modeling, wildlife.

RESUMEN: El elevado riesgo de extinción de las especies de fauna ha generado un gran interés en estudios de distribución actual y potencial bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático con la finalidad de aplicar políticas de conservación y llevar a cabo la preservación de los ecosistemas que puedan servir como reservorios de biodiversidad. El objetivo fue generar mapas de distribución potencial en dos escenarios de cambio climático de la Ardilla de peter (*Sciurus oculatus* Peters, 1863) que sirva como base para determinar zonas de protección, conservación y manejo de esta especie en el Eje Neovolcánico mediante modelos de simulación de nicho ecológico. Se emplearon 105 pares de datos de presencia de *S. oculatus* de la base de datos de GBIF- México, 19 variables climáticas y ambientales (BioClim) para dos escenarios 2041-2060 y 2061-2080, del

modelo MCG CNRM-CM6-1 con RCP4.5 y RCP 8.5, además de la distribución potencial actual. Se utilizó el Algoritmo de Máxima Entropía para generar los mapas de aptitud utilizando valores de idoneidad de 0.4-0.6 baja, 0.61-0.8 media y 0.81-1.0 alta. La mayor superficie con aptitud alta fue la región noroeste del Estado de México; las zonas con aptitud alta comprenden 6359 ha (4 %), media de 23510 ha (14.7 %) y baja de 26750 ha (16.7 %), para una distribución potencial presente. Se concluye que el modelado con algoritmo de Maxent, permitió generar mapas de distribución potencial en dos escenarios futuros para la Ardilla de peter (*Sciurus oculatus* Peters, 1863) con valores de AUC > 0.959 y kappa > 0.8923.

PALABRAS-CLAVES: Cambio climático, escenario futuro drástico, fauna, Maxent, modelado espacial, patrones biogeográficos.

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, resultado principalmente por el calentamiento global, así como la sobreexplotación de los recursos naturales y el cambio acelerado de uso de suelo, han ocasionado la disminución de los ecosistemas donde se desarrollan las especies vegetales y animales, disminuyendo sus poblaciones y que en varios casos han llevado a su extinción [1].

El elevado riesgo de extinción de las especies de fauna ha generado un gran interés en estudios de distribución actual y potencial, así como de escenarios futuros con la finalidad de aplicar políticas de conservación y llevar a cabo la preservación de los ecosistemas de los que forman parte, con el propósito de servir como reservorios de biodiversidad [2], [3].

Actualmente, los estudiantes de la ecología y ciencias a fin se enfrentan a un número creciente de técnicas de modelado de distribución de especies [4], estas se están convirtiendo en una herramienta crucial para la planificación de la conservación, la gestión de los recursos naturales, además de la comprensión de los efectos de las cambiantes condiciones ambientales en los patrones biogeográficos, entre otros [5]. También, con estas herramientas se pueden diseñar de espacios para la protección y conservación de especies amenazadas [6].

Por lo anterior, es necesario realizar estudios de distribución potencial bajo diferentes escenarios de cambio climático para diseñar e implementar acciones que conlleven a la restauración, conservación y manejo de especies (de interés) nativas en su ecosistema natural. Para ello, se han realizado trabajos de modelación de nichos ecológicos para predecir la distribución potencial utilizando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para diferentes especies y con diversos enfoques. El modelado de nicho ecológico es una técnica para predecir la distribución potencial de especies con un enfoque teórico-metodológico que permite determinar el impacto de la pérdida o modificación de ecosistema a distintas escalas de análisis y esto ha contribuido al conocimiento de las especies y su interacción con el ecosistema [7]. Para realizar estos procesos de clasificación (regionalización climática) es necesario seleccionar variables climáticas que tienen importancia funcional con relación a algunos procesos biológicos básicos [8] debido a que diferentes autores han reportado una alta correlación con los patrones biogeográficos de distribución de especies silvestres [9].

Debido al alto grado de perturbación de los diferentes ecosistemas ocasionados por el cambio climático, a la caza ilegal, etc., existe una gran cantidad de especies que se encuentran en riesgo de desaparecer. Uno de esos casos es la Ardilla de Peters o Ardilla de peter (*Sciurus oculatus* PETERS, 1893), que es endémica del centro de México y se encuentra en la categoría Pr "sujeta a protección especial", de la lista de especies en riesgo de acuerdo al Anexo Normativo III, actualizado en 2019, de la NOM-059-SEMARNAT-2010 [10]. Aunque existe trabajos aislados que han estudiado esta especie con datos de presencia/avistamientos [11], [12], se requieren ajustar diferentes modelos que generen mapas de distribución más específicos en diferentes escenarios de cambio climático tomando en cuenta características de ecología y conducta de la especie. Por lo que, se planteó como objetivo generar mapas de distribución potencial en dos escenarios de cambio climático de la Ardilla de peter (*Sciurus oculatus* Peters, 1863) que sirva como base para determinar zonas de protección, conservación y manejo de esta especie en el Eje Neovolcánico mediante modelos de simulación de nicho ecológico.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Se ubica en el Eje Neovolcánico o Eje Volcánico Transversal (EVT) (Figura 1a) que contiene 15 subprovincias fisiográficas (Figura 1b), abarca estados como Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Morelos, Estado de México y la Ciudad de México, exceptuando las llanuras costeras (Figura 1). El EVT es una provincia caracterizada por rasgos geomórficos, geológicos y bióticos muy particulares estos factores determinan los diferentes tipos de clima (templado

subhúmedo, cálido subhúmedo y seco, principalmente), que a su vez se ve reflejado en la diversidad biológica debido a la heterogeneidad ambiental que corresponde a bosques templados de pino, oyamel y encino, bosque mesófilo de montaña y en menor medida selva mediana, selva baja caducifolia, matorral xerófilo, pastizal y pastizal alpino, vegetación acuática y malpais [13].

