

Evaluación multicriterio y los modelos de distribución potencial: Herramientas clave para la mitigación del cambio climático y la conservación del jaguar (*Panthera onca*) en el noreste de México y sur de EUA

Multi-criteria assessment and potential distribution models: Key tools for climate change mitigation and jaguar (*Panthera onca*) conservation in northeastern Mexico and southern USA

MARÍA ELENA TORRES-OLAVE^{1*}, CUAUHCHIHUATL VITAL-GARCÍA², HUGO LUIS ROJAS-VILLALOBOS¹, LUIS CARLOS BRAVO-PEÑA¹, VÍCTOR MANUEL SALAS-AGUILAR¹, ARTURO CARRILLO-REYES³, TAMARA MILA RIOJA-PARADELA³, ALICIA MELGOZA-CASTILLO⁴, Y CARMELO PINEDO-ÁLVAREZ⁴

¹Geoinformática-IADA, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Unidad Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc. Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac Km 61.5, Calle Ejército Nacional 5220, C. P. 31600, Cuauhtémoc. Chihuahua, México. E-mail: elena.torres@uacj.mx (MET-O); hlorojas@uacj.mx (HLR-V); luis.bravo@uacj.mx (LCB-P); victor.salas@uacj.mx (VMS-A).

²Maestría de Ciencia Animal, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Plutarco Elías Calles 1210, C. P. 32310, Ciudad Juárez. Chihuahua, México. E-mail: cuauhchihualt.vital@uacj.mx (CV-G).

³Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 1ª Sur Poniente No. 1460, C. P. 29000, Tuxtla Gutiérrez. Chiapas México. E-mail: arturo.carrillo@unicach.mx (AC-R); tamara.rioja@unicach.mx (TMR-P).

⁴Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico Francisco R. Almada km 1, C. P. 31453, Chihuahua. Chihuahua México. E-mail: amelgoza@uach.mx (AM-C).

*Autor de correspondencia

Para llevar a cabo protocolos de conservación del jaguar (*Panthera onca*) es indispensable determinar la idoneidad de hábitat de la especie por lo que, el objetivo de este trabajo es el análisis de idoneidad espacial para la conservación de *Panthera onca* para el noreste de México y sur de Estados Unidos como medida para mitigar el efecto del cambio climático. La evaluación de la idoneidad espacial del hábitat del jaguar en el noreste de México y el sur de Estados Unidos ayudará a implementar medidas de conservación para mitigar el impacto del cambio climático en la especie. Lo que conlleva a responder la pregunta ¿Cuál es el hábitat óptimo del jaguar en el área seleccionada, y cómo se puede utilizar esta información para mitigar los efectos del cambio climático a través de medidas de conservación? Se utilizó un modelo de distribución potencial y una evaluación multicriterio. El AUC de entrenamiento promedio para los modelos corridos es 0.86. Por otra parte, el método de evaluación multicriterio es consistente (CR = 0.0725) por lo que los criterios seleccionados para el hábitat del jaguar son adecuados y favorables. En el área de estudio hay 1,257,650 ha que reúnen las condiciones de hábitat idóneo casi continuo para el jaguar tanto en México como EUA que no están consideradas para conservación de este felino en ambos países. Estas técnicas generan cartografía que puede auxiliar en la toma de decisiones de conservación, preservación, reintroducción y manejo de este felino ante el cambio climático.

Palabras clave: Distribución geográfica; especies bandera; modelo biogeográfico.

To carry out jaguar (*Panthera onca*) conservation protocols, it is essential to determine the species' habitat suitability. Therefore, the objective of this study is to analyze the spatial suitability for the conservation of *Panthera onca* in the northeast of México and the southern United States as a measure to mitigate the effects of climate change. Evaluating the spatial suitability of jaguar habitat in these regions will help implement conservation measures to mitigate the impact of climate change on the species. This leads to answering the question: What is the optimal jaguar habitat in the selected area, and how can this information be used to mitigate the effects of climate change through conservation measures? A potential distribution model and a multicriteria evaluation were used. The average training AUC for the models run is 0.86. Additionally, the multicriteria evaluation method is consistent (CR = 0.0725), indicating that the criteria selected for the jaguar's habitat are appropriate and favorable. In the study area, there are 1,257,650 ha that meet the conditions of almost continuous suitable habitat for the jaguar, both in México and the USA, which are not currently considered for conservation of this feline in either country. These techniques generate cartography that can assist in making decisions regarding conservation, preservation, reintroduction, and management of this feline in the face of climate change.

Key words: Biogeographic model; geographic distribution; sentinel species.

