

Artículo de revisión

Cambios en la distribución de especies usando Modelos de Distribución de Especies (SDMs) bajo escenarios de cambio climático en la Amazonía sudamericana: una revisión sistemática

Changes in species distribution using Species Distribution Models (SDMs) under climate change scenarios in the South American Amazon: a systematic review

Anderson Chuquizuta-Ventura^{1*}  Shafer Rey Cotrina-Rios¹  Deivi David Silva-Ortiz¹  Wendy María Rodríguez-Puerta¹ 

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Ambiental, Biosistemas y de la Energía (FIABE), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Calle Higos Urco 302, Chachapoyas, Amazonas, Perú

***Autor de correspondencia:**
Anderson Chuquizuta-Ventura,
email: achventura.08@gmail.com

Historial del artículo

Recibido: 20 de julio del 2026
Aceptado: 31 de agosto del 2026
Fecha de publicación: 11 de septiembre del 2026

RESUMEN

Esta revisión sistemática sintetizó la evidencia sobre los cambios en la distribución potencial de especies evaluados mediante Modelos de Distribución de Especies (SDMs) bajo escenarios de cambio climático en la Amazonía sudamericana. En la base de datos Scopus se identificaron 163 registros y, tras aplicar los criterios de elegibilidad, se incluyeron 55 artículos. El Modelo de Máxima Entropía (MaxEnt), que estima la distribución potencial de especies a partir de registros de presencia y variables ambientales, fue el algoritmo más utilizado (63.64 %), seguido de los modelos Ensemble (9.09 %). El área bajo la curva (AUC) fue la métrica de validación predominante (40.00 %). Las plantas (38.1 %) y las aves (33.9 %) fueron los grupos taxonómicos con mayor representación. A nivel de artículo, la contracción o pérdida de distribución fue el cambio más frecuente (83.6 %), seguida por las modificaciones de idoneidad climática (70.9 %) y la expansión hacia nuevas áreas (54.5 %), principalmente en horizontes de mediano y largo plazo. La evidencia indica una reconfiguración de la biodiversidad amazónica y respalda la identificación de áreas prioritarias, refugios climáticos y corredores ecológicos. También revela vacíos metodológicos, espaciales y taxonómicos, por lo que se requieren enfoques multimodelo que integren uso del suelo, conectividad e interacciones bióticas.

Palabras clave: Amazonía sudamericana, Cambio climático, Cambios en la distribución, MaxEnt, Modelos de distribución de especies (SDMs).

ABSTRACT

This systematic review synthesized the evidence on changes in the potential distribution of species assessed using Species Distribution Models (SDMs) under climate change scenarios in the South American Amazon. A total of 163 records were identified in the Scopus database, and 55 articles were included after applying the eligibility criteria. The Maximum Entropy Model (MaxEnt), which estimates potential species distributions from presence records and environmental variables, was the most widely used algorithm (63.64%), followed by Ensemble models (9.09%). The Area Under the Curve (AUC) was the predominant validation metric (40.00%). Plants (38.1%) and birds (33.9%) were the most represented taxonomic groups. At the article level, distribution contraction or loss was the most frequently reported change (83.6%), followed by changes in climatic suitability (70.9%) and expansion into new areas (54.5%), mainly under medium- and long-term horizons. The evidence indicates a reconfiguration of Amazonian biodiversity and supports the identification of priority areas, climate refugia, and ecological corridors. It also reveals methodological, spatial, and taxonomic gaps, highlighting the need for multimodel approaches that integrate land use, connectivity, and biotic interactions.

Keywords: Climate change, Distributional changes, MaxEnt, South American Amazon, Species Distribution Models (SDMs).

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye un grave desafío ambiental por sus efectos sobre los ecosistemas y la biodiversidad (Veneros et al., 2025). La transformación de los sistemas productivos y del paisaje intensifica las presiones sobre los ecosistemas naturales y aumenta la incertidumbre para la biodiversidad sudamericana (Chavez Flores et al., 2025; Malecha et al., 2025). En este contexto, la Amazonía sudamericana cumple funciones esenciales para la conservación de la biodiversidad y la regulación de procesos ecológicos regionales, pero enfrenta presiones simultáneas por cambio climático y transformación antrópica del paisaje (Swanson et al., 2021; Rojas-Briceño et al., 2025; Pena et al., 2026).

La deforestación, la expansión agrícola y el desarrollo de infraestructura han provocado pérdida de bosques y disminución de servicios ecosistémicos (Quintero et al., 2023; Malecha et al., 2025), además de afectar la resiliencia de las comunidades biológicas y la dinámica de enfermedades y vectores amazónicos (Confalonieri et al., 2014; Swanson et al., 2021). Uno de los principales efectos del cambio climático es la modificación de la distribución geográfica de las especies, mediante desplazamientos hacia ambientes favorables y contracciones en los rangos de especies sensibles (Wu, 2020). Estas alteraciones incrementan el riesgo de pérdida de hábitat y extinción, especialmente en especies con limitada capacidad de dispersión (Prieto-Torres et al., 2020), y modifican la estructura de las comunidades neotropicales (Grattarola et al., 2024). En bosques tropicales y montanos también se proyectan desplazamientos altitudinales y reducciones del hábitat adecuado (de Meyer et al., 2022).

Los Modelos de Distribución de Especies (SDMs) permiten estimar la idoneidad del hábitat mediante registros de presencia y variables ambientales (Gómez & Cassini, 2015), proyectar distribuciones futuras e identificar áreas vulnerables y prioritarias para la conservación (Miranda et al., 2021). Se fundamentan en el nicho ecológico e incorporan principalmente temperatura y precipitación, aunque también pueden considerar uso del suelo, topografía e interacciones ecológicas (Souza et al., 2021; Pérez Chaves et al., 2022). Entre sus algoritmos destaca MaxEnt por generar predicciones robustas con información limitada (Hartl et al., 2024). Estas herramientas se utilizan para evaluar pérdida de hábitat, redistribución de especies, áreas críticas y refugios climáticos en ecosistemas amazónicos (Lima et al., 2019; Miranda et al., 2021; Jones & Harris, 2025). Pese a estos avances, persisten sesgos espaciales, taxonómicos y metodológicos (Malecha et al., 2025), mientras que la limitada disponibilidad de datos tropicales reduce la precisión de los modelos (Pérez Chaves et al., 2022). Por ello, es necesario sintetizar la evidencia sobre los cambios en la distribución potencial de especies amazónicas bajo escenarios de cambio climático.

La revisión busca responder: ¿cuáles son los principales cambios en la distribución potencial de especies evaluados mediante SDMs bajo escenarios de cambio climático en la Amazonía sudamericana? Su objetivo es analizar dichos cambios mediante la identificación de los estudios disponibles, sus principales hallazgos, tendencias y vacíos de investigación, e integrar sus resultados para reconocer patrones espaciotemporales y puntos críticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la Amazonía sudamericana, región de alta diversidad y complejidad ecológica que comprende territorios de Brasil, Perú, Colombia, Ecuador, Bolivia, Guyana, Surinam y Venezuela. Sus gradientes climáticos y ambientales influyen en la distribución de la biodiversidad, por lo que constituye un espacio clave para analizar patrones biogeográficos mediante Modelos de Distribución de Especies (SDMs) (Gonçalves et al., 2021). Además, cumple un papel fundamental en la regulación climática, el ciclo del carbono y los sistemas hidrológicos. Sin embargo, enfrenta una creciente vulnerabilidad ante el cambio climático, la deforestación y el cambio de uso del suelo, presiones que alteran los ecosistemas y la distribución de las especies (Swanson et al., 2021; Malecha et al., 2025). Las variaciones de temperatura y precipitación también pueden provocar desplazamientos y cambios en la idoneidad del hábitat, lo que resalta la importancia de emplear enfoques predictivos para comprender estos procesos (Prieto-Torres et al., 2020; Wu, 2020) (Figura 1). Se realizó una revisión sistemática cualitativo-descriptiva sobre la aplicación de SDMs bajo escenarios de cambio climático en la Amazonía sudamericana.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda se efectuó en Scopus por su cobertura de literatura científica indexada y sus herramientas de organización. No se incorporaron otras bases debido a la alta duplicidad observada con los registros recuperados.

Ecuaciones de búsqueda

Se combinaron términos sobre SDMs, cambio climático y Amazonía mediante operadores booleanos. La ecuación fue: TITLE-ABS-KEY (("species distribution model*" OR "species distribution modelling" OR "species distribution modeling" OR SDM OR SDMs OR "ecological niche model*" OR ENM OR ENMs) AND ("climate change" OR "future climate*" OR "climate scenario*" OR "climate projection*") AND (Amazon* OR Amazonia OR "Amazon basin" OR "Amazon rainforest" OR "Amazon forest*" OR "South American Amazon" OR "Brazilian Amazon" OR "Peruvian Amazon" OR "Colombian Amazon" OR "Ecuadorian Amazon" OR "Bolivian Amazon" OR "Venezuelan Amazon")). Se recuperaron 163 registros.