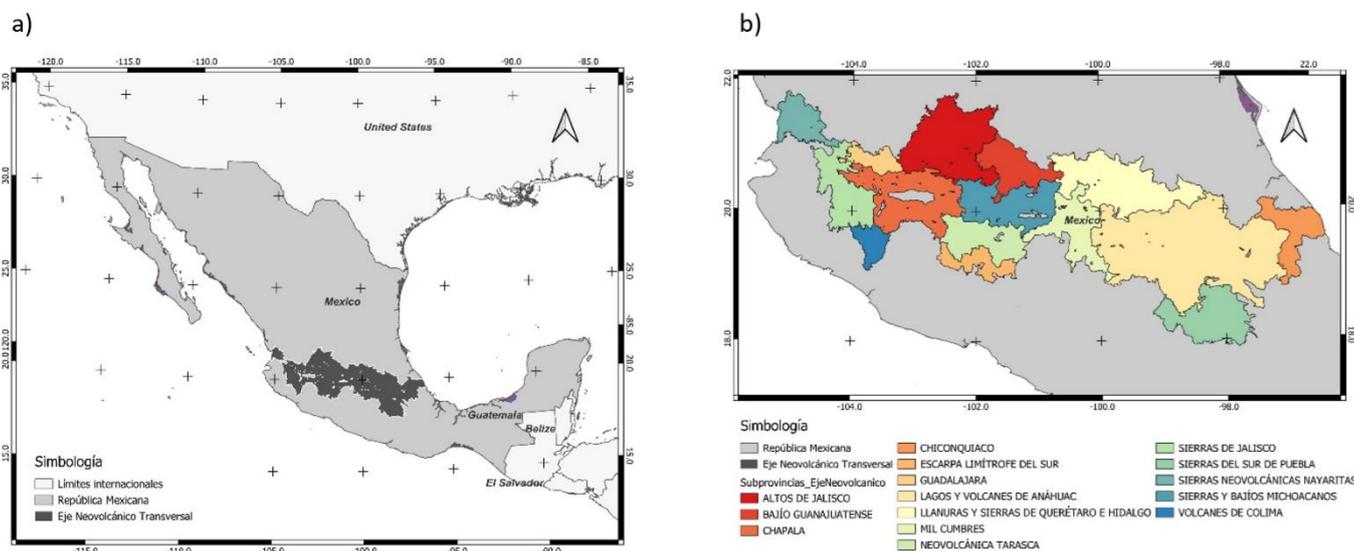


Fig. 1. Localización geográfica del Eje Neovolcánico (a) y subprovincias fisiográficas (b)

2.2 DATOS DE PRESENCIA

Para el análisis se empleó datos espaciales (longitud, latitud) de ocurrencia de *S. oculatus* procedentes de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMI) elaborada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y de la base de datos de GBIF- México (<https://doi.org/10.15468/dl.3bqsmw>). La base de datos fue depurada, eliminando información duplicada, referencias ubicadas en poblados, y lugares en los que las condiciones altitudinales o climáticas hicieran imposible su presencia quedando solamente para la zona de estudio 105 pares de datos [14].

2.3 VARIABLES CLIMÁTICAS

Los insumos para realizar la modelación de la distribución actual de la *S. oculatus* fueron 19 variables climáticas y ambientales (BioClim) en formato raster del periodo 1950 a 2000 (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>), seleccionadas de Worldclim 2.1 con una resolución de 1 km² por pixel (Tabla 1) [15]. Para eliminar la inestabilidad del rendimiento del modelo se eliminaron las variables con problemas de colinealidad, para lo cual se utilizó el método de factor de inflación de la varianza (VIF por sus siglas en inglés, *variance inflation factor*) para eliminar la colinealidad. El VIF refleja en qué medida los errores son inflados como resultado de la multicolinealidad de las variables incluidas en el modelo. Se utilizó la función "vifstep" del paquete *usdm* [16] del programa R versión 4.3.0 [17], esta función detecta la colinealidad entre las variables y excluye las que tienen un VIF alto [18], [19].

Tabla 1. Variables climáticas utilizadas en el estudio

Código	Descripción de las variables	Unidades	VIF inicial
Bio1	Temperatura media anual	°C	296.31
Bio2	Rango de temperaturas diurnas	°C	80.09
Bio3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)	s/d	42.91
Bio4	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar * 100)	CV	3499.78
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C	7.13*e12
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	°C	2.18*e13
Bio7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	°C	2.79*e13
Bio8	Temperatura media del trimestre más lluvioso	°C	3.69
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco	°C	3.58
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C	1399.82
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío	°C	3817.75
Bio12	Precipitación anual	mm	122.48
Bio13	Precipitación del mes más lluvioso	mm	87.52
Bio14	Precipitación del mes más seco	mm	76.97
Bio15	Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación)	CV	11.88
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso	mm	113.06
Bio17	Precipitación del trimestre más seco	mm	115.06
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	mm	7.72
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	mm	29.44

Donde: °C = grados centígrados, CV = coeficiente de variación, m = metros, mm = milímetros, VIF = factor de inflación de la varianza.

2.4 MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL

La información bajo escenarios cambio climáticos futuros, se obtuvieron de proyecciones del modelo de circulación global (MCG) CNRM-CM6-1 [20], con una resolución espacial de 2.5 arc-min (4.5 km²), los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y trayectorias de concentración representativas (RCP) RCP4.5 y RCP8.5 para los horizontes promedio 50 (2041-2060) y 70 (2061-2080) del proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados fase 6 (CMIP6 por sus siglas en inglés, *coupled model intercomparison project phase 6*) disponibles en el portal electrónico de WorldClim (<http://www.worldclim.org>). Los RCP se refieren al forzamiento radiativo (FR) expresado en W m⁻² (vatios por metro cuadrado) y se asume que varía al incrementarse los GEI. La dirección RCP4.5 y RCP8.5 representan escenarios en los que el FR total en el año 2100 habrá alcanzado 4.5 W m⁻² y 8.5 W m⁻². Los escenarios con FR RCP4.5 se clasifican como escenarios “conservadores”, y los escenarios con FR RCP 8.5 como “extremos” [21].

