

Escenario futuro drástico de distribución potencial de la ardilla de Peters (*Sciurus oculatus* Peters 1863) en el Eje Neovolcánico

Drastic future scenario of potential distribution of Peters's squirrel (*Sciurus oculatus* Peters 1863) in the Axis Neovolcanic

Enrique Buendía-Rodríguez, Enrique¹, Pineda-Ojeda, Tomás¹, Chávez-León, José Gilberto ², Hernández-Ramos, Adrián ³ y Ríos-Saucedo, Julio César ^{4*}

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Valle de México.

² INIFAP- CENID-COMEF.

³ INIFAP-Campo Experimental Saltillo.

⁴ INIFAP-Campo Experimental Valle del Guadiana.

*Autor para correspondencia: jrissaucedo@hotmail.com

RESUMEN

Las emisiones continuas de Gases Efecto Invernadero (GEI) causan un calentamiento adicional al que existe actualmente. Un cambio moderado o drástico del clima afectará directamente a la biodiversidad en los ecosistemas terrestres, y a la disminución de las poblaciones, tanto de fauna como de flora, por lo que se ha despertado un gran interés para realizar estudios de distribución actual y en diferentes escenarios futuros como información básica para definir políticas para la conservación y preservación de los ecosistemas. El objetivo fue determinar la distribución potencial en un escenario futuro drástico de cambio climático de *Sciurus oculatus* en el Eje Neovolcánico, mediante modelos de Maxent. Se emplearon 67 pares de datos de presencia de *S. oculatus*, 19 variables climáticas y ambientales para cuatro periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, del modelo GCM - CanESM5 con RCP 8.5. Se utilizó el Algoritmo de Máxima Entropía, y se generaron 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 9,000 km² (5.0 %), media de 17,000 km² (11 %) y baja de 18,000 km² (11.5 %), aproximadamente. Se concluye que el modelado con técnicas de nicho ecológico, mediante el algoritmo de Maxent, permitió generar mapas de distribución potencial de escenarios futuros drásticos de la Ardilla *Sciurus oculatus*.

Palabras clave: cambio climático, escenario futuro drástico, Maxent, modelado espacial.

ABSTRACT

Continued emissions of Greenhouse Gases (GHG) cause additional warming than currently exists. A moderate or drastic change in climate will directly affect biodiversity in terrestrial ecosystems, and the decrease in populations of both fauna and flora, which is why great interest has been aroused to carry out studies of current distribution and in different scenarios. futures as basic information to define policies for the conservation and preservation of ecosystems. The objective was to determine the potential distribution in a drastic future scenario of climate change of *Sciurus oculatus* in the Neovolcanic Axis, using Maxent models. 67 pairs of *S. oculatus* presence data, 19 climatic and environmental variables were used for four periods 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100, from the GCM - CanESM5 model with RCP 8.5. The Maximum Entropy Algorithm was used, and suitability maps were generated 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 northwest region of the State of Mexico; The areas with high suitability comprise 9,000 km² (5.0%), average 17,000 km² (11%) and low suitability 18,000 km² (11.5%), approximately. It is concluded that modeling with ecological niche techniques, using the Maxent algorithm, allowed the generation of potential distribution maps of drastic future scenarios for the Squirrel *Sciurus oculatus*.

Keywords: climate change, drastic future scenario, maxent, spatial modeling

INTRODUCCIÓN

Las emisiones continuas de Gases Efecto Invernadero (GEI) causan un calentamiento adicional al que existe actualmente, por lo que en el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) se definieron cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m² (IPCC, 2014).

Los resultados para estos escenarios indican que la concentración de CO₂ en la atmósfera será mayor en 2100 (936 ppm) que en la actualidad (380 ppm). Lo que se verá reflejado en un incremento de temperatura de 3.8 a 6.0 °C y reducciones de precipitación de 12 a 24 %, por encima de la media global.