La distribución histórica del jaguar (*Panthera onca*) abarcaba desde el suroeste de Estados Unidos hasta río Negro, Argentina (McCain y Childs 2008; Di Bitetti et al. 2016; Sanderson et al. 2021). Actualmente, solo se localiza en un área de 9.02 millones de km², ocupando el 51 % de dicha distribución histórica (Quigley et al. 2017). Si bien su hábitat se caracteriza por una cobertura forestal densa, también se puede encontrar en selvas perennifolias, pantanos, pastizales, matorrales y selvas secas (Sanderson et al. 2021). El jaguar es una especie casi amenazada; sus poblaciones están decreciendo y su hábitat se encuentra altamente fragmentado por la actividad antropogénica (Quigley et al. 2017). En Arizona y Nuevo México, Estados Unidos, el jaguar ha sido eliminado (Johnson y Van Pelt 2016), mientras que en México ha perdido más del 60 % de su distribución (Chávez y Ceballos 2006), y se ha estimado su densidad poblacional en hasta 6 adultos por 100 km² (Chávez y Ceballos 2006; Ceballos et al. 2021).

El modelado de la distribución espacial de especies es una herramienta importante para la conservación de la vida silvestre. Permite no solo identificar los sitios que poseen las condiciones bióticas y abióticas necesarias para la alimentación, desarrollo y reproducción de las especies, sino también comprender los factores que impulsan dicha distribución (Rodríguez-Bustamante et al. 2019; López-González y Brown 2002). Para modelar la distribución potencial de una especie, se utilizan algoritmos como MaxEnt, GARP, BIOCLIM, DOMAIN, Mahalanobis y ENFA (Rodríguez-Bustamante et al. 2019; López-González y Brown 2002). Estas aplicaciones, en conjunto con técnicas de sistemas de información geográfica, se han utilizado recientemente para evaluar el impacto del cambio climático y la conservación de las especies. Un ejemplo de ello es la evaluación multicriterio, una técnica utilizada para evaluar opciones de manejo, gestión y conservación de especies. Al elegir la mejor estrategia de conservación, se toman en cuenta la viabilidad de la población, la conectividad del hábitat, la mitigación del cambio climático, el costo, la efectividad de la estrategia y la aceptación social (Niño et al. 2023). El combinar MaxEnt y evaluación multicriterio tiene múltiples beneficios para el manejo y conservación de las especies, posibilita una evaluación exhaustiva de las amenazas que enfrentan, simplifica la identificación de las acciones adecuadas para su conservación, mitigación ante el cambio climático y contribuye a una distribución más eficiente de los recursos destinados. Por tal motivo, se estimó la distribución potencial actual del jaguar (*P. onca*) en el noreste de México y sur de Estados Unidos, mediante MaxEnt y la evaluación multicriterio para identificar áreas de idoneidad espacial de hábitat.

Área de estudio: El estudio se llevó a cabo en un área de 78,7620.4398 km² entre Arizona, al suroeste de Estados Unidos, y Sonora, Chihuahua y Sinaloa, al noroeste de México. Esta área comprende 5 de las 15 ecorregiones (nivel I) de América del Norte: Desiertos de Norteamérica, Elevaciones Semiáridas Meridionales, Sierras Templadas,

Selvas Cálido-Húmedo y Selvas Cálido-Secas (Figura 1a), las cuales presentan similitudes en términos ecológicos y en el tipo, aptitud y cantidad de recursos ambientales (CCA 2021). El área de modelación, M, es el espacio geográfico y ambiental donde se ha registrado la presencia de jaguares y se delimitó de acuerdo con el conocimiento biológico de la especie (Soberón y Townsend Peterson 2005).

Bases de datos y procedimiento. Para la elaboración del modelo de distribución, se descargaron 68 registros de ocurrencia de *Panthera onca* de la base de datos "jaguar observations database" (<https://jaguardata.info/>; Figura 1a). Se delimitó un área M correspondiente al área de distribución geográfica de Arizona en Estados Unidos y el noreste de México. Se obtuvieron 19 variables bioclimáticas de la página de WorldClim (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>), las cuales incluyen información sobre la temperatura mensual y la precipitación. Estas variables proporcionan una mayor explicación, ya que incorporan tendencias anualizadas y elementos limitantes para la distribución de las especies. La resolución de estas variables es de 30 segundos de arco (~1 km) y están disponibles en la base de datos global de superficies climáticas de WorldClim (Fick y Hijmans 2017).

Las variables climáticas en formato ASCII se homogenizaron por columnas y renglones para ajustar su resolución espacial y se recortaron al área de estudio (Apéndice 1; Pradhan 2016). A continuación, se analizó la correlación espacial de las 19 variables utilizando la correlación de Spearman entre pares de variables. Se eliminaron aquellas con valores de correlación igual o superior a 0.75 (valores entre 0.5 y 0.7 tienden a ser significativos en muestras pequeñas; Morales y Fernández 2020). Además, se realizó un remuestreo bootstrap con 1,000 reproducciones. Las covariables independientes estuvieron presentes en la mayoría de las muestras, mientras que las variables de ruido se encontraron en un menor número de muestras. Se calculó la desviación estándar y el sesgo, con un intervalo de confianza del 95 %, utilizando IBM SPSS Statistics v20.0™ para obtener variables representativas para el área de interés (Torres-Olave et al. 2020).