2.5 MODELADO DE LA INFORMACIÓN

Para la modelación de distribución actual y futuro bajo dos escenarios de cambio climático se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía mediante el programa Maxent® versión 3.4.3 que se encuentra en el entorno R® versión 4.3.0 [17] y el paquete *dismo* versión 1.3-9 [22]. Se realizó una selección aleatoria de 80 % (84 ocurrencias) de las localidades de ocurrencia para el entrenamiento del modelo Raw y el 20 % (21 ocurrencias) restantes como datos de prueba para la validación.

2.6 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

El rendimiento del modelo fue analizado mediante las características operativas del receptor (ROC por sus siglas en inglés, *Receiver Operating Characteristic*), el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) y el efecto de cada variable dentro del modelo [23]. La selección del mejor modelo se realizó de acuerdo con [24], donde los modelos con valores AUC cercanos a 1 y probabilidad 0 fueron los más consistentes. Los valores del AUC se categorizan como Excelente (1 - 0.9), Buena (0.8 - 0.9), Aceptable (0.7 - 0.8), Mala (0.6 - 0.7) y No Válida (0.5 - 0.6) [7].

2.7 GENERACIÓN DE MAPAS

Una vez que se determinó el mejor modelo de distribución actual y en escenarios futuros de cambio climático se generó los mapas mediante la función "ggplot2" [16] del programa R versión 4.3.0 [17], utilizando los umbrales de corte para establecer las categorías corresponden a los siguientes rangos, menor 0.40 como nula, de 0.41 a 0.60 baja, 0.61 - 0.80 media y mayor 0.81 alta.

3 RESULTADOS

3.1 VARIABLES CLIMÁTICAS

Como resultado del análisis de VIF entre las 19 variables climáticas utilizadas para el estudio solo nueve quedaron elegibles para la modelación (Bio1, Bio2, Bio3, Bio8, Bio9, Bio13, Bio15, Bio18 y Bio19), las restantes 10 tuvieron problemas de colinealidad con un umbral $th=10$. Las variables que se incluyeron en el estudio tienen relación principalmente con la temperatura (6 variables) y solo tres variables están relacionadas con la precipitación (Bio13, Bio18 y Bio19).

De estas variables, las que más contribuyeron para la distribución potencial en el presente fueron la Bio3 (Isotermalidad) y Bio9 (Temperatura media del trimestre más seco) con un 49.8 % y 28.2 % respectivamente, pero no fue así para las proyecciones a escenarios futuros, ya que las que mayor contribuyeron fueron Bio8 (Temperatura media del trimestre más lluvioso) con valores de 25.9 a 34.6 %, y la Bio2 (Rango de temperaturas diurnas) con valores que van de 15.5 a 16.6, muy similares para cada uno de los escenarios futuros (Tabla 2). Del modo contrario, las variables que menos contribuyeron en todos los casos fueron la Bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y Bio1 (Temperatura media anual) con una contribución menor al 5 % (Tabla 2).

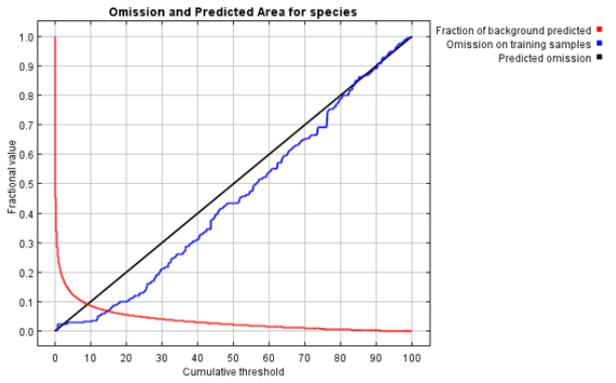
Tabla 2. Contribuciones porcentuales de las variables bioclimáticas en los modelos de predicción

Variable	Presente	Futuro moderado (2041-2060)	Futuro moderado (2061-2080)	Futuro drástico (2041-2060)	Futuro drástico (2061-2080)
Bio1	0.8	1.2	0.7	2.1	1.5
Bio2	8.0	16.6	15.5	15.9	15.9
Bio3	49.8	15.3	11.1	9.9	9.7
Bio8	1.6	25.9	34.0	33.0	34.6
Bio9	28.2	12.9	8.5	7.9	6.7
Bio13	2.7	3.5	3.6	1.6	1.1
Bio15	4.4	10.9	14.6	14.1	15.1
Bio18	3.3	11.0	7.1	12.6	12.7
Bio19	1.1	2.6	4.9	2.9	2.6

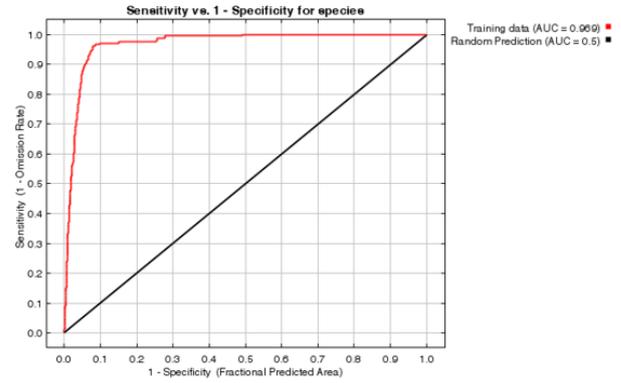
3.2 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

Los valores de AUC obtenidos para la modelación de los escenarios futuros fueron superiores a 0.95, lo cual, estadísticamente, se interpretó como un buen ajuste del modelo, y presentaron los valores más altos para los datos de entrenamiento y de prueba 0.959 y 0.958, respectivamente (Figura 2). Donde se obtuvieron los valores más bajos (AUC=0.959) en la distribución drástica (RCP8.5) para el periodo (2061-2080) (Figura 2j y 2k) y el más alto (AUC=0.969) fue para la distribución presente (Figura 2a y 2b) y la distribución moderada (RCP4.5) para el periodo (2041-2060) (Figura 2c y 2d). Estos valores contribuyen de manera espacial a una mejor distribución del nicho potencial de la especie en los diferentes escenarios estudiados.