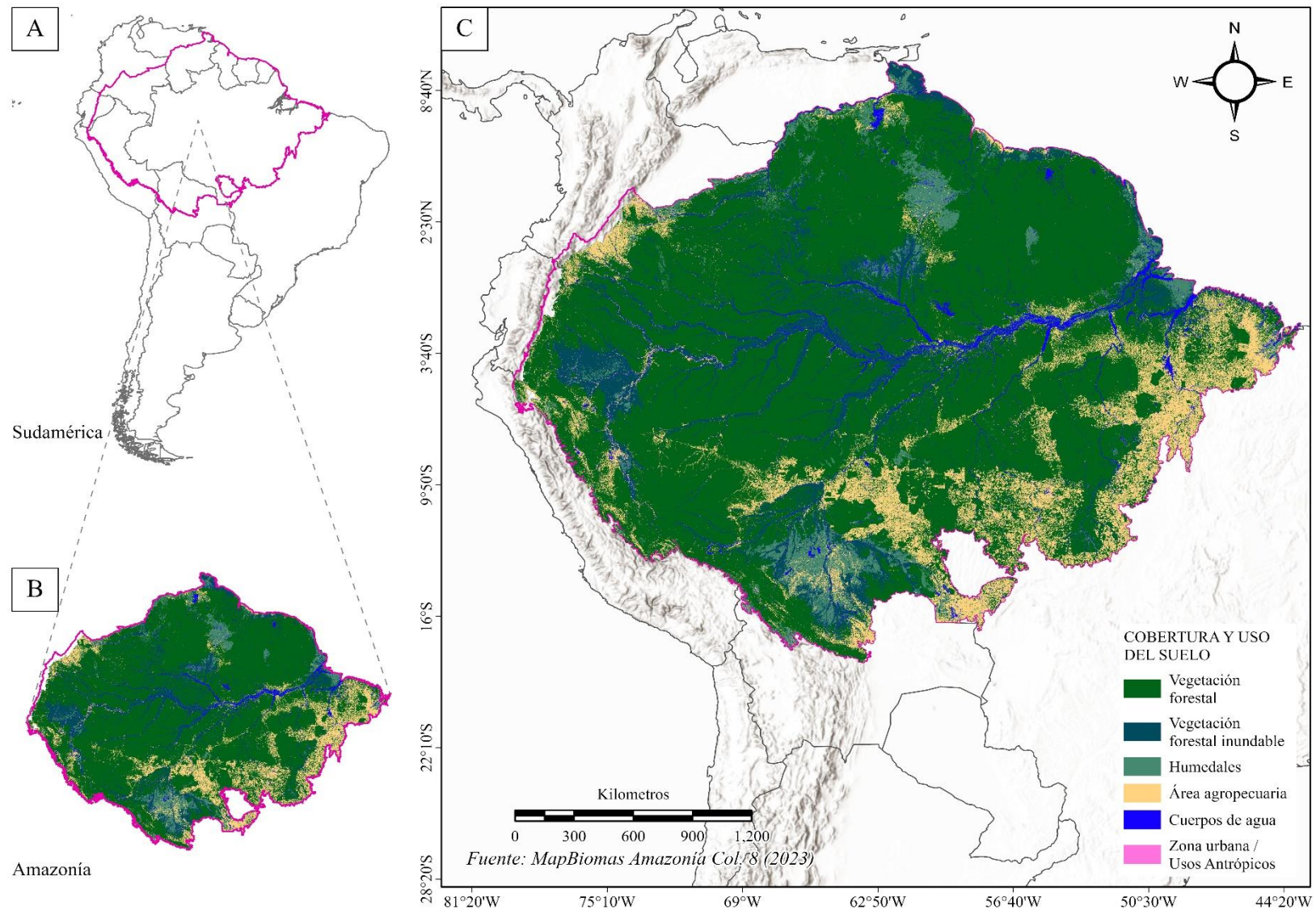
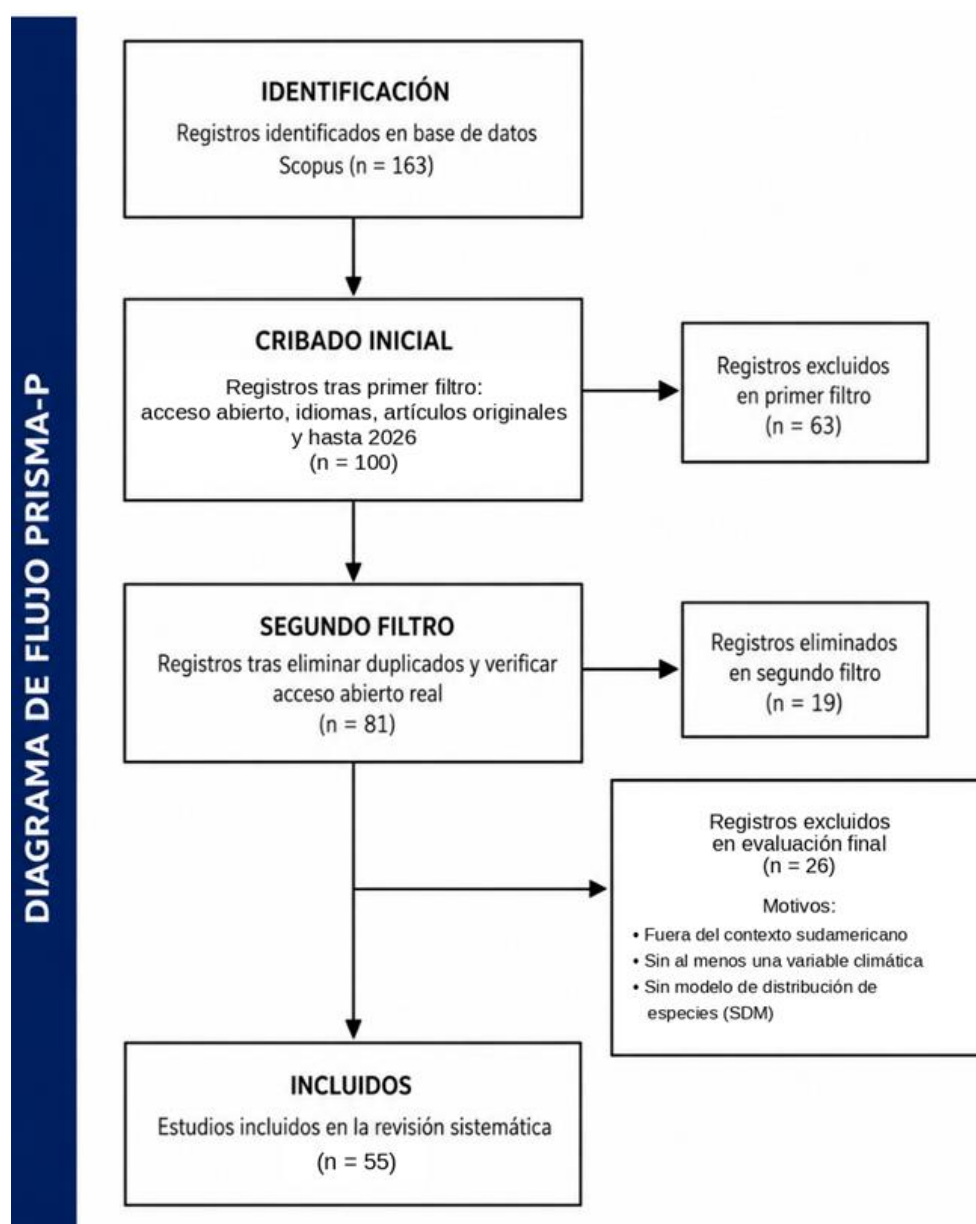


Figura 1. Área de estudio y cobertura del suelo de la Amazonía sudamericana. (A) Ubicación de la Amazonía en el contexto de América del Sur. (B) y (C) Delimitación del bioma amazónico según MapBiomias.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión de la revisión sistemática.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos científicos originales.	Literatura gris.
Estudios que utilicen algún tipo de modelo de distribución de especies.	Estudios fuera del contexto sudamericano.
Investigaciones sobre cambios en la distribución potencial de especies y cambio climático.	Estudios que no incluyen al menos una variable climática.
Estudios hechos en la Amazonía sudamericana.	Artículos duplicados.
Estudios en inglés, español o portugués.	Estudios sin acceso al resumen o al texto completo.
Estudios de acceso abierto.	Estudios sin información relevante para los objetivos del estudio.


Figura 2. Flujograma en la selección de artículos estudiados.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos originales de acceso abierto, en inglés, español o portugués, que aplicaran SDMs a cambios de distribución potencial bajo escenarios climáticos en la Amazonía sudamericana e incorporaran al menos una variable climática. Se excluyeron literatura gris, duplicados, estudios externos a la región, trabajos sin variables climáticas, sin texto accesible o sin información pertinente (Tabla 1).

Proceso de selección de estudios

El proceso de depuración consideró artículos originales de acceso abierto, publicados en inglés, español o portugués hasta 2026. El primer filtro redujo los 163 registros recuperados a 100 artículos; posteriormente, la verificación de duplicados y disponibilidad de texto completo redujo el conjunto a 81 artículos. Finalmente, la revisión de títulos, resúmenes y textos completos, de acuerdo con los criterios de la Tabla 1, permitió incluir 55 artículos en la síntesis (Figura 2). La aplicación de este enfoque metodológico permitió reducir sesgos y fortalecer la trazabilidad de la revisión sistemática (Moher et al., 2009).

Extracción y Organización de datos

La información se organizó en una matriz de extracción elaborada en Microsoft Excel. Se registraron ID, DOI, autor y año, revista, idioma, afiliación principal, grupo taxonómico, especie o taxón, país y área de estudio, tipo de modelo y algoritmo, fuentes de ocurrencia y de clima, variables ambientales, escenarios climáticos, horizonte temporal, métodos y valores de validación, cambios en la distribución, dirección del cambio, pa-

trones espaciales, zonas afectadas, hallazgos principales, limitaciones y vacíos de investigación. Esta sistematización permitió homogeneizar la información y facilitar su análisis comparativo entre los estudios relacionados. La matriz de datos fue depositada en el repositorio público Figshare y se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.33315138>.

Análisis de la información

Se realizó mediante un enfoque cualitativo-descriptivo con comparación entre estudios, identificando patrones en la aplicación de SDMs, tendencias en los cambios de distribución de especies y factores determinantes como variables climáticas, uso del suelo e interacciones ecológicas (Gonçalves et al., 2021).

RESULTADOS

Resultados bibliométricos

La Figura 3 muestra la distribución anual de los artículos revisados. Se observó una producción baja e irregular entre 2008 y 2018; a partir de 2019 se registró una mayor continuidad de publicaciones, aunque con variaciones interanuales. El mayor volumen se registró en 2025, con 15 artículos, seguido de 2020 y 2022, con 6 artículos cada uno. En 2026 se registraron 2 artículos. En conjunto, se evidencia un aumento reciente del interés científico por el uso de modelos de distribución de especies para analizar los efectos del cambio climático en la Amazonía sudamericana.

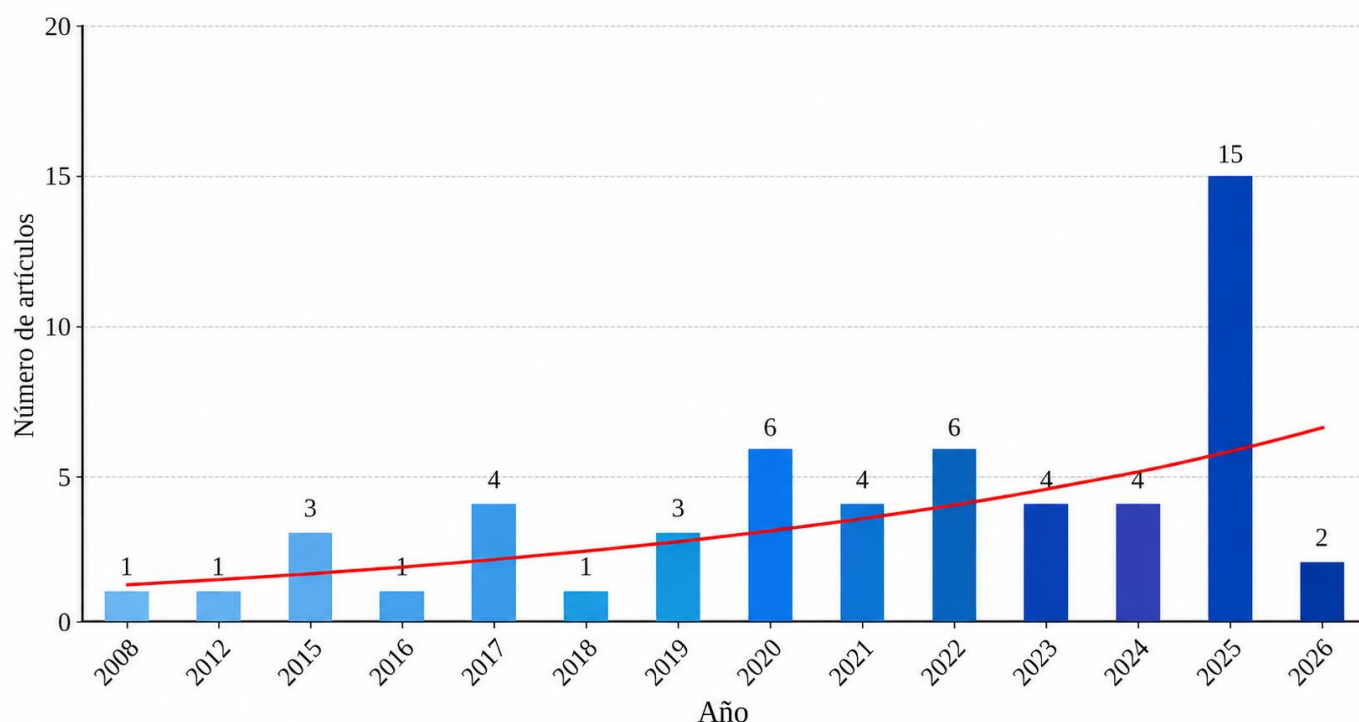


Figura 3. Distribución anual de publicaciones.

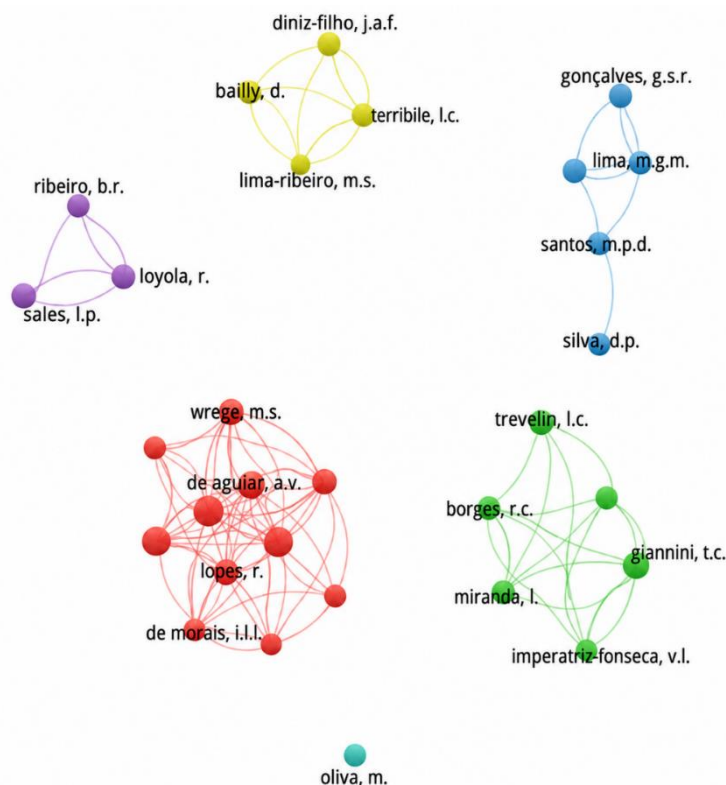


Figura 4. Mapa de distribución de los autores.

La Figura 4 presentó una red de coautoría generada en VOSviewer, donde los autores se agruparon en clústeres diferenciados por colores. El clúster rojo concentró la mayor densidad de vínculos. También se identificó un autor aislado, Oliva, m., con baja conexión dentro de la red.