Modelo de distribución potencial. Se utilizó el algoritmo MaxEnt, el cual ha demostrado buenos resultados incluso con pocos datos disponibles (Elith et al. 2011). Regularmente, en MaxEnt, los datos se dividen en dos conjuntos, uno para entrenar el modelo y otro para validación. Sin embargo, en casos con tamaños pequeños de muestra, esto no es factible ya que se pierde información significativa (Yaculic et al. 2013). Para remediar esto, se realizaron 50 réplicas utilizando bootstrapping. En cada replicación, se generaron particiones al azar de los datos y cada modelo se validó utilizando un porcentaje del 50 % (Moo-Llanes 2021). Con el fin de identificar las variables más relevantes en el modelo, se llevó a cabo una prueba Jackknife (Jain et al. 2021).

Se eligió utilizar la salida logística del modelo, donde los valores se interpretan como probabilidades, oscilando entre 0 (ausencia de la especie) y 1.0 (probabilidad de pre-

sencia; [Norollahi y Kaboli 2021](#)). La evaluación se realizó a través de la curva de Característica Operativa del Receptor (ROC) calculando el área bajo la curva (AUC). Esta medida compara la proporción de falsos y verdaderos positivos. La curva ROC se despliega en dos ejes, X e Y, donde el eje X representa la proporción de falsos positivos (1-especificidad) y el eje Y representa la proporción de verdaderos positivos, también conocida como sensibilidad ([Phillips y Dudík 2008](#)).

Después de generar las 50 réplicas, se seleccionó el mejor modelo promediando los valores obtenidos. Se realizó una categorización de los valores utilizando el umbral establecido por MaxEnt: Equate entropy of thresholded and original distributions area (0.9726). Este umbral se utilizó debido a su capacidad para delimitar la idoneidad ambiental en especies de amplia distribución ([Merow et al. 2013](#)). Además, se calculó el AUC parcial (AUCp) utilizando el paquete ntbox de R, con 1,000 réplicas y un valor de E = 0.05 % ([Qiao et al. 2019](#)). Las probabilidades por debajo del umbral se transformaron a 0, indicando la ausencia de jaguares, mientras que las probabilidades por encima del umbral se transformaron a 1, representando la presencia de la especie ([da Silva et al. 2018](#)). Estas transformaciones se llevaron a cabo utilizando el software ArcGIS 10.7.1 de ESRI.

Análisis multicriterio (EMC). La ponderación de criterios se realizó utilizando el método AHP ([Saaty 1987](#)). Esta técnica permite asignar pesos a los criterios mediante la comparación de matrices de comparación por pares ([Sari 2021](#)). La ponderación muestra la importancia relativa de todos los factores y regula la compensación entre ellos. El propósito de las ponderaciones es expresar la importancia o preferencia de cada criterio en relación con otros criterios ([Gkeka-Serpetsidaki y Tsoutsos 2021](#)).

La identificación de criterios y restricciones (Apéndice 2) se basó en teoría, investigación empírica y sentido común. En este caso, los criterios considerados fueron la distancia a ríos y vegetación, mientras que las restricciones fueron la densidad poblacional y la altitud ([McCain y Childs 2008](#); [U. S. Fish and Wildlife Service 2016](#)). Para asignar pesos a los criterios, se utilizó el método de la jerarquía analítica (AHP) propuesto por Saaty en 1987. Este método establece una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está determinado por el número de criterios a ponderar. Se compara la importancia de cada criterio con respecto a los demás, utilizando una escala de ponderaciones que va de 1/9 a 9 (Apéndice 3).

Con el fin de estandarizar los valores, se convirtieron a una escala que expresa cierto grado de idoneidad, clasificándolos en una escala de 0 a 1. En esta escala, 0 representa nula aptitud y 1 representa máxima aptitud. De esta manera, se pudieron identificar zonas donde los valores son aptos para desempeñar una actividad ([Andrus et al. 2021](#)). Se utilizó el método de suma ponderada lineal ([Cartuche et al. 2018](#)), el cual es una operación aritmética simple de tipo compensatorio aditivo. Este método consiste en multiplicar el valor de cada criterio por su peso:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (w_j e_{ij})$$

Donde, r_i es la aptitud de la alternativa i ; los valores más altos representan los sitios con mayor aptitud, w_j el peso del criterio j y e_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j .

Para determinar si la matriz es dura, se calcula el $\lambda_{max} = \sum \lambda_i$, y si este valor es cercano al número de variables independientes (n), la matriz, es consistente. A continuación, se estableció el índice de consistencia (CI), que determina la desviación del vector λ_{max} respecto a n .

También, se calculó el índice de consistencia aleatorio (RCI) $\lambda_{max} - n$ $1.98 * (n - 2)$, $CI = RCI / RCI = n - 1$ n . Y se calculó la relación de consistencia, $CR = CI / RCI$, en donde, mientras menor sea la relación de consistencia CR , más consistentes son los criterios dados por los expertos. Si CR , es mayor a 0.10 los criterios son inconsistentes ([Amarante et al. 2021](#); Apéndice 3). Finalmente, se superpusieron los mapas de los criterios y restricciones a través de la sumatoria lineal ponderada con la herramienta de Spatial Analyst con el módulo de Weighted Overlay en el software ArcGis 10.7.1v de ESRI.

