

Conservación

Modelo de nicho ecológico de *Cedrelinga cateniformis* en la Amazonía del Ecuador

Ecological niche modeling of Cedrelinga cateniformis in the Ecuadorian Amazon

Daniel Adrian Vistin-Guamantaqui ^{a,*}, Carmen Elena Mantilla-Cabrera ^b,
Paul Marcelo Tacle-Humanante ^c y Sulaya Betsabe Bayancela-Delgado ^c

^a Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Av. Pedro Vicente Maldonado s/n y Av. 11 de Noviembre, Riobamba, Ecuador

^b Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Agronomía, Grupo de Investigación Seguridad Informática y Telemática, Av. Pedro Vicente Maldonado s/n y Av. 11 de Noviembre, Riobamba, Ecuador

^c Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Grupo de Investigación de Manejo y Aprovechamiento de los Recursos Renovables, Av. Pedro Vicente Maldonado s/n y Av. 11 de Noviembre, Riobamba, Ecuador

*Autor para correspondencia: adrianvistin@yahoo.com (D.A. Vistin-Guamantaqui)

Recibido: 12 noviembre 2025; aceptado: 10 abril 2026

Resumen

La Amazonía ecuatoriana es uno de los ecosistemas más biodiversos del planeta, enfrenta presiones derivadas de la deforestación, expansión agrícola, minería y fragmentación del paisaje, que amenazan su resiliencia ecológica. *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke destaca por su rápido crecimiento, adaptabilidad a suelos ácidos y capacidad de mejorar la fertilidad, constituyendo una alternativa para la restauración mediante sistemas agroforestales. El objetivo de este estudio fue modelar el nicho ecológico con el algoritmo MaxEnt en las 6 provincias amazónicas del Ecuador para identificar áreas de distribución potencial y apoyar la planificación de estrategias de conservación y producción sostenible. Se utilizaron 19 variables bioclimáticas tomadas de WorldClim más la elevación, validando 136 registros de presencia. Tras eliminar colinealidades ($r > 0.70$), se seleccionaron 10 variables; la validación (75/25%) se realizó con AUC y TSS. El modelo alcanzó un AUC de 0.992. La variable más influyente fue la precipitación del mes más seco (BIO14; 71.9%), identificándose 13,288 km² de idoneidad óptima (11.07% del territorio), principalmente en Sucumbíos y Orellana.

Palabras clave: Distribución potencial; Variables bioclimáticas; Idoneidad ambiental; Sistemas agroforestales

Abstract

The Ecuadorian Amazon, one of the most biodiverse ecosystems on the planet, faces increasing pressures from deforestation, agricultural expansion, mining, and landscape fragmentation, threatening its ecological resilience. *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke is notable for its rapid growth, adaptability to acidic soils, and capacity to improve soil fertility, making it a promising species for ecological restoration through agroforestry systems. This study aimed to model its ecological niche using the MaxEnt algorithm across the 6 Amazonian provinces of Ecuador to identify potential distribution areas and support conservation and sustainable production strategies. Nineteen bioclimatic variables from WorldClim and elevation data were analyzed using 136 validated presence records. After removing collinearity ($r > 0.70$), 10 variables were selected, and the model was validated (75/25%) using AUC and TSS. The model showed excellent performance (AUC = 0.992). The most influential variable was precipitation of the driest month (BIO14; 71.9%). Approximately 13,288 km² (11.07% of the territory) showed optimal suitability, mainly in Sucumbios and Orellana, highlighting key areas for restoration and conservation planning in the Ecuadorian Amazon.

Keywords: Potential distribution; Bioclimatic variables; Environmental suitability; Agroforestry systems

Introducción

La Amazonia del Ecuador abarca aproximadamente 2% de la cuenca del Amazonas, ésta se extiende por 6 provincias en el Ecuador (Sucumbios, Napo, Orellana, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe). Este espacio es reconocido como una de las regiones más biodiversas del planeta, donde se establecen vastos bosques húmedos tropicales y una extraordinaria variedad de flora y fauna (Arias-Gutiérrez et al., 2016). Estos territorios han sido ocupados por indígenas de múltiples nacionalidades como son los Waoranis, Kichwa y Shuar, quienes por décadas han mantenido una relación ancestral y de dependencia con este ecosistema, aprendiendo a convivir en equilibrio con la naturaleza (Buitrón-Cañadas y López-Sandoval, 2019). Este ecosistema biodiverso genera un sinnúmero de servicios ambientales, principalmente el de proveer alimentos, medicinas, agua dulce, materiales de construcción para las viviendas, regulación climática y hábitats vitales para que se desarrollen múltiples organismos, es fuente de servicios culturales ligados a la cosmovisión y prácticas tradicionales ancestrales (Álvarez et al., 2024).