En la Figura 5 se muestra las afiliaciones institucionales más frecuentes en los artículos revisados. La categoría “Otros” concentra la mayor frecuencia (312 registros), lo que indica una alta diversidad de instituciones con baja representación individual. Entre las instituciones específicas destacan la Universidade Federal de Goiás (26), la Universidade Federal do Pará (25) y la Universidade Federal do Amazonas (17), evidenciando una fuerte participación de universidades brasileñas en los estudios sobre modelos de distribución de especies y cambio climático. En menor frecuencia aparecen la Universidade de São Paulo, Instituto Tecnológico Vale, INPA e Instituto de Ciências Biológicas (9 cada uno), mientras que INDECES/UNTRM y CNRS registran participación más reducida (4 cada uno).

La Figura 6 muestra una red de coocurrencia de palabras clave generada en VOSviewer, donde el término “climate change” aparece como el nodo central y de mayor tamaño, indicando que es el eje principal de los estudios revisados. Se identifican tres grupos temáticos: el clúster rojo se relaciona con biodiversidad, conservación, Amazonía, deforestación, MaxEnt y modelamiento de distribución de especies; el clúster verde agrupa

términos asociados a distribución de especies, nicho ecológico, animales, ecosistemas, precipitación y temperatura; y el clúster azul se vincula con bosques, aves, anfibios, ríos y protección ambiental. En conjunto, la red evidencia que las investigaciones revisadas integran principalmente cambio climático, biodiversidad, conservación y modelamiento ecológico para analizar cambios en la distribución potencial de especies.

Identificación de estudios que emplean Modelos de Distribución de Especies (SDMs) para evaluar cambios en la distribución potencial de especies en la Amazonía sudamericana bajo escenarios de cambio climático.

La Tabla 2 muestra la frecuencia de los modelos utilizados en los 55 estudios revisados. Los SDM fueron el enfoque predominante, con 44 estudios (80.00%). MaxEnt fue el algoritmo más empleado, presente en 35 investigaciones (63.64%), seguido por GLM en tres estudios (5.45%) y por Random Forest y BRT en dos estudios cada uno (3.64%). CART combinado con GLM logístico y SVM fueron utilizados en un estudio cada uno (1.82%).

Los ENM representaron el 5.45% de los estudios (n=3): BIOCLIM se empleó en dos casos (3.64%) y una combinación de Climate Space Model, Envelope Score, Niche Mosaic y Environmental Distance en uno (1.82%). Los enfoques híbridos alcanzaron el 14.55% (n=8), destacando los modelos Ensemble en cinco estudios (9.09%), seguidos de otras combinaciones

(3.64%) y de la integración de GAU, MXS, RDF y SVM mediante PCA (1.82%).

La Tabla 3 muestra la frecuencia de los métodos utilizados para evaluar el desempeño de los modelos de distribución de especies en los estudios analizados. Se observó una clara predominancia del Área Bajo la Curva (AUC, Area Under the Curve), que constituyó la métrica de validación más empleada. Respecto a su frecuencia de uso, el AUC fue reportado en 22 estudios (40.00%), seguido por el True Skill Statistic (TSS) en

12 estudios (21.82%). Asimismo, los enfoques de validación mixtos y la validación cruzada estuvieron presentes en 6 estudios cada uno (10.91%). Por el contrario, métodos como ROC, Kappa, Jaccard, Jackknife, Checkerboard, AICc y la comparación con literatura fueron utilizados únicamente en un estudio cada uno (1.82%). Además, en 2 estudios (3.64%) no se especificó el método de validación empleado. En conjunto, AUC y TSS representaron el 61.82% de los métodos de validación reportados en la literatura analizada.

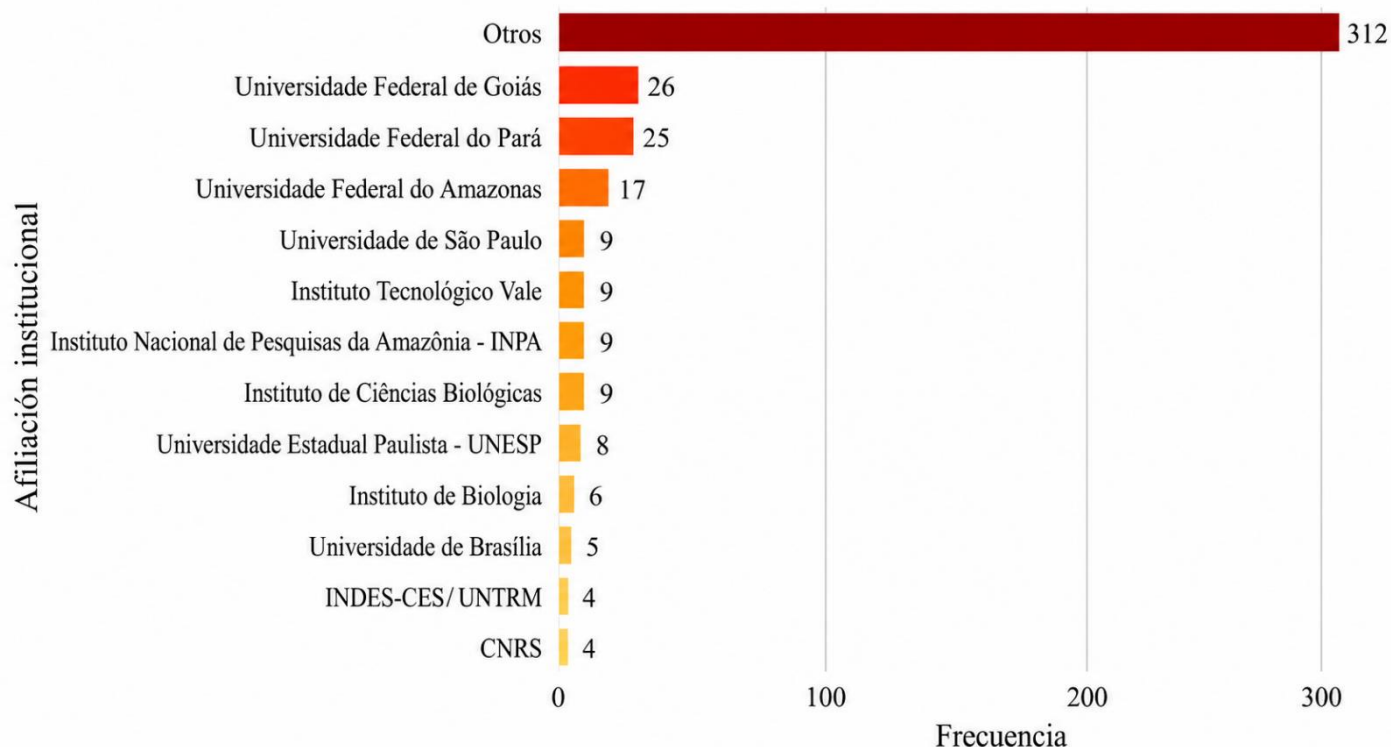


Figura 5. Afiliación de instituciones más frecuentes.

Tabla 2. Frecuencia de modelos de distribución de especies usados por los estudios revisados.

Tipo de modelo	Algoritmo	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
SDM	MaxEnt	35	63.64
SDM	GLM	3	5.45
SDM	Random Forest	2	3.64
SDM	BRT	2	3.64
SDM	CART + GLM logístico	1	1.82
SDM	SVM	1	1.82
ENM	BIOCLIM	2	3.64
ENM	Climate Space Model + Envelope Score + Niche Mosaic + Environmental Distance	1	1.82

Híbrido	Ensemble	5	9.09
Híbrido	GAU + MXS + RDF + SVM integrados mediante PCA	1	1.82
Híbrido	Otro	2	3.64
Total		55	100

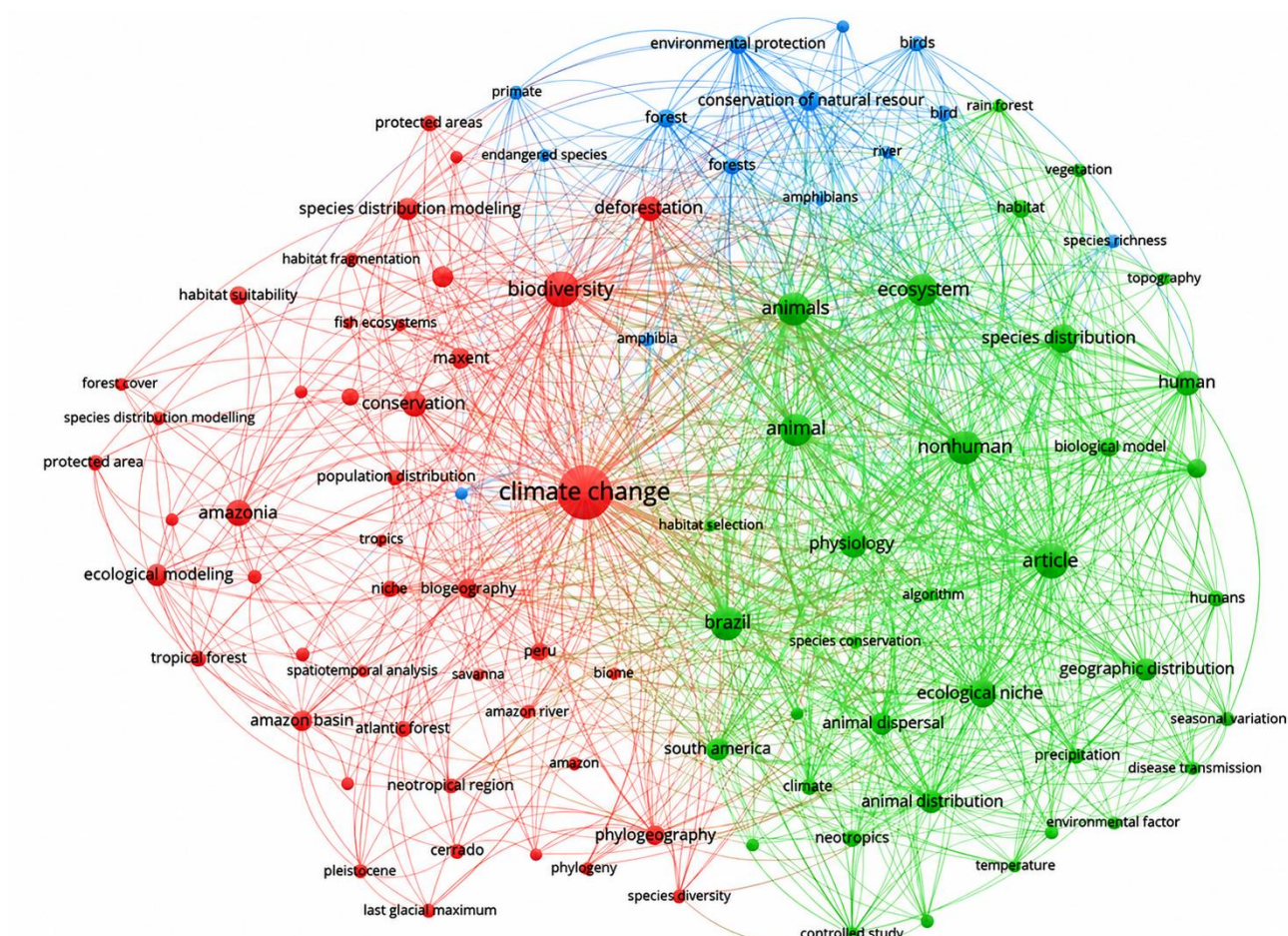


Figura 6. Red bibliométrica de coocurrencia de palabras clave.

Tabla 3. Métodos de validación utilizados por los estudios revisados

Método de validación	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
AUC	22	40.00
TSS	12	21.82
Mixto	6	10.91
Validación cruzada	6	10.91
No reporta	2	3.64
Comparación con literatura	1	1.82
Jackknife	1	1.82
Jaccard	1	1.82
ROC	1	1.82
Kappa	1	1.82
Checkerboard	1	1.82
AICc	1	1.82
Total	55	100

frecuencia (35 estudios; 63.6 %), seguida por la precipitación (33; 60.0 %), la altitud/topografía (14; 25.5 %) y el uso del suelo/cobertura (8; 14.5 %). La conectividad, las variables bióticas y la deforestación no fueron consignadas como variables

La Figura 7 presenta la distribución de las especies analizadas según su grupo taxonómico en los estudios incluidos en la revisión. Las plantas y las aves fueron los grupos con mayor representación, concentrando conjuntamente el 72.0% de las especies registradas. De las 168 especies o taxones reportados, las plantas constituyeron el grupo más numeroso con 64 especies (38.1%), seguidas por las aves con 57 especies (33.9%). En una proporción considerablemente menor, los insectos registraron 14 especies (8.3%), ubicándose como el tercer grupo más frecuente. Asimismo, los mamíferos, reptiles y anfibios estuvieron representados por 11 (6.5%), 9 (5.4%) y 8 especies (4.8%), respectivamente. Por otro lado, los peces registraron 3 especies (1.8%), mientras que los hongos y los virus presentaron la menor frecuencia, con una sola especie cada uno (0.6%).