Idoneidad espacial de hábitat. La idoneidad se refiere a la correspondencia matemática o estadística entre la distribución potencial de una especie y un conjunto de factores independientes utilizados como indicadores, en este caso, la evaluación multicriterio ([Manzanilla Quiñones et al. 2019](#)). Estos factores pueden ser topogeológicos, climáticos, actividades humanas, entre otros, y se espera que algunos de ellos, ya sea de forma individual o en combinación, definan las variables que determinan los ambientes favorables para la presencia de la especie ([Chávez Carreto y Serrano 2019](#)).

En este trabajo, se realizó la multiplicación del modelo de distribución potencial por el resultado de la evaluación multicriterio utilizando el álgebra de mapas ([Takahashi et al. 2020](#)). Se utilizaron shapefiles de las áreas naturales protegidas (ANPs) en México descargados del portal de CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) y se obtuvo información sobre el hábitat crítico para el jaguar del portal de ECOS Environmental Conservation Online System ([U. S. Fish and Wildlife Service 2021](#); <https://ecos.fws.gov/ecp/report/table/critical-habitat.html>). Esta información se utilizó para cuantificar la idoneidad espacial del hábitat en estas áreas protegidas y en áreas fuera de ellas en ambos países.

Los modelos se basaron en subconjuntos aleatorios para predecir la distribución de *P. onca*. El valor promedio del área bajo la curva (AUC) para el conjunto de entrenamiento fue de 0.86 (AUCp = 0.8), lo que indica que la capacidad del modelo para clasificar las presencias fue buena. Estos resultados son considerados aceptables y más precisos que un modelo obtenido al azar. Además, la alta AUCp sugiere una