Alarcón-Aguirre et al. (2021) señalan que el bosque húmedo tropical del Ecuador es reconocido como un hotspot de biodiversidad a nivel mundial; sin embargo, actualmente enfrenta un alarmante proceso de deterioro debido a múltiples presiones de origen antrópico que comprometen su funcionalidad ecológica. Entre estas, la deforestación constituye el principal factor de impacto, impulsada principalmente por la apertura de áreas destinadas a la ganadería y al establecimiento de cultivos comerciales como palma africana (*Elaeis guineensis*), arroz (*Oryza sativa*), malanga (*Colocasia esculenta*) y maíz (*Zea mays*). Entre 2001 y 2020 se reportó la pérdida

de más de 623,000 ha, concentradas principalmente en las provincias de Morona Santiago y Sucumbios. Por otro lado, la actividad minera se ha consolidado como un motor adicional de degradación de este ecosistema, que provoca la destrucción de extensas áreas y afecta severamente la calidad del suelo y de los recursos hídricos, especialmente por la contaminación asociada al uso de mercurio y cianuro (Anto-Rubio, 2020).

De la misma manera, la fragmentación es un fenómeno que ocasiona una reducción de la viabilidad genética de innumerables especies, lo que ocasiona un impacto irreversible en los recursos genéticos, así como alteraciones en los ciclos ecológicos (Vargas-Chaves, 2024). Este conjunto de presiones se agrava debido a la falta de planes, programas y proyectos que viabilicen su restauración y resiliencia ecológica con la urgencia que requiere esta crisis, si bien en el Ecuador existe la iniciativa como es el Plan Nacional de Restauración del Paisaje 2021-2030 (Programa Nacional de Reforestación, 2019) y proyectos piloto que exploran un conjunto de métodos y técnicas en el ámbito de las micorrizas y su utilidad en la restauración (Arias-Gutiérrez et al., 2016), la escala y la velocidad de implementación son a menudo superadas por el avance de las actividades extractivas, entonces nace la necesidad de fortalecer la gobernanza a nivel local regional y nacional acompañada de la implementación de políticas públicas que se comprometan en desarrollar diferentes mecanismos factibles para la restauración ecológica activa y pasiva en sus territorios, principalmente en las zonas más afectadas (Conrado-Da Cruz et al., 2021).

Las comunidades oriundas de estos sitios, durante muchos años, practican el uso tradicional de la tierra conocido como chakra. En la provincia de Napo, esta práctica es promovida principalmente por las comunidades indígenas Kichwa y Kijus y ha alcanzado un

reconocimiento a nivel mundial debido a su importancia cultural, productiva y ambiental (Álvarez et al., 2024). Tal es su relevancia, que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) la ha reconocido como Patrimonio Agrícola Mundial. Este sistema productivo cubre una extensión aproximada de 162,082 ha y se caracteriza por la combinación de múltiples especies, principalmente cultivos de ciclo corto, como yuca (*Manihot esculenta*), plátano (*Musa spp.*), chonta (*Bactris gasipaes*), cacao (*Theobroma cacao*) y café (*Coffea arabica*), así como otras especies frutales y medicinales, lo que contribuye a la conservación de la biodiversidad y a la sostenibilidad del paisaje amazónico (Heredia-R et al., 2020).

Si bien no existe una cifra exacta en el Ecuador sobre la implementación de estos sistemas, de manera general fuentes gubernamentales manifiestan que son relativamente muy escasas debido a la presión de los monocultivos y modelos agrícolas comerciales, baja rentabilidad monetaria, limitaciones de mercado y cadenas de comercialización, falta de políticas públicas consistentes y apoyos gubernamentales. También otros factores sociológicos como es la migración, el cambio generacional y pérdida de conocimientos influyen en la presión sobre las tierras y conflictos por el uso del suelo (Uribe-Taborda et al., 2020).