Los grupos taxonómicos mostraron una representación desigual y respuestas diferenciadas. En las plantas predominó la disminución (n=26), seguida por los casos sin dirección reportada (n=21) y el aumento (n=18); en las aves predominaron los casos no reportados (n=27) y la disminución (n=23). Los anfibios mostraron principalmente disminución (5 de 8 registros), mientras que los reptiles presentaron una respuesta predominantemente mixta (8 de 9). Los primates y los hongos se asociaron únicamente con disminución, y el virus con aumento. En cuanto a la amplitud taxonómica por registro, los máximos correspondieron a plantas (608 taxones), aves (501), insectos (216) y peces (138) (Figura 8).

Al considerar cada DOI una sola vez (n=55), la temperatura fue la variable ambiental explícitamente reportada con mayor ambientales explícitas en el campo utilizado para este análisis (Figura 9).



Figura 7. Distribución de especies estudiadas por grupo taxonómico: conteo de registros únicos de especies.

La Figura 10 presenta los tipos de cambio reportados a nivel de artículo, permitiendo que un mismo estudio contribuya a más de una categoría. La contracción/pérdida fue la más frecuente, con 46 artículos (83.6 %), seguida por el cambio en idoneidad climática, con 39 (70.9 %), el desplazamiento latitudinal/direccional, con 31 (56.4 %), y la expansión/ganancia, con 30 (54.5 %). Los cambios mixtos se registraron en 23 artículos (41.8 %), la estabilidad/sin cambio en 8 (14.5 %) y los reportes no claros en 7 (12.7 %). Las menores frecuencias correspondieron al desplazamiento altitudinal (6; 10.9 %), la fragmentación (5; 9.1 %), el recambio (2; 3.6 %) y el desplazamiento no especificado (2; 3.6 %).

La Figura 11 muestra los tipos de cambio considerando las 221 filas de extracción de especies/taxones; una misma fila podía registrar más de un tipo de cambio. La contracción/pérdida alcanzó 111 registros (50.2 %), el cambio en idoneidad climática 89 (40.3 %), los reportes no claros 78 (35.3 %), la expansión/ganancia 68 (30.8 %), el desplazamiento latitudinal/direccional 58 (26.2 %) y los cambios mixtos 55 (24.9 %). En menor frecuencia se registraron estabilidad/sin cambio (23; 10.4 %), desplazamiento altitudinal (11; 5.0 %), recambio (8; 3.6 %), fragmentación (7; 3.2 %) y desplazamiento no especificado (6; 2.7 %).

La Figura 12 mostró la dirección general de los cambios por grupo taxonómico a partir de categorías mutuamente excluyentes. En plantas predominaron la pérdida/contracción (n=26), los casos no reportados (n=21) y la ganancia/expansión (n=18); en aves destacaron los casos no reportados (n=26) y la pérdida/contracción (n=23). Los reptiles estuvieron

dominados por respuestas mixtas (n=8), mientras que los anfibios presentaron principalmente pérdida/contracción (n=5). En mamíferos, sin incluir la categoría separada de primates utilizada en la Figura 8, predominaron los casos no reportados (n=20) y la pérdida/contracción (n=9).

La Tabla 4 sintetizó los cambios por grupo taxonómico utilizando registros de extracción para los tipos y la dirección del cambio, y artículos únicos para los escenarios climáticos. En plantas destacaron el cambio de idoneidad climática (n=44), la expansión/ganancia (n=39) y la contracción/pérdida (n=38); en aves predominó la contracción/pérdida (n=28), y en mamíferos la contracción/pérdida (n=15) y el cambio de idoneidad (n=14). Los reptiles mostraron una marcada respuesta mixta (n=8), los anfibios una predominancia de disminución (n=5), los peces combinaron disminución (n=2) y respuesta mixta (n=1), el hongo presentó disminución y el virus aumento. Los escenarios más recurrentes en plantas fueron SSP5-8.5 y SSP2-4.5, mientras que en los demás grupos se combinaron escenarios RCP, SSP, actuales y paleoclimáticos según el estudio.

Integración de los estudios revisados para la identificación de patrones espaciotemporales y puntos críticos.

Los horizontes 2050-2060 y 2070-2080 concentraron la mayor evidencia. En 2050-2060, la Amazonía oriental reunió 21 menciones de estudios, seguida por la Amazonía occidental (16) y el ecotono Amazonía-Cerrado/arco de deforestación (10). En 2070-2080, la Amazonía oriental registró 16, la occidental 14, el ecotono 11 y la Amazonía sur/sudoriental 10 (Figura 13).

Tabla 4. Cambios en la distribución reportados según grupo taxonómico, especies y escenario climático.

Grupo taxonómico	N.º especies	Especies/taxones representativos	Tipos de cambio reportados (n de registros)	Dirección del cambio (n de registros)	Escenarios climáticos asociados (n de artículos)
Plantas	64	Cedrelinga cateniformis; Ceiba pentandra; Apuleia leiocarpa; Cariniana decandra; entre otros	Contracción/pérdida (n=38); Cambio de idoneidad climática (n=44); Expansión/ganancia (n=39); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=28); Cambios mixtos (n=19); Estabilidad/sin cambio (n=9); Desplazamiento altitudinal (n=8); Fragmentación (n=2)	Disminuye (n=26); Aumenta (n=18); Mixto (n=8); Se mantiene (n=7); No reporta (n=21)	RCP 2.6 (n=2); RCP 4.5 (n=6); RCP 6.0 (n=1); RCP 8.5 (n=6); RCP no especificado (n=2); SSP2-4.5 (n=8); SSP3-7.0 (n=1); SSP5-8.5 (n=10); SRES A2a (n=1); ENSO (n=1); Otro/no detallado (n=2)

Aves	57	Chaetocercus berlepschi; Eriocnemis nigrivestis; Synallaxis maranonica; Pyrrhura orcesi; entre otros	Contracción/pérdida (n=28); Cambio de idoneidad climática (n=18); Cambios mixtos (n=9); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=5); Recambio (n=4); Expansión/ganancia (n=4); Fragmentación (n=2)	Disminuye (n=23); Mixto (n=9); No reporta (n=27)	RCP 4.5 (n=2); RCP 8.5 (n=1); RCP no especificado (n=3); SSP2-4.5 (n=1); SSP5-8.5 (n=1); SRES A1B (n=1); Actual (n=1); Otro/no detallado (n=2)
Mamíferos	11	Tremarctos ornatus; Alouatta discolor; Mico nigriceps; Bradypus torquatus; entre otros	Contracción/pérdida (n=15); Cambio de idoneidad climática (n=14); Cambios mixtos (n=9); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=6); Expansión/ganancia (n=5)	Disminuye (n=11); Mixto (n=3); Aumenta (n=1); No reporta (n=21)	RCP 2.6 (n=1); RCP 4.5 (n=3); RCP 6.0 (n=1); RCP 8.5 (n=3); RCP no especificado (n=1); SSP no especificado (n=2); SSP2-4.5 (n=1); SSP5-8.5 (n=1); Otro/no detallado (n=1)
Insectos	14	Lutzomyia longipalpis sensu lato; Anopheles darlingi; Anopheles nuneztovari s.l.; Aedes aegypti; entre otros	Contracción/pérdida (n=12); Expansión/ganancia (n=9); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=7); Cambio de idoneidad climática (n=7); Cambios mixtos (n=6); Estabilidad/sin cambio (n=5); Desplazamiento altitudinal (n=2); Fragmentación (n=2); Recambio (n=1)	Disminuye (n=5); Aumenta (n=2); Mixto (n=4); Se mantiene (n=4); No reporta (n=9)	RCP 2.6 (n=4); RCP 4.5 (n=2); RCP 6.0 (n=1); RCP 8.5 (n=3); RCP no especificado (n=1); SSP2-4.5 (n=1); SSP5-8.5 (n=2); Actual (n=1); Otro/no detallado (n=2)
Reptiles	9	Caiman yacare; Anolis chrysolepis; A. tandai; A. scypheus; entre otros	Contracción/pérdida (n=9); Expansión/ganancia (n=8); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=8); Cambios mixtos (n=8); Estabilidad/sin cambio (n=7); Cambio de idoneidad climática (n=2)	Disminuye (n=1); Mixto (n=8)	RCP 4.5 (n=1); RCP 8.5 (n=1); SSP3-7.0 (n=1); SSP5-8.5 (n=1); Paleoclimático/Cuaternario (n=1)
Anfibios	8	Atelopus elegans; Atelopus balios; Atelopus guanujo; Gastrotheca griswoldi; entre otros	Contracción/pérdida (n=5); Cambios mixtos (n=3); Recambio (n=3); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=1); Desplazamiento altitudinal (n=1); Cambio de idoneidad climática (n=1)	Disminuye (n=5); Mixto (n=3)	RCP no especificado (n=1); SRES A1B (n=1); Actual (n=1); Otro/no detallado (n=1)
Peces	3	Arapaima gigas; Hoplias malabaricus (BOLD:AFU2064); 138 especies de peces no nativos (118)	Contracción/pérdida (n=3); Cambio de idoneidad climática (n=3); Desplazamiento latitudinal/direccional (n=3); Expansión/ganancia	Disminuye (n=2); Mixto (n=1)	SSP1-2.6 (n=1); SSP2-4.5 (n=1); SSP5-8.5 (n=2); CCSM4 (n=1)

		extralimitales y 20 exóticas)	(n=2); Estabilidad/sin cambio (n=2); Cambios mixtos (n=1); Fragmentación (n=1)		
Hongos	1	<i>Moniliophthora roreri</i>	Contracción/pérdida (n=1)	Disminuye (n=1)	RCP no especificado (n=1)
Virus	1	Oropouche virus (OROV)	Expansión/ganancia (n=1)	Aumenta (n=1)	Actual (n=1)

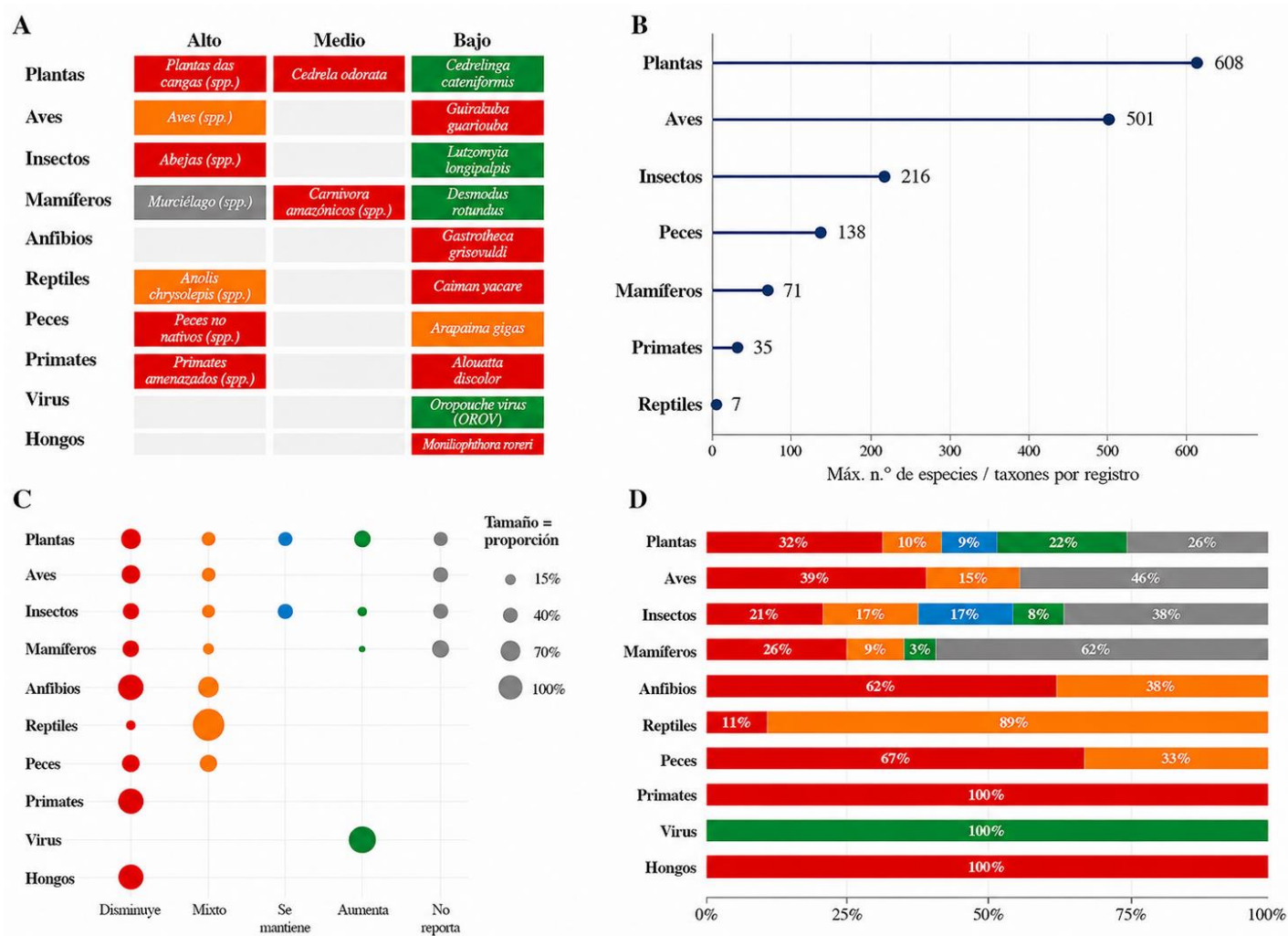


Figura 8. Representatividad taxonómica y tendencias de cambio en la distribución potencial. (A) Especies o taxones representativos por grupo taxonómico. (B) Máximo número de especies o taxones reportado por grupo taxonómico. (C) Frecuencia de las direcciones de cambio por grupo taxonómico. (D) Distribución porcentual de las direcciones de cambio por grupo taxonómico.