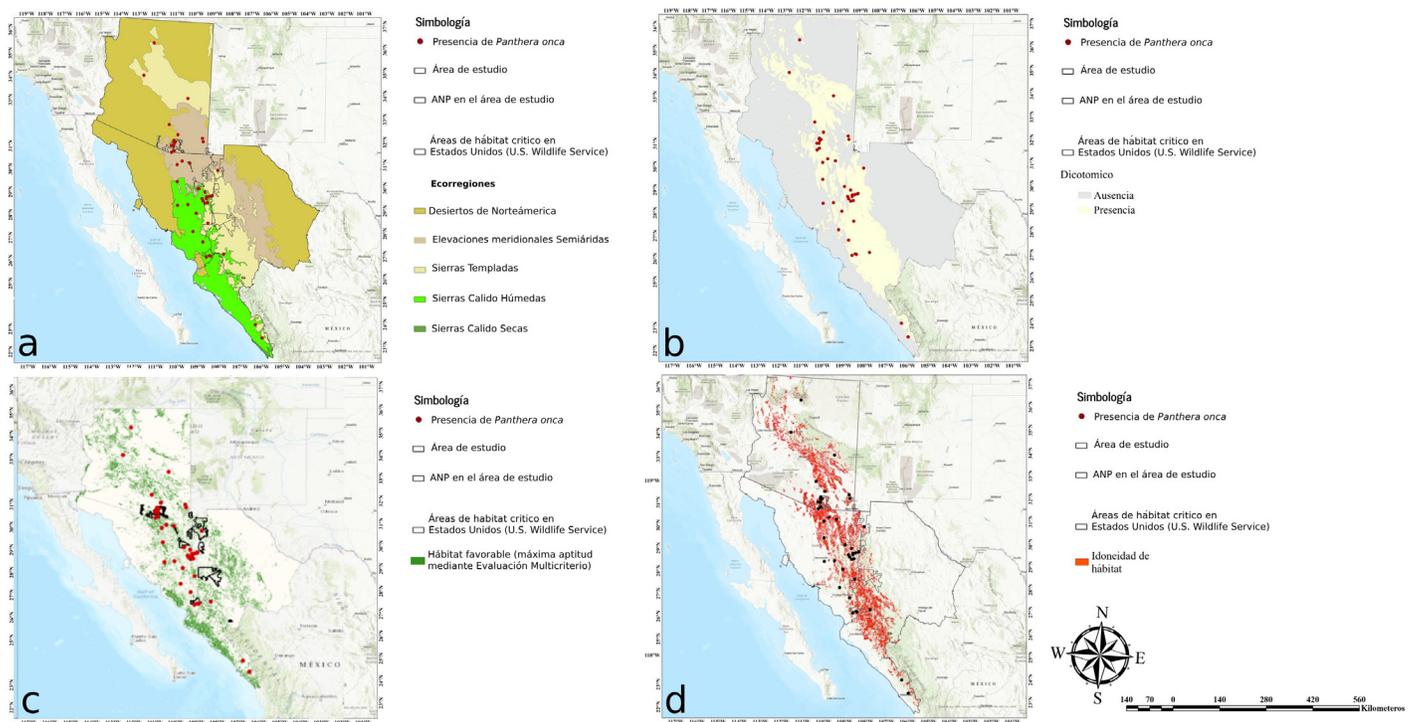


Figura 1. a). Área de estudio. Comprende Arizona en Estados Unidos de América y en México los estados norteños de Chihuahua, Sonora y Sinaloa. Los puntos rojos indican presencia de *Panthera onca*. Fuente: Elaboración propia. b) Modelo de distribución potencial de *Panthera onca* en el área de estudio, el color gris indica ausencia y el amarillo presencia de la especie; los puntos rojos son ocurrencias de la especie. Fuente: Elaboración propia. c) Evaluación multicriterio. Se muestra en color verde el hábitat favorable (máxima aptitud) para *Panthera onca*. Los puntos rojos son ocurrencias del jaguar en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia. d) Mapa de idoneidad de hábitat para *Panthera onca*. Muestra el resultado del álgebra de mapas del modelo de distribución potencial y la evaluación multicriterio. Los puntos verdes muestran la presencia de jaguar en el área de estudio, en negro se observa las áreas destinadas para protección de flora y fauna en ambos países. Fuente: Elaboración propia.

correlación entre los registros de la especie y las variables climáticas utilizadas.

En cuanto al mapa binario de distribución potencial (Figura 1b), la cartografía resultante puede interpretarse como áreas de presencia y ausencia (con valores de 0 y 1) en: Arizona, EUA, en los condados de: Mohave, Coconino, Yabapai, Maricopa, Pinal, Gila, Navajo, Graham, Pima, Greenle, Santa Cruz y Cochise; y en México en el estado de Sonora en los municipios de: General Plutarco Elías Calles, Caborca, Altar, Pitiquito, Oquitoa, Tubutama, Sáric, Nogales, Imuris, Magdalena, Santa Ana, Cucurpe, Arizpe, Banámichi, Opodepe, Carbó, Rayón, Ures, Mazatán, Villa Pesqueira, La Colorada, San Javier, Soyopa, Onavas, Rosario, Cajeme, Suaqui Grande, Guaymas, Empalme, Bácum, Quiriego, Álamos, Yécora, Bacanora, Sahuaripa, Arivechi, Tepache, Divisaderos, Bacadeuáchi, Huásabas, Aconchi, Huepac, San Felipe de Jesús, Moctezuma, Granados, Nácori Chico, Huachinera, Villa Hidalgo, Banámichi, Cumpas, Nacozari de García, Bacerac, Bacoachi, Fronteras, Cananea, Agua Prieta, Bavispe, Naco, Agua Prieta; al oeste de Chihuahua en los municipios de Janos, Casas Grandes, Madera, Temósachi, Moris, Ocampo, Guerrero, Uruachi, Maguarichi, Bocoyna, Chinipas, Guazapares, Urique, Batopilas, Guachochi, Balleza, Guadalupe y Calvo y Morelos; y para el estado de Sinaloa en los municipios de: Choix, El Fuerte, Sinaloa, Badiguarato, Mocerito, Culiacán, Cosalá, Elota, San Ignacio, Mazatlán, Concórdia, Rosario y Escuinapa.

El análisis Jackknife indica que la variable que contribuye más al modelo es la precipitación del cuarto más frío (Bio19), con una contribución porcentual del 63.8 %. Por otra parte, el método de evaluación multicriterio es consistente (CR = 0.0725), lo que indica que los criterios seleccionados para el hábitat del jaguar son adecuados y favorables. El mapa resultante de la sumatoria lineal ponderada (en este caso, los criterios fueron distancia a ríos y vegetación, y las restricciones fueron densidad poblacional y altitud) coincide en su mayor parte con los resultados de la distribución potencial.

La cartografía de idoneidad espacial de hábitat muestra un total de 3,008,179 ha. Las zonas con algún tipo de protección y/o conservación para *P. onca* en ambos países suman un área de 1,750,529 ha, lo que representa el 58.2 % del territorio dedicado a la protección de este felino. Quedan 1,257,650 ha que presentan las condiciones ambientales y físicas para ser consideradas hábitat idóneo casi continuo para el jaguar, tanto en México como en Estados Unidos (Apéndice 4), pero no están incluidas en las áreas de conservación designadas para esta especie en ambos países.

Los pronósticos de los modelos de distribución potencial se consideran indicadores ambientales y proporcionan información sobre el rendimiento de las especies, sus requisitos ecológicos y las condiciones ambientales necesarias para su supervivencia. También son herramientas excelentes para comprender los factores que afectan la distribución

potencial de la vida silvestre a diferentes escalas (Tórres et al. 2012; Serna-Lagunes et al. 2017).

El modelo generado por MaxEnt fue altamente predictivo de las presencias del jaguar y mostró robustez, siendo considerado aceptable y más preciso que un modelo generado al azar (AUC 0.86; Low et al. 2021). En cuanto a la precipitación del cuarto más frío (Bio19), que fue la variable que contribuyó más al modelo, su importancia se puede explicar por su relación con la vegetación. Esta variable influye en la abundancia y distribución de las presas del jaguar, ya que las presas dependen de los diferentes tipos de flora presentes en las áreas predichas por el modelo (De la Torre y Torres-Knoop 2014).