Hernández-Núñez et al. (2021) manifiestan que los sistemas agroforestales (SAF) representan un sistema de uso integrado del suelo, se considera que están profundamente arraigados y científicamente validados como una alternativa viable en contra de los monocultivos, que son los que en su mayoría impulsan la deforestación y la degradación de la superficie arable (De Santana et al., 2023). Estos sistemas se implementan en diversas tipologías donde destacan los sistemas agrosilvícolas, los cuales integran cultivos con árboles nativos y los sistemas silvopastoriles que son una asociación de pastos y especies arbóreas (Kay et al., 2019). Un ejemplo es con *C. cateniformis* (Ducke) (Fabaceae), especie de árbol que se caracteriza por su alta adaptabilidad a suelos ácidos, arcillosos y de baja fertilidad, lo que la convierte en una especie especialmente relevante para programas de rehabilitación forestal, recuperación de suelos degradados y la implementación de sistemas agroforestales (Scarcelli et al., 2025). Asimismo, su madera presenta una densidad media y buena durabilidad, características que le confieren múltiples usos, entre ellos la carpintería, la construcción y la fabricación de muebles de alto valor económico (Haag et al., 2020).

Dentro del aspecto ecológico, esta especie contribuye a la captura de carbono, de igual manera mejora la fertilidad del suelo especialmente cuando se la implementa

en sistemas silvopastoriles y agroforestales, ya que incrementa la macrofauna y la actividad biológica del suelo (Díaz-Pablo et al., 2024). Por otro lado, *C. cateniformis* presenta una ventaja en aspectos de propagación, ya que sus semillas poseen buena viabilidad facilitando su uso en programas de restauración ecológica debido a que tiene un crecimiento rápido y alta resistencia a plagas como el barrenador de brotes (*Hypsipyla grandella*) ya que se ha identificado que interactúa biológicamente con bacterias nitrificantes (García-Quintana et al., 2023). Estudios recientes y de campo han destacado que la especie enfrenta amenazas significativas en el Ecuador debido a la deforestación, fragmentación y la expansión de la frontera agrícola, motivo por el cual en los últimos años sus poblaciones se han visto disminuidas de manera alarmante, con efectos negativos en la provisión de los innumerables beneficios ecológicos y socioeconómicos asociados a esta especie. Con base en esta importancia nace la iniciativa de proponer a *C. cateniformis* como un eslabón clave para la gestión de la biodiversidad y resiliencia ecológica en el ecosistema tropical del Ecuador (Vistin-Guamantaqui et al., 2025).

Los sistemas de información geográfica (SIG) se han consolidado como herramientas fundamentales para la gestión de la biodiversidad, especialmente en el modelamiento de nichos ecológicos de especies arbóreas (Pauletto et al., 2025). A través de la integración de variables ambientales, climáticas y edáficas, los SIG permiten predecir la distribución potencial de las especies bajo condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático. Esto facilita la identificación de áreas prioritarias para la conservación y restauración de los ecosistemas (Franklin, 2023).

Diversos estudios han demostrado que el cambio climático y la deforestación reducen significativamente el hábitat disponible para numerosas especies, lo que evidencia la necesidad urgente de implementar políticas de conservación y restauración *in situ* y *ex situ*. En este contexto, Vieira-Capucho et al. (2025) señalan que los modelos de nicho ecológico constituyen una herramienta clave, ya que permiten identificar áreas con alta idoneidad climática y anticipar los efectos del cambio climático. De esta manera, estos modelos se convierten en una estrategia de manejo adaptativo que facilita la planificación y ejecución de programas y proyectos de conservación, revegetación, forestación y sistemas agroforestales. Asimismo, Morais-Sousa et al. (2025) destacan que este tipo de modelamiento también favorece la conectividad entre hábitats y fortalece la resiliencia de los ecosistemas forestales, permitiendo priorizar acciones de manejo y conservación orientadas a reducir la vulnerabilidad de las especies. En conjunto, estos enfoques contribuyen

a la preservación de la biodiversidad, la cual resulta fundamental para mantener los servicios ecosistémicos esenciales para la región y el bienestar de las comunidades locales (Calvas-Serrano et al., 2024).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo de nicho ecológico para *C. cateniformis* en las 6 provincias amazónicas del Ecuador mediante la utilización del algoritmo de máxima entropía, con el fin de identificar áreas potenciales de distribución que permitan proponer sitios adecuados para la gestión de sistemas agroforestales sostenibles y contribuyan a la conservación de la especie y a incrementar la resiliencia ecológica de los ecosistemas amazónicos del Ecuador.