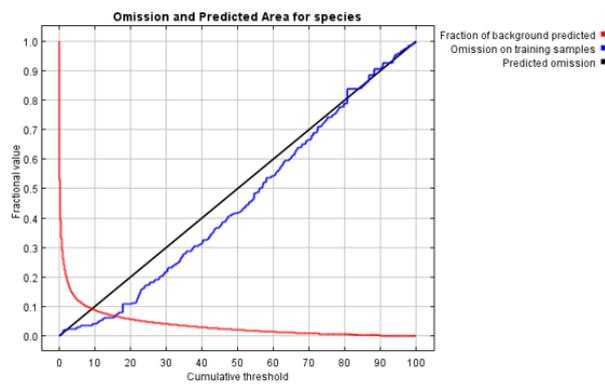
a)



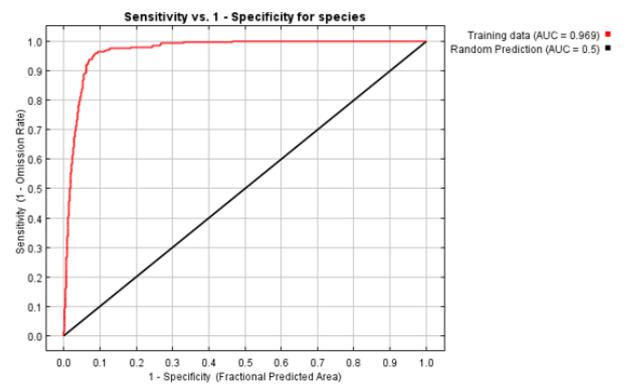
b)



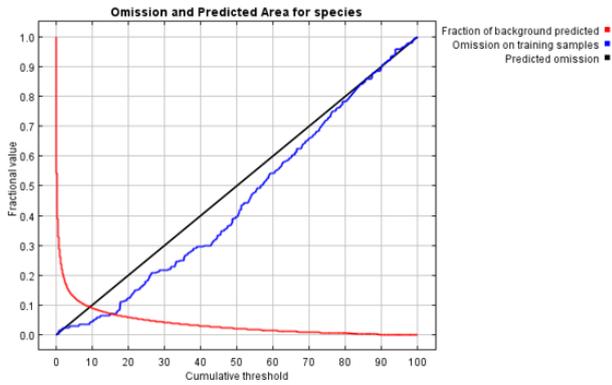
c)



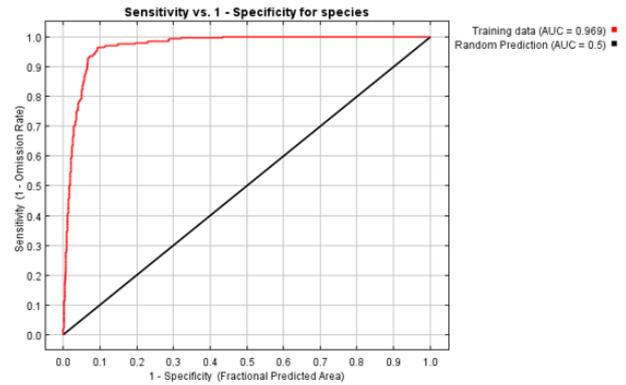
d)



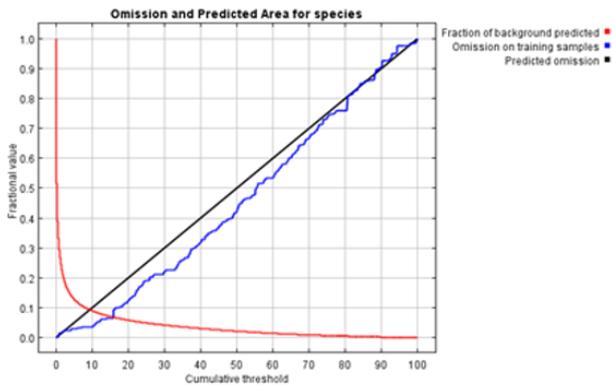
e)



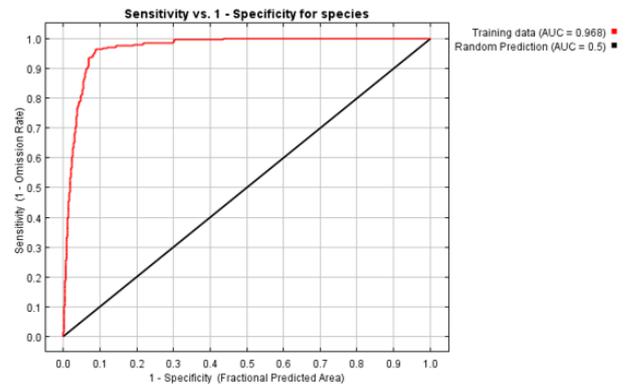
f)



g)



i)