Las valoraciones en la construcción de la evaluación multicriterio fueron buenas, con un índice de consistencia de 0.0725, el cual se encuentra dentro del límite óptimo (Saaty 1987). Este análisis facilita los procesos de toma de decisiones en situaciones que implican juicios y dificultades particulares. Sin embargo, es importante que los expertos compartan opiniones sobre los factores ambientales y criterios más relevantes en la distribución del jaguar, y que se minimicen los valores y pesos derivados para obtener una aproximación más precisa de la disponibilidad de hábitat para la especie. Los resultados de la evaluación multicriterio brindan información fundamental para identificar áreas con probabilidad de presencia de esta especie en el corredor mesoamericano, así como para proponer nuevas áreas prioritarias de conservación (Guerra-Coss et al. 2021).

La coincidencia espacial resultante del álgebra de mapas indica la idoneidad del hábitat, es decir, los lugares donde el nicho del jaguar, las condiciones físicas adecuadas y los factores antropogénicos concuerdan, proporcionando un hábitat óptimo para su conservación y preservación. Los modelos y mapas derivados de este tipo de estudios son útiles en la investigación, gestión y desarrollo de estrategias más efectivas para la conservación en áreas de gran extensión (> 100 km; Zharikov et al. 2005), lo cual es necesario para mantener poblaciones saludables y sostenibles de este felino (Ceballos et al. 2021; Sanderson et al. 2021).

Los modelos basados en la distribución potencial y la evaluación multicriterio son herramientas efectivas para abordar los desafíos asociados con las áreas de conservación del jaguar. Estos modelos pueden reducir el esfuerzo de muestreo en campo en zonas inaccesibles o con características específicas de cobertura. La combinación de ambos puede proporcionar una imagen más completa de las áreas idóneas potenciales. Esto puede ayudar a los administradores e investigadores a tomar decisiones informadas sobre la protección de este felino y los ecosistemas que sustentan. En el contexto del cambio climático, estas herramientas pueden ser aún más importantes ya que el cambio climático está alterando los patrones de distribución de las especies, por lo que es fundamental identificar nuevas áreas que proporcionen cobijo a estas especies en un futuro cercano y que permitan la permanencia de poblaciones saludables y permanentes.

Es fundamental recordar que el jaguar está estrechamente vinculado a su entorno y que una evaluación objetiva de su estado de conservación requiere considerar datos ambientales a microescala, como la vegetación y el análisis del paisaje, para predecir su abundancia. Asimismo, es necesario tener en cuenta la biología y ecología del jaguar, ya que desempeña un papel clave como depredador en el control de otras especies y en la dinámica de los ecosistemas. Su presencia es un indicador de la salud del ecosistema y su conservación es esencial para mantener la biodiversidad.

Este enfoque se basó en 3 elementos clave: el uso de insumos públicos para sistemas de información geográfica, el conocimiento experto y la competencia general en el uso de software SIG. Por lo tanto, puede ser fácilmente aplicado por gestores e investigadores dedicados al estudio de fauna silvestre.

Literatura citada

- AMARANTE, E. B., ET AL. 2021. Análisis de decisiones multicriterio en la integración de herramientas de la economía ecológica. *Universidad y Sociedad* 13:468-477.
- ANDRUS, R. A., ET AL. 2021. Assessing the quality of fire refugia for wildlife habitat. *Forest Ecology and Management* 482:118868.
- CARTUCHE, D., J. ROMERO, Y Y. ROMERO. 2018. Evaluación multicriterio de los recursos turísticos en la Parroquia Uzhcurrumi, Canton Pasaje, Provincia de El Oro. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo* 14:102-113.
- CCA (COMISIÓN PARA LA COOPERACIÓN AMBIENTAL). 2021. *Ecoregions of North America*.
- CEBALLOS, G., ET AL. 2021. Jaguar distribution, biological corridors and protected areas in Mexico: from science to public policies. *Landscape Ecology* 36:3287-3309.
- CHÁVEZ CARRETO, F., Y R. C. SERRANO. 2019. Turismo de naturaleza en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, estado de México, a través de la geoinformática. *Espacio y Desarrollo* 34:33-56.
- CHÁVEZ, C., Y G. CEBALLOS. 2006. El jaguar mexicano en el Siglo XXI: situación actual y manejo. CONABIO-UNAM-Alianza WWF Telcel. Ciudad de México, México.
- DA SILVA, U. B. T., ET AL. 2018. Species richness, geographic distribution, pressures, and threats to bats in the Caatinga drylands of Brazil. *Biological Conservation* 221:312-322.
- DE LA TORRE, J. A., Y K. TORRES-KNOOP. 2014. Distribución potencial del puma (*Puma concolor*) en el estado de Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época)* 4:45-56.
- DI BITETTI, M. S., ET AL. 2016. Estado de conservación del Jaguar en Argentina. Pp. 23-25 en *El Jaguar en el Siglo XXI: La Perspectiva Continental* (Medellín, R. A., et al., eds.). Fondo de Cultura Económica, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- ELITH, J., ET AL. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57.
- FICK, S. E., Y R. HIJMANS. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37:4302-4315.