Un cambio moderado o drástico del clima afectará directamente a la biodiversidad en los ecosistemas terrestres, en su mayoría bosques y selvas (Kaeslin & Williamson, 2010). La disminución de las poblaciones, tanto de fauna como de flora, han despertado un gran interés para realizar estudios de distribución actual y en diferentes escenarios futuros como información básica para definir políticas para la conservación y preservación de los ecosistemas.

De acuerdo con esta problemática, es necesario realizar estudios de distribución potencial en distintos escenarios futuros para diseñar e implementar trabajos que conlleven a la restauración, conservación y manejo de especies nativas en su hábitat natural. Para ello, se ha desarrollado una herramienta denominada modelación de nichos ecológicos (MNE), la cual 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 del ecosistema a distintas escalas de análisis (Elith & Leathwick, 2009).

Debido al alto grado de deterioro y la reducción de los ecosistemas, gran número de especies se encuentran en riesgo de desaparecer. Un caso de ellos es la Ardilla de Peters (*Sciurus oculatus* PETERS 1863), endémica del centro de México y listada en la categoría Pr “sujeta a protección especial” del Anexo Normativo III, actualizado en 2019, de la NOM-059-SEMARNAT-2010

(SEMARNAT, 2019). Esta especie se distribuye en poblaciones fragmentadas en el centro de México, una de las zonas más densamente pobladas de nuestro país México.

Para esta especie se requieren trabajos relacionados al ajuste de modelos que generen mapas de distribución específicos, a partir de características de ecología y conducta de la especie o relacionando su abundancia con los factores humanos y ambientales (Tobajas *et al.*, 2020). Por este motivo, la generación de un mapa de distribución potencial en diferentes escenarios de cambio climático de la Ardilla de Peters es necesario como base para determinar zonas de protección, conservación y manejo de esta especie, el objetivo es, determinar la distribución potencial en un escenario futuro drástico de cambio climático de *Sciurus oculatus* en el Eje Neovolcánico, mediante modelo de máxima entropía.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el Eje Volcánico Transversal (EVT) o Eje Neovolcánico con una superficie de aproximadamente 2,000,000 Km² (aprox. 10 % del territorio nacional), que comprende los estados de Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Morelos, Nayarit, Estado de México y la Ciudad de México, exceptuando las llanuras costeras (Figura 1).

Esta extensa zona de estudio cuenta en su mayoría con un clima templado, lluvias en verano (Cw) y precipitaciones que fluctúan entre los 600 y 1 000 mm anuales (García, 2004). Esta variación climática y la diferencia altitudinal de la zona permite el desarrollo de una gran diversidad de flora correspondiente a bosques templados de pino, oyamel y encino, bosque mesófilo de montaña, selva mediana, selva baja caducifolia, matorral xerófilo, pastizal y pastizal alpino, así como vegetación acuática y malpais.

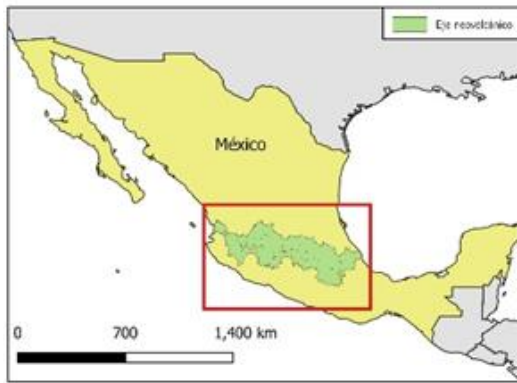


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Se utilizó el modelo de circulación general (GCM) canadiense CanESM5, una ruta de concentración representativa de emisiones drásticas (RCP 8.5) y el modelo acoplado de intercomparación fase 6 (CMIP6) por ser consistente de un futuro con emisiones drásticas, lo que significa que las condiciones de deterioro ambiental aumentarán, dicha información fue obtenida de WorldClim (WorldClim, 2016), con una resolución de 1 km² por píxel. También se ocuparon 19 variables climáticas y ambientales procedentes de BioClim para cuatro periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, en formato *raster* como insumos.