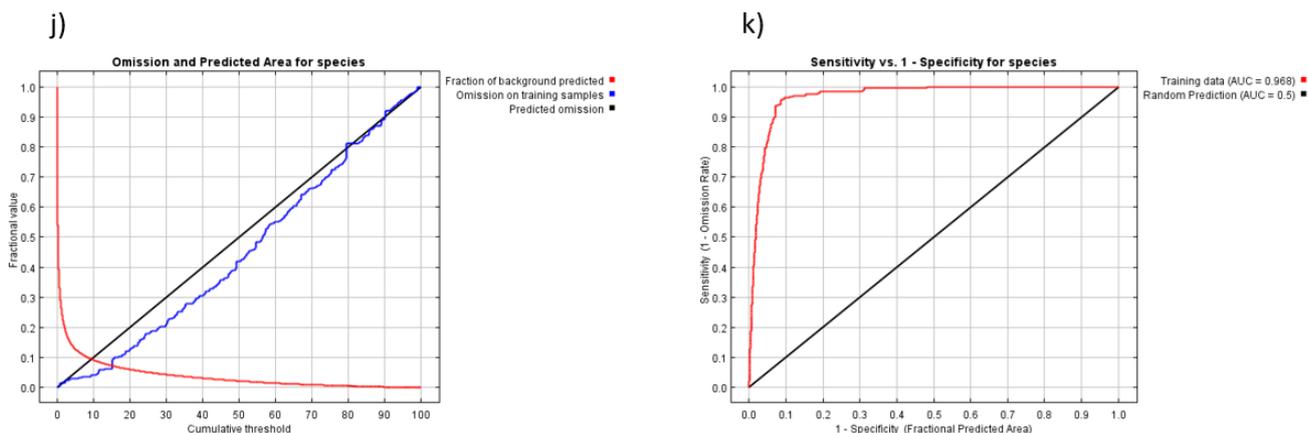
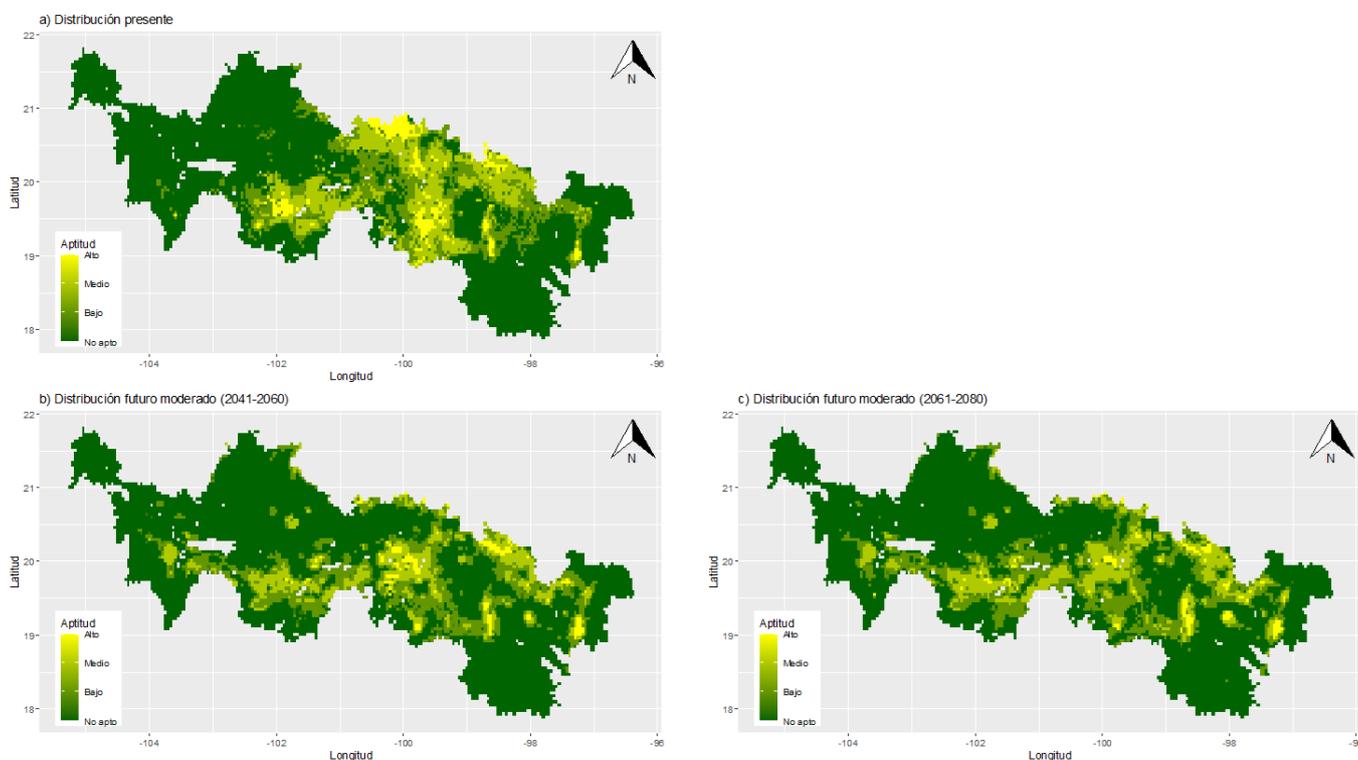


Fig. 2. Graficas de AUC obtenidas para la modelación de distribución bajo diferentes escenarios

3.3 GENERACIÓN DE MAPAS

El modelado de la información permitió la generación de mapas de distribución potencial de la Ardilla de peter con valores de kappa que van desde 0.8923 para la distribución actual hasta un 0.94 para la distribución moderada (RCP4.5) para el periodo (2041-2060). Lo que refuerza los valores del AUC > 0.9, y así poder realizar los mapas con un alto grado de confiabilidad.

Las zonas donde se presenta la distribución de la ardilla está ubicada en los bosques templados (bosques de pino-encino) de la parte central de eje Neovolcánico, en las subprovincias fisiográficas de Llanuras y sierra de Querétaro e Hidalgo, Lagos y volcanes del Anáhuac, principalmente Neovolcánica tarasca y Mil cumbres (Figura 3). En general, las zonas ubicadas en la subprovincia Mil cumbres presentan una aptitud alta de distribución de la ardilla, pero se van perdiendo en los dos escenarios futuros y en dos periodos analizados (Figura 3), por ejemplo, se pierde zonas de aptitud alta en la zona corresponde al norte de la subprovincia llanuras y sierra de Querétaro e Hidalgo (Figura 3a), que ya no se observa en los mapas restantes.