- GKEKA-SERPETSIDAKI, P., Y T. TSOUTSOS. 2021. Sustainable site selection of offshore wind farms using GIS-based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process. Case study: Island of Crete (Greece). *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems* 2021:329-342.
- GUERRA-COSS, F. A., ET AL. 2021. Modelling and validation of the spatial distribution of suitable habitats for the recruitment of invasive plants on climate change scenarios: An approach from the regeneration niche. *Science of The Total Environment* 777:146007.
- JAIN, D., ET AL. 2021. Comparison of AHP and maxent model for assessing habitat suitability of wild dog (*Cuon alpinus*) in pench tiger reserve, Madhya Pradesh. *Spatial Modeling in Forest Resources Management* 2021:327-363.
- JOHNSON, T. B., Y W. E. VAN PELT. 2016. Jaguares en el borde: Evaluación y perspectivas de conservación del jaguar continental. Pp. 27-46 en *El jaguar en el siglo XXI. La perspectiva continental* (Medellín, R. A., J. A. de la Torre, H. Zarza, C. Chávez, y G. Ceballos, eds.). Fondo de Cultura Económica, Instituto de Ecología, UNAM. Ciudad de México, México.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, C. A., Y D. E. BROWN. 2002. Distribución y estado de conservación actuales del jaguar en el noroeste de México. Pp. 379-391 en *El jaguar en el nuevo milenio* (Medellín, R. A., et al., comp.). Fondo de Cultura Económica, Universidad Nacional Autónoma de México, Wildlife Conservation Society. Ciudad de México, México.
- LOW, B. W., ET AL. 2021. Predictor complexity and feature selection affect Maxent model transferability: Evidence from global freshwater invasive species. *Diversity and Distributions* 27:497-511.
- MANZANILLA QUIÑONES, U., ET AL. 2019. Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana* 126:123-124.
- MCCAIN, E. B., Y J. CHILDS. 2008. Evidence of resident jaguars (*Panthera onca*) in the southwestern United States and the implications for conservation. *Journal of Mammalogy* 89:1-10.
- MEROW, C., M. J. SMITH, Y J. A. SILANDER JR. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36:1058-1069.
- MOO-LLANES, D. A. 2021. Inferring Distributional Shifts of Asian Giant Hornet *Vespa mandarinia* Smith in Climate Change Scenarios. *Neotropical Entomology* 2021:1-4.
- MORALES, N. S., Y I. FERNÁNDEZ. 2020. Land-Cover Classification Using MaxEnt: Can We Trust in Model Quality Metrics for Estimating Classification Accuracy? *Entropy* 22:342.
- NIÑO, L., ET AL. 2023. Riesgo de transmisión de SARS-CoV-2: evaluación espacial multicriterio en un municipio de Colombia. *Revista de Salud Pública* 22:205-213.
- NORALLAHI, M., Y H. S. KABOLI. 2021. Urban flood hazard mapping using machine learning models: GARP, RF, MaxEnt and NB. *Natural Hazards* 2021:1-19.
- PHILLIPS, S. J., Y M. DUDÍK. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31:161-175.
- PRADHAN, P. 2016. Strengthening MaxEnt modelling through screening of redundant explanatory bioclimatic variables with variance inflation factor analysis. *Researcher* 8:29-34.
- QIAO, H., ET AL. 2019. An evaluation of transferability of ecological niche models. *Ecography* 42:521-534.
- QUIGLEY, H., ET AL. 2017. *Panthera onca*. En IUCN 2017. The Red List of Threatened Species. Version 2017.3.
- RODRÍGUEZ-BUSTAMANTE, E., ET AL. 2019. Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la conservación de fauna silvestre /Application of geographic information systems (gis) in the conservation of wildlife. Pp. 123-130 en *Libro Final del décimo seminario internacional de exbecarios de Alemania sobre ingeniería verde y sus aplicaciones a la gestión del agua (calidad y disponibilidad) en Honor del Dr. Peter Kuschik y el Dr. Hanns Sylvester* (Bernal-González, M., et al., eds.). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- ROSAS-ROSAS, O., Y J. H. LÓPEZ-SOTO. 2002. Distribución y estado de conservación del jaguar en Nuevo León, México. Pp. 393-402 en *El jaguar en el nuevo milenio* (Medellín, R. A., et al., comp.). Fondo de Cultura Económica, Universidad Nacional Autónoma de México, Wildlife Conservation Society. Ciudad de México, México.
- SAATY, R. W. 1987. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* 9:161-176.
- SANDERSON, E. W., ET AL. 2021. The case for reintroduction: The jaguar (*Panthera onca*) in the United States as a model. *Conservation Science and Practice* 2021:e392.
- SARI, F. 2021. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management* 480:118644.
- SERNA-LAGUNES, R., A. ESPINOSA-BLANCO, Y N. MORA-COLLADO. 2017. Distribución potencial de Caiman *Crocodylus chiapasius* en México. *Quehacer Científico en Chiapas* 12:47-55.
- SOBERÓN, J., Y A. TOWNSEND PETERSON. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity informatics* 2:1-10.
- TAKAHASHI, E. A., ET AL. 2020. Modelling habitat suitability in Jordan for the cutaneous leishmaniasis vector (*Phlebotomus papatasi*) using multicriteria decision analysis. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 14:e0008852.
- TORRES, N. M., ET AL. 2012. Can species distribution modelling provide estimates of population densities? A case study with jaguars in the Neotropics. *Diversity and Distributions* 18:615-627.
- TORRES-OLAVE, M. E., ET AL. 2020. Biogeographic factors that determine the distribution of *Triatoma recurva* in Chihuahua, Mexico. *Biomedica* 40.
- U. S. FISH AND WILDLIFE SERVICES. 2016. Jaguar Draft Recovery Plan 20. Arizona, U.S.A. www.fws.gov/species-publication-action/endangered-and-threatened-wildlife-and-plants-jaguar-draft-recovery-plan. Consultado el 23 de mayo de 2023.
- U. S. FISH AND WILDLIFE SERVICES. 2021. USFWS Threatened & Endangered Species Active Critical Habitat Report. Arizona, U.S.A. www.ecos.fws.gov/ecp/report/table/critical-habitat.html. Consultado el 22 de mayo de 2023.
- YACKULIC, CH., ET AL. 2013. Presence-only modelling using MAXENT: when can we trust the inferences? *Methods in Ecology and Evolution* 4:236-243.
- ZHARIKOV, Y. ET AL. 2005. Mapping and characterizing subtropical estuarine landscapes using aerial photography and GIS for potential application in wildlife conservation and management. *Biological Conservation* 125:87-100.