Además, se emplearon 67 puntos de presencia georreferenciados (coordenadas x, y) de *S. oculatus*, procedentes de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMI) (CONABIO, 2015).

En la modelación se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía, mediante el programa MaxEnt® ver 3.4.4 (Steven *et al.*, 2017). De los datos se utilizaron el 75 % (50 pares de datos) para el entrenamiento, mientras que para la validación se empleó la técnica *Crossvalidate* con el restante 25 % (17) de los datos.

Para evaluar los modelos se sometieron a pruebas de análisis de omisión o comisión mediante las curvas de respuesta de sensibilidad ROC (*Receiver Operating Characteristic*), el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) y la prueba de *Jackknife* para verificar la contribución de las variables. Los modelos que tuvieron valores de AUC cercanos a 1 y probabilidad 0 fueron los más consistentes (Peterson *et al.*, 2008).

Con la información generada y validada de distribución potencial en escenarios futuros drásticos y con ayuda del software QGIS® ver

3.28.2 (QGIS Development Team, 2022), se generaron los mapas de distribución correspondientes a los cuatro periodos, utilizando la probabilidad del 0.4-0.6 para aptitud baja, 0.61-0.8 aptitud media y 0.81-1.0 aptitud alta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de AUC para los diferentes periodos analizados fueron superiores a 0.95; para el periodo 2021-2040 (0.968), 2041-2060 (0.968), 2061-2080 (0.969) y 2081-2100 (0.969), los cuales se interpretan como un buen ajuste de los modelos utilizados (Ávila *et al.*, 2014).

Las variables con más contribución para el modelado en los diferentes periodos fueron la Bio8 (Temperatura media del mes más húmedo, °C), con una contribución mayor a 32 %, seguido de Bio15 (Estacionalidad de la precipitación, Coeficiente de variación, CV) con valores >13 % y Bio2 (Oscilación diurna de la temperatura, °C) (>11 %) en los cuatro periodos, de modo contrario, las variables con menos contribución fueron Bio1 (Temperatura promedio anual, °C) y Bio19 (Precipitación del trimestre más frío, mm) con valores menores a 3 % (Cuadro 1). Esto sugiere que las fluctuaciones en temperatura combinado con la precipitación son las principales condiciones climáticas que afectan la distribución de la especie.

Cuadro 1. Contribución de variables (%) en los distintos periodos estudiados.

Variable	Descripción de la variable	Periodo			
		2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Bio1	Temperatura media anual (°C)	0.6	0.2	2.2	1.1
Bio2	Rango de temperaturas diurnas (°C)	13.8	13.8	12.1	11.1
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (*100) (s/d)	14.9	9.2	7.0	10.1
Bio8	Temperatura media del trimestre más lluvioso (°C)	32.8	39.7	39.4	45.0
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco (°C)	6.8	3.2	2.4	0.6
Bio15	Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación) (CV)	13.2	15.4	21.6	18.5
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)	4.0	1.2	0.7	0.6
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)	11.1	15.0	12.5	10.2
Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)	2.9	2.2	2.2	2.7

Donde: °C = grados centígrados, CV = coeficiente de variación, y mm = milímetros.

Con esta información se generaron los mapas de distribución potencial en diferentes periodos futuros (Figura 2), donde se categorizó la probabilidad de 0.4-0.6 para aptitud baja, 0.61-0.8 aptitud media y 0.81-1.0 aptitud alta. Del total de la superficie del EVT 158,522 km², las zonas con aptitud alta comprenden aproximadamente el 5.0 %, aptitud media el 11 % y aptitud baja 11.5 % (Cuadro 2).

Cuadro 2. Superficie (km²) por idoneidad en los cuatro escenarios futuros drásticos establecidos para la distribución potencial de *Sciurus oculatus* en el Eje Neovolcánico.