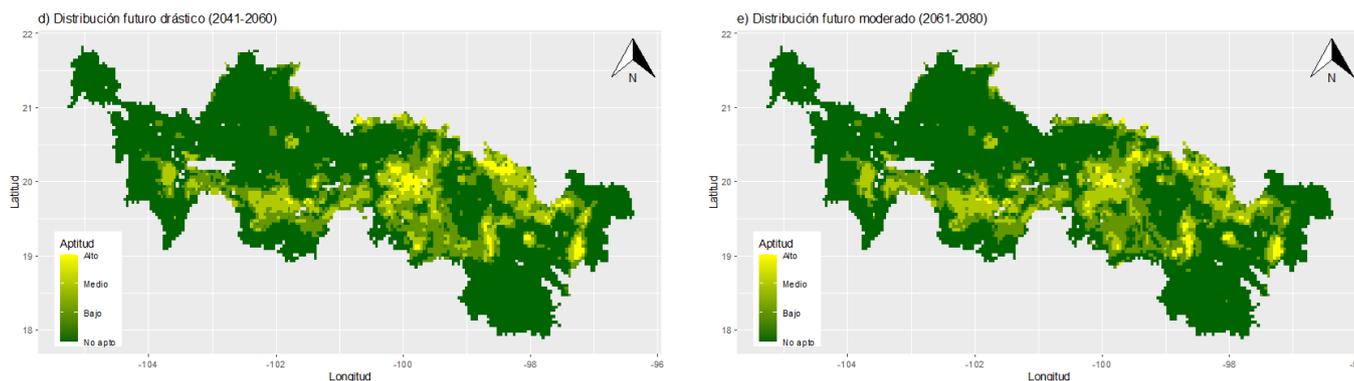


Fig. 3. Mapas de distribución potencial actual y bajo dos escenarios de cambio climático de la Ardilla de Peters (*Sciurus oculatus*) en el Eje Neovolcánico

La zona con mayor superficie con aptitud alta es la región noroeste del Estado de México, en los límites con Querétaro y Guanajuato, seguido de la zona del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Figura 3). En términos generales, las zonas con aptitud alta para la distribución potencial de la Ardilla de peter en el Eje Neovolcánico comprenden una superficie de 6 359 ha (4 %), para la aptitud media de 23 510 ha (14.7 %) y para aptitud baja de 26 750 ha (16.7 %), para una distribución potencial presente (Figura 4a). Los resultados en escenarios futuros presentan una disminución de la distribución de zonas con aptitud alta que van de un 4 % de la distribución presente a un 1.6 % en un escenario moderado (RCP4.5) en el periodo 2061-2080. También disminuyó la aptitud media de 14.7 % a 11 y 11.1 % en el periodo 2061-2080 para ambos escenarios. Pero en el caso de la aptitud baja se incorporaron nuevas zonas aumentando de 16.7 % en la distribución presente hasta 19.2 % en el escenario 2061-2080 con un RCP4.5 (Figura 4a).

Una manera clara de identificar las tasas de conversión de cambio entre clases de aptitud es un gráfico de tasa de cambio, donde las categorías que se encuentren por debajo de cero están perdiendo superficie y las que se dispone por arriba de este valor están ganado superficie. Por lo que, en este caso, se puede observar que tanto con el modelo RCP4.5 y RCP8.5 en el periodo 2041-2060, tiene una pérdida de superficie un 4.8 y 3.8 % para una aptitud Media, respectivamente, con respecto a la distribución actual, además la aptitud Alta también tiene una tasa negativa de alrededor de 2 % para ambos casos (Figura 4b). Sin embargo, en el periodo 2061-2080, presenta una ganancia de alrededor de 1 %, en ambos casos.

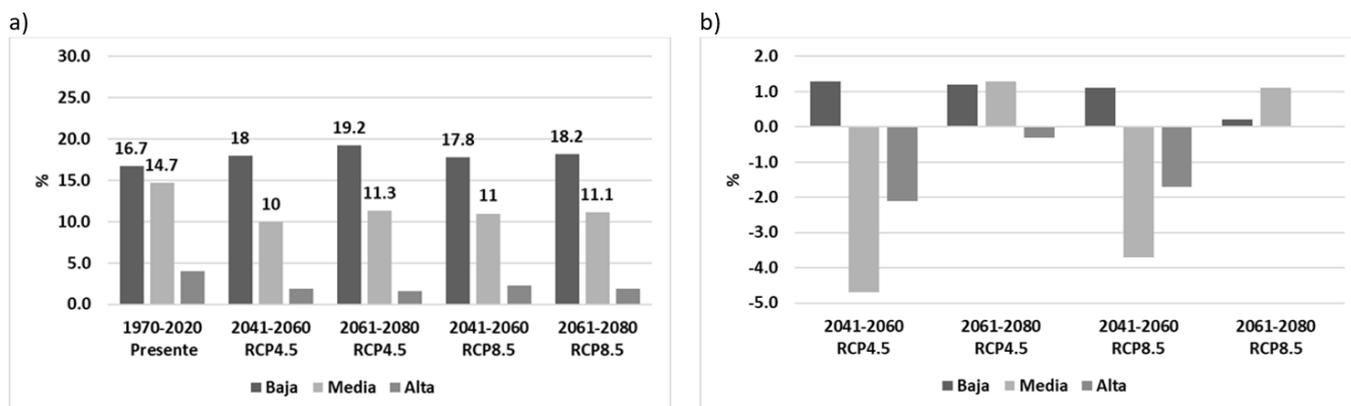


Fig. 4. Superficie de categorías de aptitud por modelo de escenario futuro (a) y Tasa de cambio entre las diferentes aptitudes por modelo de distribución en diferentes escenarios (b)

Con esta información se podría plantear dos zonas para la conservación del hábitat de la ardilla de peter que sirva como un santuario para esta especie en peligro de extinción, una de ellas es la sierra nevada (Parque Nacional Izta-Popo) el cual ha mantenido en los diferentes escenarios una aptitud alta para el desarrollo de la especie, y una segunda área, sería donde colindan los estados de Querétaro, Estado de México, Hidalgo y Michoacán.

4 DISCUSIÓN

En cuanto al clima [25] señala que las variables que más contribuyeron a la modelación de distribución de la ardilla de Albert fueron Bio1 (Temperatura media anual = 37.1 %), Bio17 (Precipitación del trimestre más seco = 21.2 %), que en este estudio la Bio1 fue de las variables de menor contribución (<2.1) y la Bio17, no fue considerada en los modelos, la tercer variable consideradas por dichos autores fue Bio15 (Estacionalidad en la precipitación = 12.4), que a diferencia de las variables anteriores tiene una contribución del 10.9-15.1 % en los escenarios futuros. Un estudio realizado en Europa del este, para predecir la distribución potencial actual de *S. citellus*, las variables que más contribuyeron fueron Bio2 y Bio11 (28.4 y 13.6) [26] que a diferencia de este estudio la variable Bio2 obtuvo valores superiores (alrededor de 13 %), y la variable Bio11 no fue considerada como inicio. Lo que indica que existen condiciones ecológicas diferentes de desarrollo entre especies de ardillas.