Editor asociado: Jorge Ayala Berdón.

Sometido: Julio 31, 2023; Revisado: Septiembre 4, 2023.

Aceptado: Septiembre 13, 2023; Publicado en línea: Septiembre 13, 2023.

Apéndice 1

Listado de variables climáticas utilizadas en el modelo de distribución potencial. **Variables que se usaron para el modelo de distribución de *Panthera onca*. Spearman (2 tiles), Bootstrap (1000, 95 %) * > 0.70 (no usar).

Código	Variables ambientales
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango de temperatura media mensual**
BIO3	Isotermalidad (P2/P7) (*100)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100)*
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío**
BIO7	Rango anual de temperatura (P5-P6)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del trimestre más frío**

Apéndice 2

Variables usadas para la identificación de idoneidad de hábitat para el jaguar a través del análisis multicriterio.

Variables	Fuente	Importancia (Saaty 1987)	Peso	Criterio para reclasificación
Distancia a ríos	GloRIC proporciona una subclasificación hidrológica, fisioclimática y geomórfica. Ouellet Dallaire, C., Lehner, B., Sayre, R., Thieme, M. (2018): A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution. Environmental Research Letters. doi: 10.1088/1748-9326/aad8e9 (open access) https://www.hydrosheds.org/page/gloric	8	0.12	Los hábitats cercanos a los cuerpos de agua son más aptos para <i>Panthera onca</i> . Prioridad alta en zona de influencia (10 km).
Densidad de población 2020	Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Densidad de población, Revisión 11 consiste en estimaciones de la densidad de población humana (número de personas por kilómetro cuadrado) con censos nacionales y registros de población, para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11 https://doi.org/10.7927/H49C6VHW . Accessed DAY MONTH YEAR. https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11	6	0.12	El hábitat que presenta una mayor densidad de poblados son menos aptos para <i>Panthera onca</i> ; Densidad de población humana mínima o nula
Vegetación	12 clases de cobertura terrestre con una resolución de 1 km. Tuanmu, M.-N. and W. Jetz. 2014. A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modeling. Global Ecology and Biogeography 23(9): 1031-1045. http://www.earthenv.org/landcover	9	0.68	Áreas de bosques y pastizales/arbustos tienen una mayor aptitud para ser consideradas hábitat potencial
Altitud	Se utilizó el GTOPO30 (USGS, 1996) Elevación a 1-km. Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 37 (12): 4302-4315. https://worldclim.org/data/worldclim21.html	6	0.08	Los hábitats localizados en bajas elevaciones son más aptos para <i>Panthera onca</i>

Apéndice 3

Ponderación de criterios y determinación de pesos por el método de Saaty (EMC).

	Vegetación	Distancia a ríos	Densidad Humana	Elevación	Wi	Ci	Lambda i
Vegetación	1.00	8	6	6	4.12	0.68	1.00
Distancia a río	1/8	1.00	2	1	0.71	0.12	1.23
Densidad Humana	1/6	1/2	1.00	3	0.71	0.12	1.10
Elevación	1/6	1	1/3	1.00	0.49	0.08	0.89

Apéndice 4

Total de hectáreas en zonas con algún tipo de protección para jaguar en México/EUA.

Nombre	Área/Has	Total, en hectáreas	País
Atascosa	53,127		
Baboquivari	23,121		
Patagonia	128,827	280,093	EUA
Peloncillo	37,673		
San Luis	2,831		
Whetstone	34,514		
Campo Verde	98,829		
Cascada de Bassaseachic	5,370		
Janos	478,609		
Papigochic	205,920	1470,436	México
Sierra de Álamos-Río Cuchujaqui	86,690		
Tutuaca	403,036		
Cerro Mohinora	8,592		
Bavispe	183,390		
Gran total		1750,529	