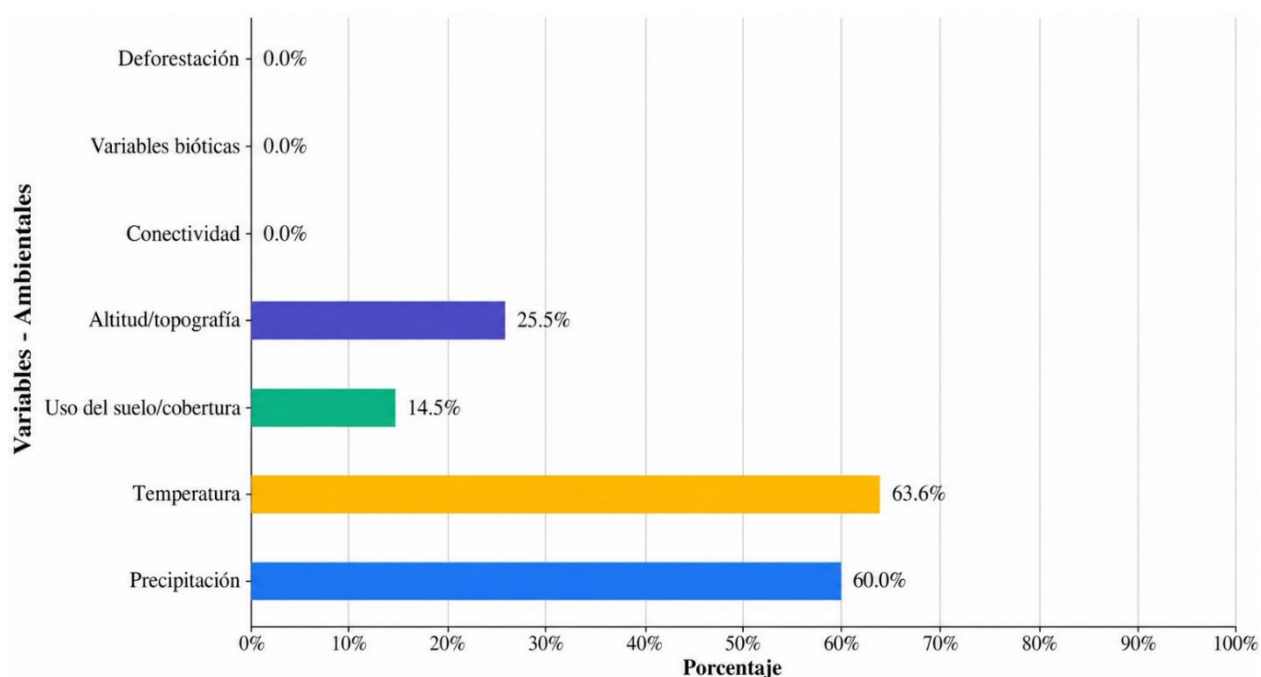


Figura 9. Variables usadas en los modelos.

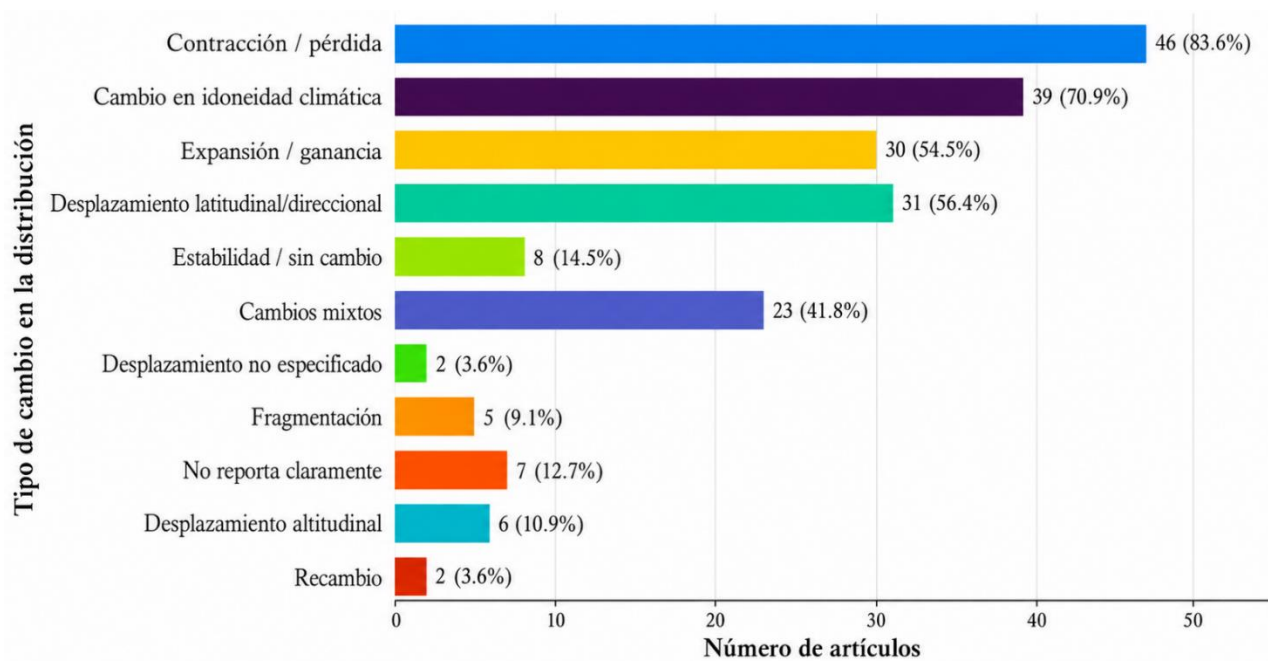


Figura 10. Tipo de cambio en la distribución reportados por los estudios revisados.

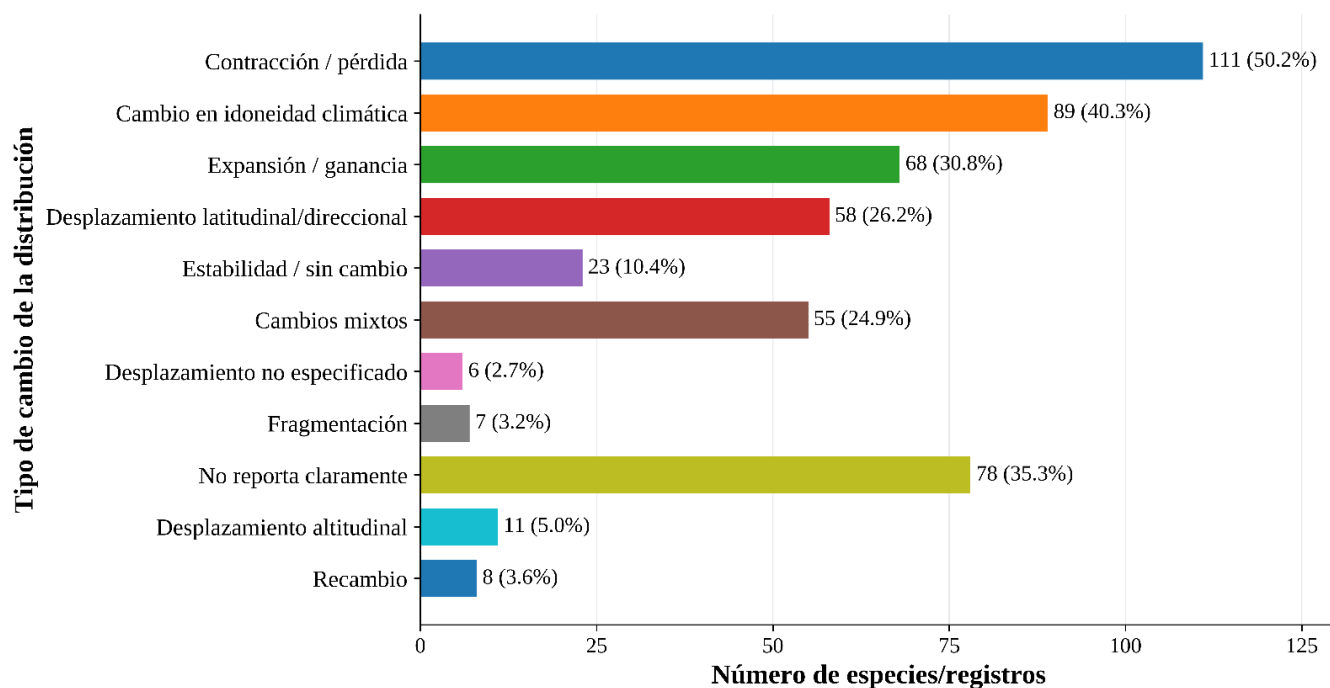


Figura 11. Tipo de cambio en la distribución según número de especies.

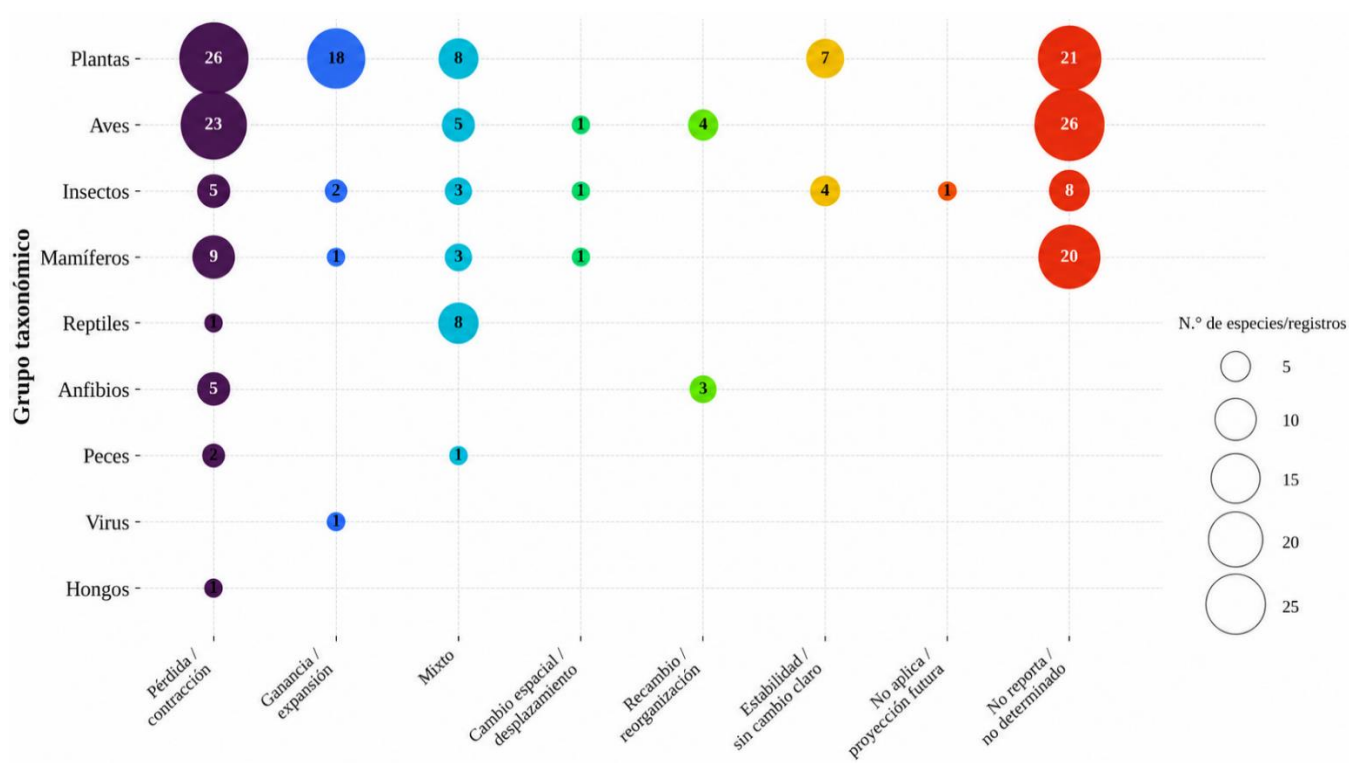


Figura 12. Dirección de cambios en la distribución por grupo taxonómico.