Materiales y métodos

La zona de estudio abarca 6 provincias que conforman la Amazonía ecuatoriana, la cual se extiende desde la Cordillera Oriental de los Andes, al este hasta la frontera con Perú y el sur de Colombia. Esta región cubre una superficie aproximada de 120,000 km² y constituye una de las zonas más biodiversas y ecológicamente relevantes del país (López et al., 2013). Abarca 6 provincias, de las cuales Pastaza ocupa 29,628.8 km², Morona Santiago 24,029.1 km², Orellana 21,675.4 km², Sucumbios 18,146.5 km², Napo 12,542.5 km² y Zamora Chinchipe 10,565.8 km² (fig. 1) (Vistin-Guamantaquí et al., 2025). La región se divide en 2 zonas altitudinales: la alta Amazonía, con elevaciones superiores a 1,000 m snm, y la llanura Amazónica, con altitudes inferiores a este nivel. Presenta un clima tropical muy húmedo durante todo el año, influenciado por la intensa evapotranspiración de los extensos bosques amazónicos.

Las precipitaciones son constantes a lo largo del año, con un ligero incremento entre marzo y julio y una disminución en los meses de agosto y enero, variaciones asociadas al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (León-Baque et al., 2021). En la región amazónica, la precipitación alcanza valores superiores a 4,500 mm anuales, lo que la convierte en una de las zonas más lluviosas del Ecuador (INAMHI, 2025). Esta elevada pluviosidad se distribuye de manera relativamente uniforme a lo largo del año, contribuyendo al mantenimiento de los ecosistemas húmedos y a la densa cobertura vegetal característica de la zona, en cuanto al régimen térmico, la temperatura promedio anual oscila entre 24 y 25 °C.

Los registros de la presencia de *C. cateniformis* fueron obtenidos mediante una revisión exhaustiva y sistemática de múltiples fuentes de información, que incluyeron colecciones de herbarios digitales, así como bases de datos en línea provenientes de servicios

globales de información sobre diversidad biológica: Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2025), Missouri Botanical Garden (Tropicos, 2025). Se utilizó la plataforma Google Earth como herramienta de apoyo geoespacial para la verificación y validación de los puntos de presencia de *C. cateniformis*. Mediante la inspección visual de las coordenadas y la comparación con coberturas de referencia, se determinó la precisión espacial de cada punto de presencia. Como resultado, se consolidó un total de 136 registros georreferenciados, distribuidos en las 6 provincias que conforman la región amazónica del Ecuador, empleando como sistema de referencia geodésico el World Geodetic System 1984 (WGS 84) (fig. 1).

El modelo de distribución potencial de *C. cateniformis* fue elaborado a partir de variables bioclimáticas con una resolución espacial de 1 km (equivalente a 0.008983° ó 32.34"), obtenidas de la base de datos WorldClim (Hijmans et al., 2025). Este conjunto incluyó 19 variables bioclimáticas (tabla 1), las cuales describen patrones espaciales y temporales de temperatura y precipitación en la región de estudio, factores determinantes en la distribución ecológica de la especie. Con los resultados del modelo, tomando en cuenta la permutación y el porcentaje de contribución, se seleccionaron las variables bioclimáticas (BIOs) para la validación del modelo: (BIO1) temperatura media anual, (BIO2) rango medio diario, (BIO8) temperatura media del trimestre más lluvioso, (BIO9) temperatura media del trimestre más seco, (BIO12) precipitación anual, (BIO14) precipitación del mes más seco, (BIO15) estacionalidad de la precipitación, (BIO17) precipitación del trimestre más seco y (BIO19) precipitación del trimestre más frío. Adicionalmente, se incorporó la elevación, también obtenida de WorldClim, con el fin de representar de manera más precisa los gradientes topográficos asociados a la distribución de la especie.