Autores como [27] encontraron valores similares de AUC (0.918) donde determinaron la distribución actual de Ardilla zorra oriental (*Sciurus niger rufiventer*) en el sureste de California, Estados Unidos, o valores de AUC=0.828 obtenidos por [28] donde utilizaron un modelo de nicho ecológico para predecir la expansión del área de distribución del Ardilla gris oriental en California. [26] obtuvo AUC>0.934 para determinar la distribución de dos linajes de *S. citellus* en nuevos países europeos (Austria, Bulgaria, Czech Republic, Hungary, Macedonia, Moldova, Romania, Serbia and Slovakia). En estudios similares en estudios de vegetación han registrado valores de entre 0.7 y 0.9 [29] o los obtenidos por [25], para la ardilla Abert en la Sierra Madre Occidental, México (AUC > 0.77), por lo que con esta metodología se alcanzaron resultados precisos con el uso de MaxEnt, y se interpretan como un buen ajuste de los modelos utilizados [30].

En estudios como [31] en el este de Europa, determina que los hábitats de las ardillas son preferentemente en las zonas montañosas, coincidiendo con lo encontrado en este estudio. Además, en México, estudios como [32] generaron una distribución potencial actual similar a la encontrada, ubicada principalmente hacia el norte, con tendencia hacia el estado de San Luis Potosí, pero con áreas muy restringidas de zonas aptas; mientras que, el mapa de distribución generada por [33], muestra zonas más extensas en la región del Valle de México, como también lo señala también [34].

Aunque existen pocos estudios de análisis de distribución potencial de especies de pequeños mamíferos, los valores encontrados en este trabajo fueron mayores a los obtenidos por [35], para determinar la distribución de *Leopardus pardalis* (ocelote) en la Sierra Madre Oriental y a los resultados obtenidos por [8], donde hacen una evaluación de la distribución del *Panthera onca* (jaguar) en el estado de Guerrero.

Una variable que se debería de contemplar en la modelación de distribución en el caso de las ardillas es la capa de vegetación, debido a que esta especie prefiere los ecosistemas forestales de clima templado-frío, como queda comprobado en este estudio y lo sustenta [25] donde reporta que el modelado para la ardilla Abert (*Sciurus aberti*) se distribuye principalmente en bosques de coníferas (Bosque de pino, de pino-encino), en Sierra Madre Occidental (SMO), México.

Aunque esta metodología está más ampliamente utilizada en distribución de especies vegetales, se ha confirmado que la metodología utilizada funciona con especies de fauna, que podría considerarse un poco más difícil de modelar debido a que se tiene el factor de movilidad de las especies, pero se ha determinado que las condiciones climáticas en que se desarrollan tienen un patrón biogeográfico determinado.

5 CONCLUSIÓN

Con el modelo de nicho ecológico mediante la utilización del algoritmo de Maxent® se puede generar mapas de distribución potencial actual y de escenarios futuros bajo diferentes escenarios de cambio climático del ecosistema de la Ardilla de Peter (*Sciurus oculatus*) con valores de AUC > 0.959 y kappa > 0.8923. Con este tipo de metodologías se aporta información para determinar cuáles son las zonas más propicias para realizar mejores prácticas de manejo forestal sustentable en toda el área de distribución de esta especie para su conservación, debido a que se encuentra Sujeta a Protección Especial.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecemos al INIFAP por financiar este trabajo a través del proyecto fiscal 12385834746 – “Efecto de las prácticas silvícolas en la diversidad de la fauna silvestre en predios sujetos a manejo forestal en el Eje Neovolcánico”.

REFERENCIAS

- [1] E. Uribe B., *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesis_pp_cc_cc_y_sus_efectos_en_la_biodiversidad.pdf
- [2] E. Jardel Peláez, Criterios para la conservación de la biodiversidad en los programas de manejo forestal. 2015.
- [3] L. Vargas-Larreta B., Manual de mejores prácticas de manejo forestal para la conservación de la biodiversidad en ecosistemas templados de la región norte de México. Zapopan, Jalisco: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Comisión Nacional Forestal. CONAFOR, 2013.
- [4] S. Vaz *et al.*, «Modelling species distributions using regression quantiles», *Journal of Applied Ecology*, vol. 45, n.º 1, pp. 204-217, feb. 2008, doi: 10.1111/j.1365-2664.2007.01392.x.
- [5] R. J. Whittaker, M. B. Araújo, P. Jepson, R. J. Ladle, J. E. M. Watson, y K. J. Willis, «Conservation Biogeography: assessment and prospect», *Diversity and Distributions*, vol. 11, n.º 1, pp. 3-23, ene. 2005, doi: 10.1111/j.1366-9516.2005.00143.x.
- [6] B. Benito y J. Peñas, «Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica», *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, ISSN 1578-5157, N.º. 7, 2007, vol. 7, ene. 2007.
- [7] J. Elith y J. R. Leathwick, «Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time», *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, vol. 40, n.º 1, pp. 677-697, dic. 2009, doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
- [8] A. P. Cuervo-Robayo y O. Monroy-Vilchis, «Distribución potencial del jaguar *Panthera onca* (Carnivora: Felidae) en Guerrero, México: persistencia de zonas para su conservación», *RBT*, vol. 60, n.º 3, nov. 2012. doi: 10.15517/rbt.v60i3.1813.
- [9] J. L. Villaseñor, y O. Téllez-Valdés, «Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México», *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40075203>.
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010. Estados Unidos Mexicanos, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://sidof.segob.gob.mx/notas/imagenes/5578808>.
- [11] C. Ballesteros-Barrera, «Distribución potencial de las especies de mamíferos con distribución restringida presentes en México». Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, 2024. doi: 10.15468/JKME78.
- [12] G. Ceballos González, J. Arroyo Cabrales, R. Medellín Legorreta, y Y. Domínguez-Castellanos, «Lista actualizada de los mamíferos de México», *RMM*, vol. 9, n.º 1, pp. 21-71, ene. 2005, doi: 10.22201/ie.20074484e.2005.9.1.153.
- [13] M. Suárez-Mota y O. Téllez-Valdés, «Red de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad del Eje Volcánico Transmexicano analizando su riqueza florística y variabilidad climática», *Polibotánica*, vol. 38, pp. 67-93, dic. 2013.
- [14] T. C. Monterrubio-Rico *et al.*, «Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México», *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 87, n.º 3, pp. 1103-1117, sep. 2016, doi: 10.1016/j.rmb.2016.06.004.
- [15] S. E. Fick y R. J. Hijmans, «WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas», *Intl Journal of Climatology*, vol. 37, n.º 12, pp. 4302-4315, oct. 2017, doi: 10.1002/joc.5086.
- [16] B. Naimi, N. A. S. Hamm, T. A. Groen, A. K. Skidmore, y A. G. Toxopeus, «Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?», *Ecography*, vol. 37, n.º 2, pp. 191-203, feb. 2014. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x.
- [17] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. (2023). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [En línea]. Disponible en: <https://www.R-project.org/>.
- [18] A. G. Azrag, S. A. Mohamed, S. Ndlela, y S. Ekesi, «Predicting the habitat suitability of the invasive white mango scale, *Aulacaspis tubercularis*; Newstead, 1906 (Hemiptera: Diaspididae) using bioclimatic variables», *Pest Management Science*, vol. 78, n.º 10, pp. 4114-4126, oct. 2022, doi: 10.1002/ps.7030.
- [19] C. F. Dormann *et al.*, «Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance», *Ecography*, vol. 36, n.º 1, pp. 27-46, ene. 2013, doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.
- [20] A. Voltaire, «CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1 model output prepared for CMIP6 HighResMIP». Earth System Grid Federation, 2019. doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.1925.
- [21] U. Manzanilla Quiñonez, O. A. Aguirre Calderón, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza, y J. I. Yerena-Yamallel, «Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para tres áreas naturales protegidas en el Eje Neovolcánico Transversal», *RMCF*, vol. 9, n.º 50, nov. 2018, doi: 10.29298/rmcf.v9i50.255.