Figura 13. Matriz espacio-temporal de artículos por macrorregión amazónica y horizonte temporal.

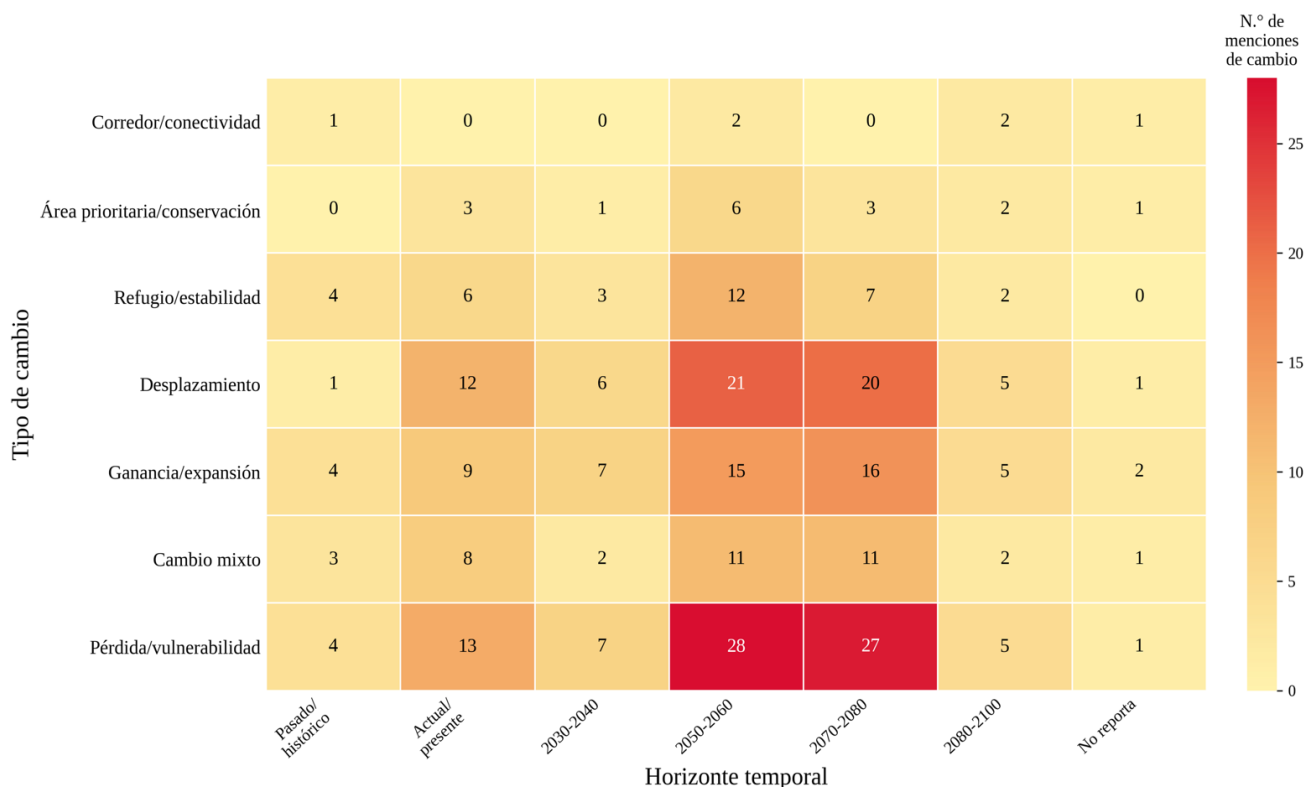


Figura 14. Frecuencia de cambios reportados según tipo de cambio y horizonte temporal.

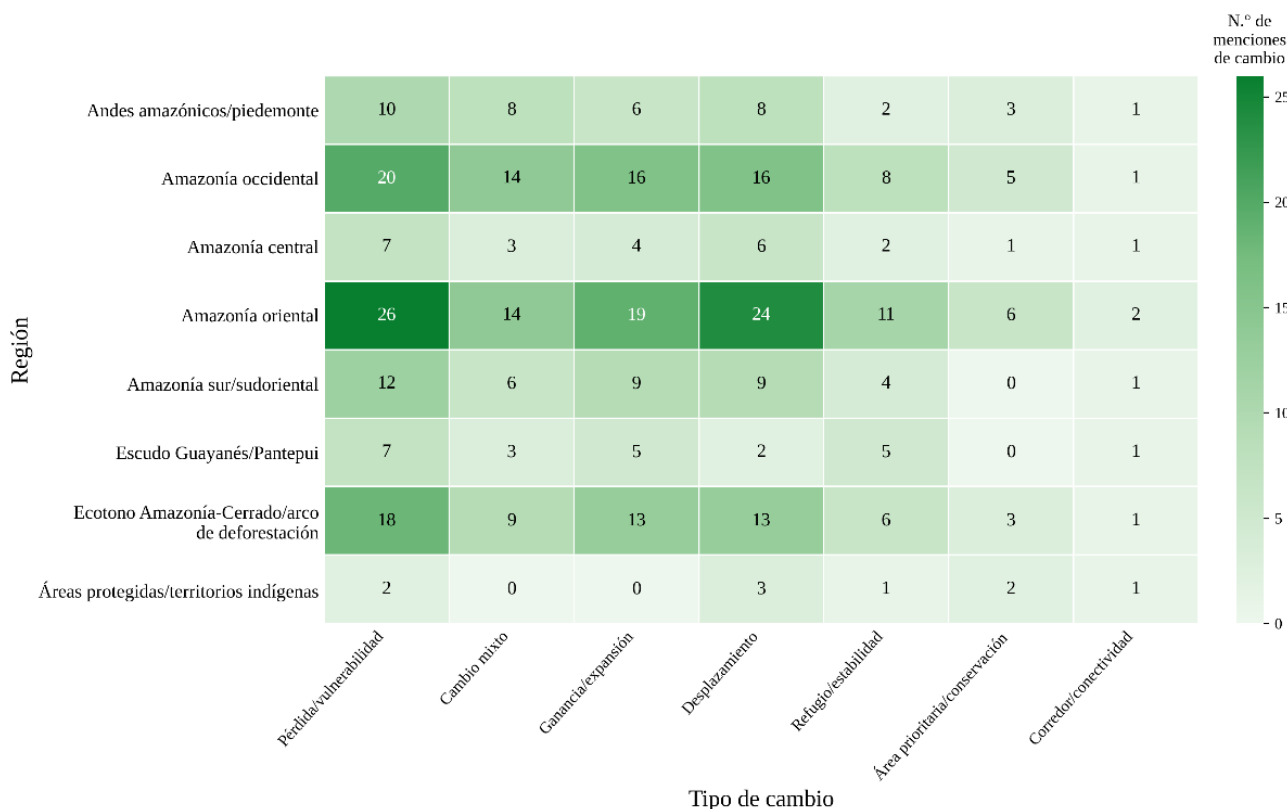


Figura 15. Frecuencia de cambios reportados por macrorregión amazónica.

La pérdida/vulnerabilidad alcanzó 28 menciones en 2050-2060 y 27 en 2070-2080. En esos mismos horizontes, el desplazamiento registró 21 y 20 menciones, la ganancia/expansión 15 y 16, y el cambio mixto 11 en ambos periodos. El refugio/estabilidad alcanzó 12 menciones en 2050-2060 y 7 en 2070-2080 (Figura 14).

La Amazonía oriental concentró la mayor cantidad de menciones de pérdida/vulnerabilidad ($n=26$), desplazamiento ($n=24$) y ganancia/expansión ($n=19$). En la Amazonía occidental se registraron 20 menciones de pérdida y 16 de ganancia y desplazamiento, mientras que en el ecotono Amazonía-Cerrado/arco de deforestación se registraron 18 de pérdida y 13 de ganancia y desplazamiento (Figura 15).

La Figura 16 sintetizó regionalmente la distribución de la evidencia correspondiente a los 55 artículos incluidos. La mayor concentración visual se ubicó en la Amazonía oriental y sudoriental de Brasil y en sectores asociados al ecotono Amazonía-Cerrado/arco de deforestación, con concentraciones menores en la Amazonía occidental. La estimación de densidad Kernel se empleó únicamente como recurso de visualización de la concentración relativa de áreas de estudio (Diggle, 1985; Silverman, 1986). Los puntos representados corresponden a localizaciones regionales referenciales derivadas de las áreas reportadas por los estudios y no a coordenadas de ocurrencia de especies ni a pérdida directa de individuos (Figura 16).

Resultados complementarios

Vacíos y sesgos identificados en los estudios analizados

En cuanto a los sesgos metodológicos, predominó el uso explícito de variables climáticas, particularmente temperatura y precipitación, mientras que el uso del suelo/coertura y la altitud/topografía tuvieron menor presencia en el campo de variables ambientales de la matriz. La conectividad, las variables bióticas y la deforestación fueron discutidas en varios estudios como factores relevantes, pero no se registraron de forma consistente como variables ambientales explícitas en dicho campo. Asimismo, se reportaron limitaciones relacionadas con dispersión, adaptación local, plasticidad fenotípica, variabilidad genética e interacciones ecológicas, además de incertidumbre asociada a algoritmos, modelos climáticos globales, escenarios y supuestos de dispersión.

Respecto a los sesgos espaciales, varios estudios destacaron la disponibilidad desigual de datos de ocurrencia y la existencia de áreas insuficientemente muestreadas dentro de la región amazónica. Entre las principales limitaciones se mencionan los vacíos de información en determinadas zonas geográficas, el posible submuestreo en regiones remotas y la concentración de registros en áreas con mayor accesibilidad. Además, la escasez de estaciones meteorológicas y la resolución espacial relativamente gruesa de algunos conjuntos de datos climáticos incrementan la incertidumbre de las proyecciones, especialmente en sectores donde la información ambiental disponible es limitada.

Por otro lado, los sesgos taxonómicos estuvieron relacionados principalmente con la disponibilidad desigual de información biológica entre especies y grupos taxonómicos. Diversos estu-

dios reportaron dificultades para modelar determinadas especies debido al reducido número de registros de ocurrencia disponibles, lo que limitó la robustez de los modelos generados.