El desempeño del modelo de nicho ecológico fue evaluado mediante un conjunto de métricas ampliamente utilizadas en estudios de modelación de la distribución de especies. En primer lugar, se empleó el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés), la cual permite cuantificar la capacidad del modelo para discriminar entre áreas con condiciones ambientales favorables y no favorables sin depender de un umbral específico. De manera complementaria, se realizó una validación cuantitativa basada en la construcción de una matriz de confusión, utilizando 136 registros de presencia de la especie, los cuales fueron contrastados con las predicciones generadas por el modelo en la Amazonía ecuatoriana (Beeman et al., 2021).

La salida continua del modelo, expresada como un gradiente de idoneidad ambiental, fue binarizada en

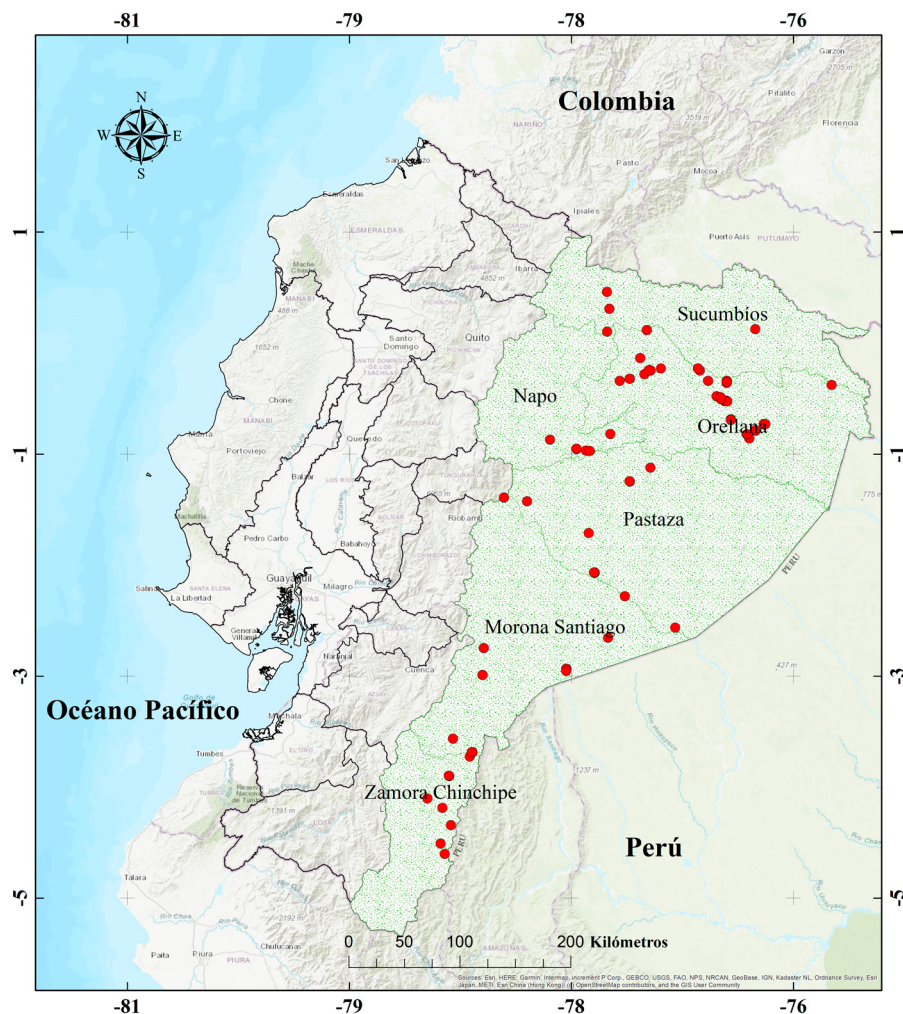


Figura 1. Mapa de ubicación de la Amazonia ecuatoriana. La figura muestra la distribución geográfica de los registros de presencia de *Cedrelinga cateniformis*, mientras que el área sombreada en color verde corresponde a las 6 provincias amazónicas del Ecuador.

categorías de presencia y ausencia mediante la aplicación de un umbral de corte seleccionado en función del equilibrio entre sensibilidad y especificidad. A partir de la matriz de confusión resultante, se calcularon la sensibilidad —que expresa la capacidad del modelo para identificar correctamente las presencias reales— y la especificidad, que refleja su habilidad para discriminar las ausencias. Con base en estos parámetros, se estimaron la estadística de habilidad verdadera (TSS) y el índice de Kappa, métricas que permiten evaluar la concordancia entre las observaciones y las predicciones, descontando el efecto del azar. En conjunto, estas métricas posibilitaron una evaluación integral de la capacidad predictiva y la fiabilidad espacial del modelo de nicho ecológico desarrollado (Cruz-Román et al., 2023).