Aptitud	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2021-2040
Baja	17,557	18,695	18,075	17,773
Media	17,082	15,406	14,554	17,084
Alta	8,226	9,273	9,184	8,994
Total	43,850	42,864	43,374	41,812

Con respecto a la superficie idónea para la distribución de la ardilla esta abarca aproximadamente 43,850 km², de esta el 40 % corresponde a aptitud baja, 40 % de aptitud media y solo un 20 % de aptitud alta (Figura 2).

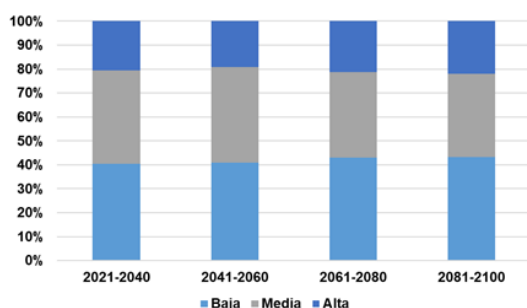


Figura 2. Porcentaje de superficie por rango de idoneidad y por escenario futuro drástico establecido para la distribución potencial de *Sciurus oculatus* en el Eje Neovolcánico

La subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo en la región noroeste del Estado de México, colindando con Querétaro y Guanajuato, es la zona con mayor superficie con aptitud alta, al igual que el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl mantiene una pequeña superficie, estas zonas corresponden a la subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac; este comportamiento se conserva para los cuatro periodos analizados (Figura 3). En estudios como los realizados por Kolomytsev & Prydatko-Dolin (2020) en el este de Europa, concuerdan que los hábitats de las ardillas se desplazan hacia las zonas montañosas.

En este análisis se observa que la distribución a lo largo de los periodos estudiados no tiene un cambio importante en cuanto a las áreas determinadas como potencial para la distribución de la especie (Cuadro 2 y Figura 3). Al contrario de lo esperado como lo encontrado por Kolomytsev y Prydatko-Dolin (2020) el hábitat de la ardilla no se

verá afectada por la variación climática, incluso en el periodo 2081-2100 presenta un aumento de 0.7 % la superficie de aptitud media con respecto a los periodos previos.

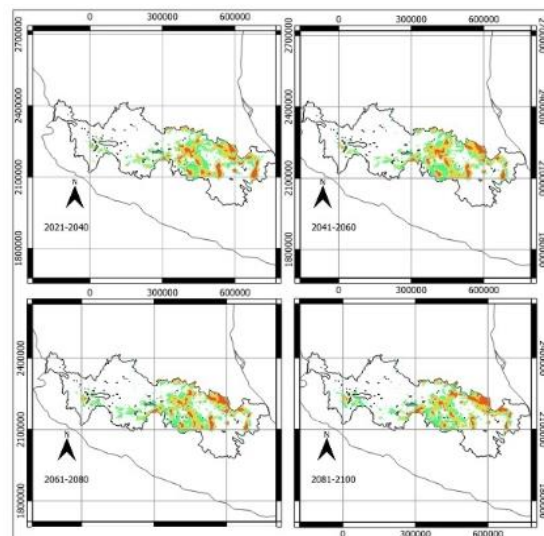


Figura 3. Mapa de distribución potencial de la Ardilla de Peters (*Sciurus oculatus*) en cuatro periodos. a) 2021-2040, b) 2041-2060, c) 2061-2080 y d) 2081-2100.

Las zonas óptimas para el desarrollo de la especie se encuentran en zonas montañosas alejado de la actividad humana lo que concuerda con Tobajas *et al.* (2020), que sugieren una menor abundancia o una disminución en zonas próximas a los asentamientos humanos. En el estudio realizado por Buendía-Rodríguez *et al.* (2022), donde modelaron una distribución actual de *S. oculatus* en el EVT encontraron que las zonas con aptitud alta abarcan un 5.3 %, para la aptitud media de 13.1 % y para aptitud baja de 12.3 %, ligeramente superiores a los encontrados en los escenarios futuros de este trabajo, lo que sugiere que en un futuro cercano disminuirá un 2 % aprox. en las zonas de distribución de la ardilla.