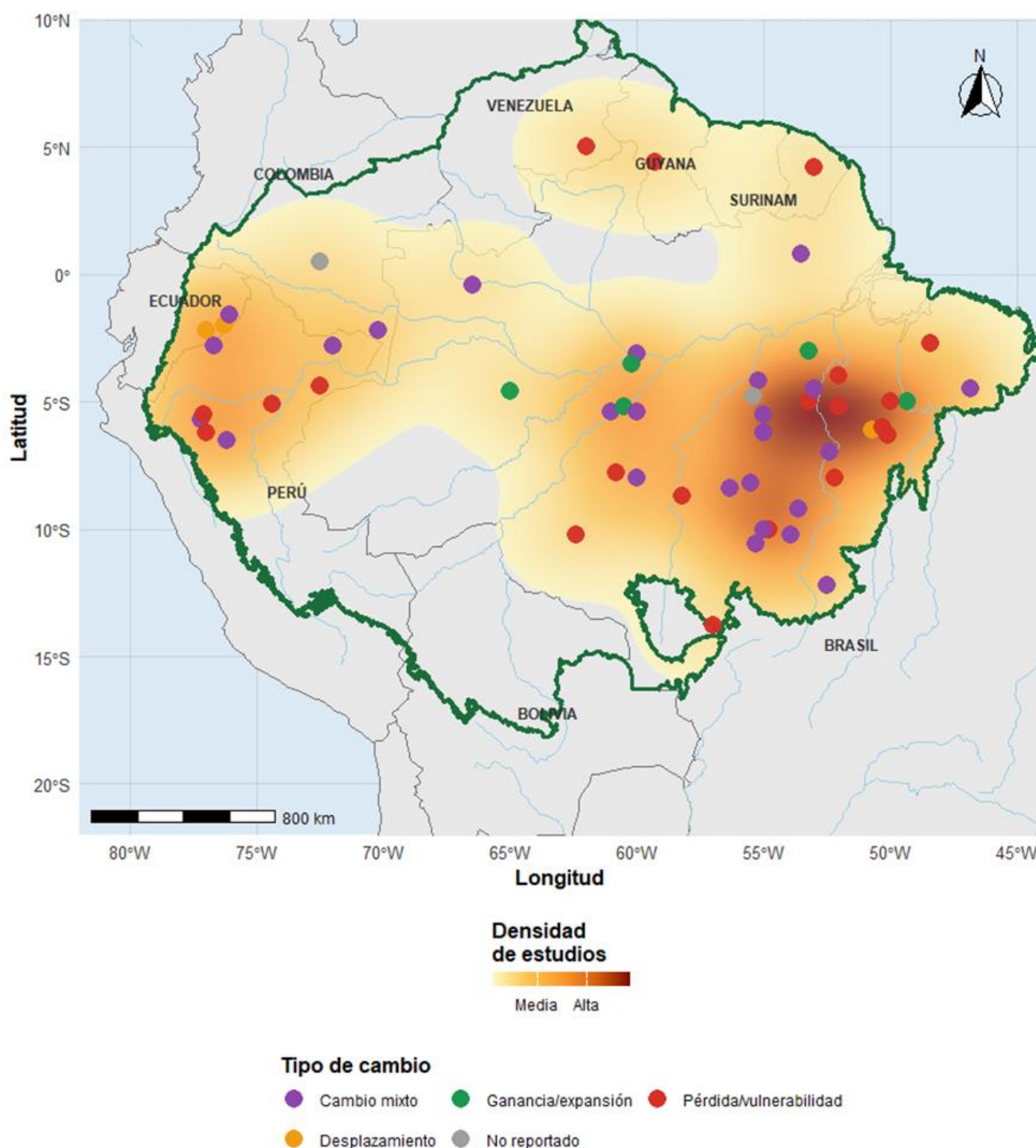


Figura 16. Puntos críticos de evidencia científica sobre cambios en la distribución potencial de especies.

DISCUSIÓN

Cambios predominantes en la distribución potencial de especies

Los resultados evidenciaron que los cambios proyectados en la distribución potencial de las especies amazónicas se orientaron principalmente hacia la pérdida o contracción de áreas adecuadas. Este patrón coincide con la evidencia de que el cambio climático modifica los rangos de distribución, reduce la idoneidad climática y reorganiza las comunidades ecológicas (Lawler et al., 2009; Bellard et al., 2012). Asimismo, el predominio de respuestas negativas es coherente con los mayores riesgos climáticos previstos para Sudamérica y con el aumento de la pérdida de especies conforme se incrementa la temperatura global (Urban, 2015).

La presencia de expansión, ganancia y cambios mixtos demuestra, sin embargo, que las respuestas no son uniformes, sino que dependen de la especie, el escenario climático y la región evaluada (Lawler et al., 2009; Bellard et al., 2012). Además, las perturbaciones antrópicas pueden modificar estas respuestas, por lo que no todos los cambios proyectados deben atribuirse exclusivamente al clima (Quintero et al., 2023). En este contexto, una expansión potencial no implica necesariamente un efecto favorable, pues puede coexistir con pérdida de idoneidad en áreas actualmente ocupadas y con alteraciones en las interacciones ecológicas (Lawler et al., 2009; Bellard et al., 2012).

Los resultados deben interpretarse como simulaciones de cambios potenciales y no como predicciones exactas de la distribución futura de cada especie (Lawler et al., 2009). Esta limitación no reduce la utilidad de los SDMs, ya que permiten reconocer tendencias generales de pérdida, ganancia y desplazamiento en una región de alta vulnerabilidad ecológica (Bellard et al., 2012; Urban, 2015). En conjunto, los hallazgos confirman que el cambio climático influye en la redistribución potencial de la biodiversidad amazónica, aunque sus efectos varían según factores taxonómicos, espaciales y metodológicos (Lawler et al., 2009; Bellard et al., 2012; Quintero et al., 2023).

Alcance metodológico de los estudios basados en SDMs

Los estudios revisados se basaron principalmente en registros de ocurrencia y variables climáticas (Lawler et al., 2009; Dawson et al., 2011). La Tabla 2 mostró el predominio de MaxEnt, cuya capacidad para trabajar con datos de presencia resulta útil en la Amazonía sudamericana, donde numerosos taxones presentan registros dispersos, muestreo limitado o ausencia de datos confiables (Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Quintero et al., 2023). Por tanto, su uso frecuente respondió tanto a sus ventajas metodológicas como a la disponibilidad de información en regiones tropicales megadiversas (Urban, 2015; Miranda et al., 2021).

No obstante, los modelos de presencia pueden verse afectados por sesgos de muestreo, autocorrelación espacial y calidad desigual de los registros (Lawler et al., 2009; Dawson et

al., 2011). Además, los SDMs representan áreas ambientalmente adecuadas, no necesariamente la distribución real de las especies (Bellard et al., 2012; Urban, 2015). Los modelos bioclimáticos tampoco incorporan de forma directa procesos como dispersión, evolución, competencia, interacciones bióticas o transformación del paisaje (Hannah et al., 2007; Lawler et al., 2009); por ello, sus resultados deben entenderse como tendencias de idoneidad y no como presencias futuras absolutas (Dawson et al., 2011; Quintero et al., 2023).

La Tabla 2 también evidenció el uso de modelos ensemble y de algoritmos como Random Forest, GLM, GAM y ENM, que complementan el análisis y reducen parcialmente la incertidumbre asociada a un solo algoritmo (Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012). La integración de enfoques mejora la comparación de escenarios, la identificación de áreas vulnerables y la robustez de las proyecciones, especialmente en paisajes heterogéneos (Urban, 2015; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021; de Meyer et al., 2022).

Según la Figura 9, la temperatura y la precipitación fueron las variables ambientales explícitamente reportadas con mayor frecuencia, seguidas a distancia por la altitud/topografía y el uso del suelo/cobertura. La conectividad, las variables bióticas y la deforestación no fueron consignadas de forma explícita en el campo Variables_ambientales empleado para este análisis, aunque varios estudios las discutieron como factores ecológicos o antrópicos relevantes (Dawson et al., 2011; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023). En consecuencia, la distribución potencial debe interpretarse considerando conjuntamente clima, conectividad, cobertura del suelo y restricciones ecológicas (Hannah et al., 2007; Miranda et al., 2021).

Diferencias de respuesta entre grupos taxonómicos

Las respuestas al cambio climático variaron entre grupos taxonómicos. Algunos mostraron contracción o pérdida predominante, mientras que otros combinaron expansión, desplazamiento y reducción. Esta variabilidad depende de la amplitud del nicho, la capacidad de dispersión y las limitaciones fisiológicas de cada grupo (Urban, 2015).

Las plantas, uno de los grupos más representados, presentaron reducción de idoneidad, contracción, expansiones parciales y cambios mixtos. Esto sugiere procesos simultáneos de pérdida y redistribución espacial, asociados a la interacción entre cambio climático y transformación del uso del suelo (Gonçalves et al., 2021). En las aves también predominó la reducción de áreas adecuadas, aunque se registraron desplazamientos y respuestas mixtas, posiblemente relacionados con diferencias entre especies generalistas y especialistas y con la disponibilidad futura de hábitat. Resultados similares han mostrado pérdidas potenciales de hábitat en ecosistemas tropicales (de Meyer et al., 2022).

En los mamíferos predominó la disminución de áreas adecuadas, en concordancia con las tendencias de reducción de ocupación y diversidad registradas para mamíferos neotropicales

(Grattarola et al., 2024). Los insectos presentaron contracciones y expansiones, probablemente por su sensibilidad a la temperatura y precipitación, sus ciclos de vida y su capacidad de dispersión. Estas modificaciones han sido documentadas tanto para insectos en general como para organismos de importancia ecológica y sanitaria (Gutiérrez et al., 2024; Hartl et al., 2024).

Los reptiles, anfibios y peces mostraron patrones menos uniformes. En anfibios predominó la disminución, los reptiles combinaron contracciones, expansiones y cambios históricos, y los peces presentaron principalmente respuestas mixtas. Esta heterogeneidad confirma que no existe un patrón universal entre taxones y contextos ambientales (Wu, 2020). Finalmente, hongos y virus fueron los grupos menos representados: la evidencia disponible sugirió reducción de idoneidad para hongos y expansión potencial para virus. Aunque el número de estudios impide generalizar, estos resultados muestran vacíos relevantes, dado que el cambio climático puede modificar la distribución de patógenos y organismos asociados a riesgos sanitarios (Xu et al., 2022; Martínez et al., 2024).

Influencia de los escenarios climáticos y horizontes temporales

Los escenarios climáticos y los horizontes temporales condicionaron la magnitud y el tipo de cambios proyectados (Lawler et al., 2009; Bellard et al., 2012). La Figura 13 mostró una mayor concentración de evidencia en los intervalos 2050-2060 y 2070-2080, coherente con el predominio de proyecciones de mediano y largo plazo en los estudios revisados. En estos horizontes se evaluaron pérdidas de idoneidad, desplazamientos, recambio y vulnerabilidad bajo diferentes supuestos climáticos (Hannah et al., 2007; Dawson et al., 2011; Urban, 2015; de Meyer et al., 2022).

Los escenarios de mayores emisiones, como RCP 8.5 y SSP5-8.5, se asociaron con pérdidas de idoneidad y desplazamientos más severos, debido al incremento del riesgo conforme aumenta la temperatura global (Lawler et al., 2009; Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Urban, 2015). Por ello, los resultados deben evaluarse según el escenario, la escala espacial, el horizonte temporal y la capacidad de respuesta de las especies (Calambás-Trochez et al., 2021; de Meyer et al., 2022).

Los escenarios intermedios, como RCP 4.5 y SSP2-4.5, mostraron impactos menos extremos, pero mantuvieron pérdidas parciales, cambios de idoneidad y aparición de áreas potencialmente favorables (Dawson et al., 2011; Urban, 2015; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021). Esto indica que la mitigación puede reducir la magnitud del impacto, aunque no elimina el riesgo (Hannah et al., 2007; Bellard et al., 2012). Asimismo, algunos cambios se manifiestan gradualmente y se intensifican hacia finales de siglo; en ecosistemas montañosos, incluso los horizontes intermedios proyectan pérdidas y desplazamientos altitudinales (Lawler et al., 2009; Urban, 2015; de Meyer et al., 2022). La respuesta final también depende del tiempo disponible para dispersión, adaptación o persistencia local (Hannah et al., 2007; Urban, 2015).

Patrones espaciales de cambio en la Amazonía sudamericana

Los cambios no se distribuyeron uniformemente en la Amazonía sudamericana (Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023). La Figura 13 mostró una mayor acumulación de evidencia en la Amazonía oriental, la Amazonía occidental y el ecotono Amazonía-Cerrado/arco de deforestación, especialmente en los horizontes 2050-2060 y 2070-2080. Este patrón refleja la distribución de la evidencia científica disponible y no una medida directa de vulnerabilidad biológica (Hannah et al., 2007; Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Urban, 2015).

La Amazonía oriental concentró estudios futuros en una zona donde convergen biodiversidad, cambio de uso del suelo y áreas prioritarias de conservación (Hannah et al., 2007; Dawson et al., 2011; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023). En esta región, la idoneidad climática no siempre coincide con paisajes funcionalmente conectados, por lo que la conservación requiere considerar áreas protegidas, conectividad, restauración, fragmentación y permanencia de la cobertura forestal (Bellard et al., 2012; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023).

El ecotono Amazonía-Cerrado/arco de deforestación también fue crítico por la recurrencia de pérdida, vulnerabilidad y cambios mixtos. La deforestación, la expansión agrícola y la fragmentación pueden intensificar los efectos climáticos, de modo que los modelos basados solo en clima podrían subestimar la vulnerabilidad real (Hannah et al., 2007; Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023).

En los Andes amazónicos y el piedemonte predominaron los desplazamientos altitudinales y los cambios de idoneidad. Los bosques montañosos podrían perder hábitat y desplazar sus rangos hacia mayores elevaciones, aunque la topografía, la fragmentación y la disponibilidad de hábitat pueden limitar este movimiento (Lawler et al., 2009; Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Urban, 2015; de Meyer et al., 2022). Por ello, estos patrones dependen de la exposición climática, la capacidad de dispersión, la conectividad altitudinal y la persistencia de refugios climáticos (Hannah et al., 2007; Lawler et al., 2009).