Se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) utilizando las variables bioclimáticas (BIOS) con el propósito de identificar aquellas que más contribuyen a la presencia de *C. cateniformis* en la región amazónica del Ecuador. Este método multivariante permitió reducir la dimensionalidad de las variables y sintetizar la variabilidad ambiental en ejes ortogonales que representan los principales gradientes climáticos del área de estudio. Para la construcción del espacio ambiental se consideraron los 2 primeros componentes principales, los cuales explicaron la mayor proporción de la varianza total de los datos. Posteriormente, este espacio fue dividido en una cuadrícula de 100 celdas, con el fin de facilitar el análisis comparativo entre las condiciones ambientales. Los puntos de presencia fueron transformados en

Tabla 1

Caracterización de las 19 variables bioclimáticas incluidas en el modelo predictivo del nicho ecológico de *C. cateniformis*.

Variables	Descripción	Unidad
BIO 1	Temperatura media anual	°C x 10
BIO 2	Rango de temperaturas diurnas	°C x 10
BIO 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (* 100)	%
BIO 4	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar * 100)	°C x 100
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C x 10
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío	°C x 10
BIO 7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	°C x 10
BIO 8	Temperatura media del trimestre más lluvioso	°C x 10
BIO 9	Temperatura media del trimestre más seco	°C x 10
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C x 10
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío	°C x 10
BIO 12	Precipitación anual	mm
BIO 13	Precipitación del mes más lluvioso	mm
BIO 14	Precipitación del mes más seco	mm
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación)	%
BIO 16	Precipitación del trimestre más lluvioso	mm
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco	mm
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío	mm
ELEV	Elevación	m snm

densidades de ocurrencia dentro del espacio ambiental definido por el PCA. A partir de estas densidades, se calculó el índice de ocupación, una medida que permite comparar de manera objetiva la distribución de la especie entre distintas regiones o condiciones ambientales, incluso cuando la disponibilidad de hábitats no es homogénea (Broennimann et al., 2014).

El índice de ocupación obtenido se representó en el espacio ambiental bidimensional para delimitar de manera precisa el nicho climático potencial de la especie. Posteriormente, se realizó un análisis de solapamiento y equivalencia de nicho, con el propósito de evaluar el grado de similitud y estabilidad. El procesamiento de las imágenes ráster se efectuó mediante el software ArcMap 10.2, con el fin de evaluar si las poblaciones de *C. cateniformis* ocupan condiciones ambientales similares a lo largo de su distribución geográfica o si existen diferencias ecológicas asociadas a gradientes climáticos o altitudinales. Este análisis permitió detectar zonas de convergencia y divergencia ambiental, proporcionando una comprensión más detallada de la estructura y

extensión del nicho climático de la especie dentro del territorio amazónico ecuatoriano, contribuyendo así a identificar los factores ambientales que determinan su distribución potencial (Buendía-Espinoza et al., 2020).

Se realizó el posprocesamiento de los rásteres correspondientes al modelo de distribución potencial de *C. cateniformis*, los cuales fueron proyectados geográficamente en el software ArcMap 10.2 para su análisis espacial, visualización cartográfica e interpretación ecológica. El modelo generado produjo una superficie continua de probabilidad de presencia, cuyos valores se clasificaron en 5 categorías de idoneidad ambiental. Las áreas con valores inferiores al umbral se consideraron como ausencia potencial, mientras que los intervalos 0-0.25, 0.25-0.50, 0.50-0.75 y 0.75-1.00 fueron definidos como baja, media, alta y óptima probabilidad de presencia, respectivamente. Esta clasificación permitió una mejor discriminación de las zonas de mayor adecuación ambiental para la especie.