Por lo que diversos autores señalan que resultados obtenidos en este tipo de estudios aumentan la conciencia sobre la pérdida de biodiversidad en diferentes ecosistemas, y sirven como base para la implementación de políticas públicas a corto plazo para mitigar estos problemas (Coll *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Los datos parciales obtenidos a la fecha, indican que es factible utilizar el método de cosecha tradicional en candelilla limitando la intensidad de aprovechamiento (al 50 o 75% de cada individuo),

para obtener mayor peso verde de la regeneración en PFC. La aplicación de los resultados obtenidos promoverá el aprovechamiento sostenible de PFC establecidas en el norte de México.

La metodología utilizada permitió generar un mapa de distribución potencial de escenarios futuros de la Ardilla de Peters (*Sciurus oculatus*) el cual demostró que la distribución a lo largo de los periodos analizados no tiene un cambio sustancial en cuanto a la superficie que abarca.

El modelo de circulación general canadiense (CanESM5 con una RCP 8.5) proporcionó los insumos adecuados para modelar las zonas de distribución futuras en un escenario drástico de la ardilla de Peters a través del tiempo (2021-2100). Esta metodología aporta información básica para determinar zonas óptimas para la conservación de la especie, que pueden aplicarse en los programas de manejo forestal sustentable.

LITERATURA CITADA

- Ávila C., R., R. Villavicencio G. y J. A. Ruiz C. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24): 92-109.
- Buendía-Rodríguez, E., T. Pineda-Ojeda, E. Flores-Ayala, J. G. Chávez-León, J. Hernández-Ramos y V. Guerra-de la Cruz. (2022). Distribución potencial de la ardilla mexicana (*Sciurus oculatus* PETERS 1863), en el eje Neovolcánico. *In: Temas actuales en investigación en ciencias agrícolas, forestales y agronegocios*. Delicias, Chihuahua, México. pp. 176-183.
- CONABIO. (2015). Red mundial de información sobre biodiversidad (REMIB). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México).
- Coll D., R., R. Oliveira de S., Y. Andrei G., M. Gervasio P. (2022). Degradation of South American biomes: What to expect for the future? *Environmental Impact Assessment Review*, 96: 106815.
- Elith, J. y Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 667–697.
- García M. E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México
- D. F., México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros Núm. 6. 155 p.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 p.
- Kaeslin E. and D. Williamson. (2010). Forest, people and wildlife: challenges for a common future. *Unasylva*, 236(61): 3-10
- Kolomytsev, G., V. Prydatko-Dolin. (2020). Red squirrel (*Sciurus vulgaris*) habitats change modelling in Eastern Europe in the scope of climate change according to new generation scenarios (SSPs) by 2100. *Theriologia Ukrainica*, 20: 105–126. DOI:10.15407/TU2013
- Peterson, A. T., M. Papeş y J. Soberón. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche. *Ecological Modelling*, 213(1):63-72. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008.
- QGIS Development Team. (2022). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project (Version 3.28.2). <https://qgis.org>.
- SEMARNAT. (2019). 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; DOF, 14 de noviembre 2019.
- Steven J. P., M. Dudík, R. E. Schapire. (2017). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.4).
- Tobajas J., J. Jiménez, G. Sánchez-Rojas. (2020). Factors affecting the abundance of Peters's squirrel, *Sciurus oculatus*, in a population of Central Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91: e913064.
- WorldClim. (2016). Free climate data for ecological modeling and GIS. WorldClim-Global Climate Data. Recuperado de

<http://www.worldclim.org/> (consultado
marzo de 2023).