Puntos críticos, refugios climáticos e implicancias para la conservación

La pérdida de idoneidad, los desplazamientos y la reducción de áreas adecuadas tienen implicancias directas para la conservación amazónica (Hannah et al., 2007; Miranda et al., 2021). Las áreas protegidas no garantizan por sí solas la permanencia de las especies, porque sus rangos podrían desplazarse fuera de los límites actuales (Hannah et al., 2007).

Los resultados respaldan la identificación de puntos críticos donde coincidan pérdida de hábitat adecuado, presión antrópica y baja capacidad de respuesta (Dawson et al., 2011; Miranda et al., 2021). Estos espacios permiten priorizar acciones más allá de las áreas protegidas existentes, mientras que los refugios climáticos pueden mantener poblaciones viables cuando las condiciones favorables se desplazan (Hannah et

al., 2007; Dawson et al., 2011; de Meyer et al., 2022). Esta necesidad es especialmente relevante en la Amazonía andina y las zonas de transición, donde los cambios altitudinales pueden afectar comunidades sensibles (de Meyer et al., 2022). Los corredores ecológicos también son esenciales para facilitar el movimiento hacia áreas climáticamente adecuadas (Miranda et al., 2021). La fragmentación puede restringir la dispersión y reducir la capacidad de respuesta de las especies, por lo que la conservación debe mantener paisajes conectados y funcionales, no únicamente áreas aisladas (Hannah et al., 2007; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021). Sin embargo, los SDMs identifican riesgos potenciales y deben complementarse con información sobre sensibilidad, exposición, adaptación, dispersión, uso del suelo e interacciones bióticas (Dawson et al., 2011; Calambás-Trochez et al., 2021). En conjunto, la planificación debe priorizar áreas vulnerables, refugios climáticos, corredores ecológicos y zonas con persistencia de hábitat adecuado. Los cambios identificados constituyen tanto una respuesta ecológica al calentamiento como una señal para fortalecer la gestión territorial y la restauración estratégica en la Amazonía sudamericana (Hannah et al., 2007; Dawson et al., 2011; Miranda et al., 2021).

Vacíos de información e incertidumbres de la evidencia revisada

Los principales vacíos fueron metodológicos, espaciales y taxonómicos (Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012). La Figura 9 mostró el predominio de temperatura y precipitación, frente a la escasa incorporación de deforestación, conectividad y variables bióticas (Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023). Esta limitación es relevante porque la distribución depende también de interacciones ecológicas, barreras de dispersión, uso del suelo, presión antrópica y capacidad adaptativa (Hannah et al., 2007; Lawler et al., 2009). Por tanto, los modelos centrados en el clima pueden ofrecer una interpretación ecológica incompleta (Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012). La omisión de procesos bióticos y antrópicos restringe el análisis a la relación entre clima y ocurrencia, pese a que las respuestas operan desde individuos hasta ecosistemas y están condicionadas por dispersión, conectividad y transformación del paisaje (Lawler et al., 2009; Calambás-Trochez et al., 2021; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023). Este aspecto es especialmente importante en la Amazonía, donde el cambio climático interactúa con la pérdida de cobertura y la fragmentación (Bellard et al., 2012; Quintero et al., 2023). También persisten vacíos espaciales por la baja disponibilidad de registros en regiones remotas, lo que puede reducir la precisión y subrepresentar áreas poco muestreadas (Hannah et al., 2007; Lawler et al., 2009; Dawson et al., 2011; Urban, 2015). Aunque los modelos estiman exposición climática, evaluar vulnerabilidad requiere incluir sensibilidad, capacidad adaptativa y restricciones de dispersión, pues una zona adecuada no garantiza que las especies puedan alcanzarla o persistir en ella (Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Urban, 2015; Miranda et al., 2021).

Los sesgos taxonómicos también limitaron las inferencias. La Figura 7 mostró una mayor representación de plantas y aves frente a hongos, virus y otros grupos con menor cobertura (Lawler et al., 2009; Dawson et al., 2011; Bellard et al., 2012; Urban, 2015). Esta desigualdad impide comparar con igual solidez todos los grupos y delimita el alcance de las conclusiones para la biodiversidad amazónica (Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023).

En ese sentido, la incertidumbre dependió de los algoritmos, variables, modelos climáticos, escenarios y horizontes seleccionados (Dawson et al., 2011; Miranda et al., 2021). Los enfoques ensemble, la validación robusta y el uso de múltiples escenarios generan interpretaciones más consistentes, mientras que los modelos basados en un solo algoritmo o pocas variables requieren mayor cautela (Bellard et al., 2012; Urban, 2015). En consecuencia, los SDMs son útiles para identificar tendencias, pero deben interpretarse dentro de sus límites y fortalecerse mediante conectividad, dispersión, uso del suelo, áreas protegidas y validación espacial (Hannah et al., 2007; Lawler et al., 2009; Miranda et al., 2021; Quintero et al., 2023).

CONCLUSIÓN

El cambio climático está reconfigurando la distribución potencial de las especies en la Amazonía sudamericana mediante la contracción de hábitats, la pérdida de idoneidad climática y el desplazamiento de sus rangos.

Los estudios revisados mostraron que los SDMs, principalmente MaxEnt, permiten proyectar estos cambios; sin embargo, su dependencia de variables bioclimáticas limita la incorporación de factores como la deforestación, la conectividad y las interacciones bióticas.

Los impactos se concentraron en macrorregiones con mayor presión antrópica y se intensificaron en horizontes temporales lejanos, generando puntos críticos de vulnerabilidad ecológica. Por ello, la conservación debe priorizar estas zonas mediante corredores ecológicos, refugios climáticos y enfoques multimodelo que integren variables ecológicas y antrópicas para reducir la incertidumbre y fortalecer la toma de decisiones.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: DDSO; Metodología: ACV, DDSO; Investigación: SCR, WMRP; Redacción del manuscrito: ACV, SCR, DDSO, WMRP; Revisión y edición del manuscrito: ACV, SCR, DDSO, WMRP.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés que pueda sesgar este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Calambás-Trochez, L. F., Velazco, S. J. E., Hoffmann, P. M., Gurski, E. M., Brum, F. T., & Carlucci, M. B. (2021). Climate and land-use changes coupled with low coverage of protected areas threaten palm species in South Brazilian grasslands. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.03.010>
- Chavez Flores, I. A., Mendoza Paz, S., Villazón Gómez, M. F., Willems, P., & Gobin, A. (2025). Impacts of climate change on the hydropower potential of a multi-purpose storage system project in Bolivian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 62, 102903. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102903>
- Confalonieri, U. E. C., Margonari, C., & Quintão, A. F. (2014). Environmental change and the dynamics of parasitic diseases in the Amazon. *Acta Tropica*, 129, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2013.09.013>
- Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C., & Mace, G. M. (2011). Beyond predictions: Biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332(6025), 53–58. <https://doi.org/10.1126/science.1200303>
- de Meyer, A. P. R. R., Ortega-Andrade, H. M., & Moulatlet, G. M. (2022). Assessing the conservation of eastern Ecuadorian cloud forests in climate change scenarios. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 20(2), 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2022.01.001>
- Diggle, P. (1985). A kernel method for smoothing point process data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 34(2), 138–147. <https://doi.org/10.2307/2347366>
- Gómez, J. J., & Cassini, M. H. (2015). Environmental predictors of habitat suitability and biogeographical range of Franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*). *Global Ecology and Conservation*, 3, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.11.007>
- Gonçalves, F., Sales, L. P., Galetti, M., & Pires, M. M. (2021). Combined impacts of climate and land use change and the future restructuring of Neotropical biodiversity. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(4), 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.07.005>
- Grattarola, F., Tschernosterova, K., & Keil, P. (2024). A continental-wide decline of occupancy and diversity in five Neotropical carnivores. *Global Ecology and Conservation*, 55, e03226. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03226>
- Gutiérrez, J. D., Altamiranda-Saavedra, M., Ávila-Jiménez, J., Martins, I. A., & Virginio, F. (2024). Effect of environmental variables on the incidence of visceral leishmaniasis in Brazil and Colombia. *Acta Tropica*, 252, 107131. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2024.107131>
- Hannah, L., Midgley, G., Andelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., Pearson, R., & Williams, P. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(3), 131–138. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[131:PANIAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[131:PANIAC]2.0.CO;2)
- Hartl, T., Srivastava, V., Prager, S., & Wist, T. (2024). Evaluating climate change scenarios on global pea aphid habitat suitability using species distribution models. *Climate Change Ecology*, 7, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2024.100084>
- Jones, E. M., & Harris, N. C. (2025). Forecasting habitat suitability across large carnivore ranges with climate and land use change. *Ecological Indicators*, 177, 113815. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113815>
- Lawler, J. J., Shafer, S. L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E. P., Blaustein, A. R., & Bartlein, P. J. (2009). Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 90(3), 588–597. <https://doi.org/10.1890/08-0823.1>
- Lima, A. A. de, Ribeiro, M. C., Grelle, C. E. de V., & Pinto, M. P. (2019). Impacts of climate changes on diversity patterns of Atlantic Forest primates. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(2), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.04.004>
- Malecha, A., Manes, S., & Vale, M. M. (2025). Climate change and biodiversity in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 23, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.03.004>
- Martínez, P. A., Teixeira, I. B. da F., Siqueira-Silva, T., Silva, F. F. B. da, Lima, L. A. G., Chaves-Silveira, J., Ollalla-Tárraga, M. Á., Gutiérrez, J. M., & Amado, T. F. (2024). Climate change-related distributional range shifts of venomous snakes: A predictive modelling study of effects on public health and biodiversity. *The Lancet Planetary Health*, 8(3), e163–e171. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00005-6)
- Miranda, L. de S., Awade, M., Jaffé, R., Costa, W. F., Trevelin, L. C., Borges, R. C., Brito, R. M. de, Tambosi, L. R., & Giannini, T. C. (2021). Combining connectivity and species distribution modeling to define conservation and restoration priorities for multiple species: A case study in the eastern Amazon. *Biological Conservation*, 257, 109148. <https://doi.org/10.1016/j.bioccon.2021.109148>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group. (2009). PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

- Pena, S. A., da Silva, C. R., Rodrigues Alexandre, R. J., & Vieira, T. B. (2026). Conservation gaps and the essential role of Indigenous Lands in protecting small non-volant mammals in Brazilian Amazonian. *Journal for Nature Conservation*, 91, 127242. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2026.127242>
- Pérez Chaves, P., Ruokolainen, K., Van doninck, J., & Tuomisto, H. (2022). Impact of spatial configuration of training data on the performance of Amazonian tree species distribution models. *Forest Ecology and Management*, 504, 119838. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119838>
- Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18(1), 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.01.002>
- Quintero, S., Abrahams, M. I., Beirne, C., Blake, J., Carvalho Jr., E., Costa, H. C. M., de Paula, M. J., Endo, W., Haugaasen, T., Lima, M. G. M., Michalski, F., Mosquera, D., Norris, D., Oliveira, T., Paemelaere, E., Peres, C. A., Pezzuti, J., Romero, S., Santos, F., ... Tan, C. K. W. (2023). Effects of human-induced habitat changes on site-use patterns in large Amazonian forest mammals. *Biological Conservation*, 279, 109904. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109904>
- Rojas-Briceño, N. B., Cajas-Bravo, V., Pasquel-Cajas, A., Guzman, B. K., Silva-López, J. O., Veneros, J., & García, L. (2025). Effectiveness of protected areas in containing the loss of Peruvian Amazonian forests. *Trees, Forests and People*, 19, 100778. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100778>
- Silverman, B. W. (1986). Density estimation for statistics and data analysis. Chapman & Hall. <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Silverman/paper.pdf>
- Souza, A. C. de, & Prevedello, J. A. (2021). Climate change and invasion. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(2), 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.02.003>
- Swanson, A. C., Kaplan, D., Toh, K.-B., Marques, E. E., & Bohlman, S. A. (2021). Changes in floodplain hydrology following serial damming of the Tocantins River in the eastern Amazon. *Science of the Total Environment*, 800, 149494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149494>
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571–573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- Veneros, J., Hansen, A. J., Jantz, P., Noguera-Urbano, E., & García, L. (2025). Forecasting the potential habitat for the spectacled bear and the Páramo ecoregion for current conditions and climate change scenarios in 2050: A contribution to SDG 15 in Perú, Ecuador and Colombia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100639>
- Wu, J. (2020). Detecting species distribution changes. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 18(2), 110–126. <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.04.016>
- Xu, Y., Zhou, J., Liu, T., Liu, P., Wu, Y., Lai, Z., Gu, J., & Chen, X. (2022). Assessing the risk of spread of Zika virus under current and future climate scenarios. *Bio-safety and Health*, 4(3), 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.bsheat.2022.03.012>