- [22] R. J. Hijmans, S. J. Phillips, J. R. Leathwick, y J. Elith, *dismo: Species Distribution Modeling. R package*. (2022). [En línea]. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>.
- [23] S. J. Phillips, R. P. Anderson, y R. E. Schapire, «Maximum entropy modeling of species geographic distributions», *Ecological Modelling*, vol. 190, n.º 3-4, pp. 231-259, ene. 2006, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [24] A. T. Peterson, M. Papeş, y J. Soberón, «Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling», *Ecological Modelling*, vol. 213, n.º 1, pp. 63-72, abr. 2008, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008.
- [25] S. Sandoval, C. López-González, J. G. Escobar-Flores, y R. O. Martínez-Rincón, «Effect of spatial resolution, algorithm and variable set on the estimated distribution of a mammal of concern: the squirrel *Sciurus aberti*», *Écoscience*, vol. 27, n.º 3, pp. 195-207, jul. 2020, doi: 10.1080/11956860.2020.1772609.
- [26] S. Demi.
- [27] R. B. Garcia y A. E. Muchlinski, «Range Expansion of the Eastern Fox Squirrel within the Greater Los Angeles Metropolitan Area (2005 – 2014) and Projections for Continued Range Expansion», *Bulletin, Southern California Academy of Sciences*, vol. 116, n.º 1, pp. 33-45, abr. 2017, doi: 10.3160/soca-116-01-33-45.1.
- [28] C. M. Creley, F. M. Shilling, y A. E. Muchlinski, «An Ecological Niche Model to Predict Range Expansion of the Eastern Gray Squirrel in California», *Bulletin, Southern California Academy of Sciences*, vol. 118, n.º 1, p. 58, abr. 2019. doi: 10.3160/0038-3872-118.1.58.
- [29] R. Reynoso Santos *et al.*, «El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino», *RMCF*, vol. 9, n.º 48, jul. 2018, doi: 10.29298/rmcf.v8i48.114.
- [30] R. Ávila Coriaz, R. Villavicencio García, y J. A. Ruiz Corral, «Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco», *RMCF*, vol. 5, n.º 24, pp. 92-109, may 2018, doi: 10.29298/rmcf.v5i24.322.
- [31] G. Kolomytsev y V. Prydatko-Dolin, «Red squirrel (*Sciurus vulgaris*) habitats change modelling in Eastern Europe in the scope of climate change according to new generation scenarios (SSPs) by 2100», *Theriol. Ukr.*, vol. 2020, n.º 20, pp. 105-126, feb. 2021, doi: 10.15407/TU2013.
- [32] V. Sánchez-Cordero, P. Rodríguez, N. Moreno-Almeraya, y M. Jiménez-Cruz, «*Sciurus oculatus* (ardilla de Peter). Distribución Potencial en México», Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto de Biología, UNAM. México., 2020. [En línea]. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/soc040dpgw>.
- [33] C. Ballesteros-Barrera, O. Aguilar-Romero, O. Téllez-Valdés, y J. López-Jardines, «*Sciurus oculatus* (ardilla de Peter). Distribución potencial.», Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Unidad Iztapalapa, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/soc053dpgw>.
- [34] E. Buendía-Rodríguez, T. Pineda-Ojeda, E. Flores-Ayala, J. G. Chávez-León, J. Hernández-Ramos, y V. Guerra-de la Cruz., «Distribución potencial de la ardilla mexicana (*Sciurus oculatus* PETERS 1863), en el eje Neovolcánico», en *Temas actuales en investigación en ciencias agrícolas, forestales y agronegocios*, 1.ª ed., Delicias, Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua, 2022, pp. 176-183.
- [35] L. A. Cacelin-Castillo, O. C. Rosas-Rosas, E. Martínez-Meyer, J. H. García-Chávez, y E. J. Torres-Romero, «Potential distribution of the Ocelot (*Leopardus pardalis*) in southern Sierra Madre Oriental and Sierra Negra, México», *Therya*, vol. 11, n.º 2, pp. 232-238, may 2020, doi: 10.12933/therya-20-641.