Los modelos finales se obtuvieron mediante una salida logística en el algoritmo MaxEnt, utilizando como criterios

de desempeño la presencia mínima de entrenamiento y la maximización de la suma de sensibilidad y especificidad, lo que permitió establecer umbrales binarios de presencia-ausencia con alta confiabilidad (Scrivanti y Anton, 2020). Cada umbral fue estimado a partir del promedio de 100 iteraciones independientes a fin de reducir la variabilidad y garantizar la estabilidad del modelo. Finalmente, se identificaron y delimitaron áreas con alta idoneidad ambiental para el crecimiento y establecimiento de *C. cateniformis* en las 6 provincias de la región amazónica del Ecuador.

Resultados

Se obtuvo un valor de $AUC = 0.992$ para el modelado de *C. cateniformis*. Este valor corresponde a una alta capacidad de predicción y fiabilidad del modelo aplicado, lo que da confianza para reconocer la alta correspondencia entre las condiciones climáticas observadas y las áreas potenciales de distribución de la especie predicha por el modelo. La sumatoria de todas las aportaciones al modelo fue de 95.4%, donde la precipitación del mes más seco aporta 71.9%, seguido de la temperatura media del trimestre más seco (7.1%), la estacionalidad en la precipitación (3.4%), la precipitación del trimestre más frío (3%), la temperatura media anual (2.3%), la precipitación anual (1.8%), el rango de temperatura diurna (1.7%), la elevación (1.7%), la temperatura media del trimestre más lluvioso (1.5%) y, finalmente, la precipitación del trimestre más seco (1%).

Para la validación del modelo se utilizaron 136 registros independientes, conformados por 68 datos de presencia y 68 pseudoausencias generadas aleatoriamente dentro del área de estudio, evitando las zonas con registros confirmados de la especie. La matriz de confusión evidenció que el modelo clasificó correctamente 127 casos, de los cuales 64 correspondieron a presencias correctamente predichas (verdaderos positivos) y 63 a pseudoausencias correctamente identificadas (verdaderos negativos). Asimismo, se registraron 5 falsos positivos, donde el modelo predijo presencia en sitios clasificados como pseudoausencias y 4 falsos negativos, correspondientes a presencias observadas que no fueron detectadas por el modelo. Estos resultados evidenciaron una alta concordancia entre las predicciones y los datos de validación independientes, con una baja proporción de errores de comisión y omisión, lo que indicó un adecuado desempeño predictivo del modelo.

A partir de la matriz de confusión, se calculó el índice de Kappa y el estadístico de habilidad verdadera (TSS) para evaluar la precisión y la concordancia del modelo predictivo. El modelo alcanzó una sensibilidad

de 0.94, evidenciando una alta capacidad para identificar correctamente las presencias reales de la especie y una especificidad de 0.93, lo que refleja una adecuada discriminación de las áreas no favorables. La combinación de estos parámetros derivó en un valor de TSS de 0.87, considerado indicativo de un desempeño óptimo y robusto, independiente de la prevalencia de la especie. De manera concordante, el índice de Kappa registró un valor de 0.87, lo que señala una alta coincidencia entre las observaciones y las predicciones del modelo, descontando el efecto del azar. La identificación de áreas con condiciones ambientales favorables para *C. cateniformis* se distribuyó principalmente en zonas con características ambientales específicas definidas por el modelo (fig. 2), lo que permitió delimitar espacialmente regiones con mayor idoneidad ecológica para la especie.

El PCA mostró que la precipitación del mes más seco (BIO14), explicó 71.90% de la contribución total al ajuste del modelo, constituyéndose como el predictor climático de mayor peso en la distribución potencial de *C. cateniformis* en la Amazonía ecuatoriana. Este resultado indica que la presencia de la especie se asocia principalmente a valores mínimos de precipitación mensual, mientras que áreas con déficits hídricos más marcados fueron clasificadas fuera del rango potencial de ocurrencia. La respuesta del modelo muestra una alta sensibilidad a las condiciones de precipitación mínima estacional y muestra que los valores bajos de BIO14 limitan la idoneidad ambiental para la especie. En consecuencia, el régimen hídrico mensual durante el periodo más seco se identificó como el factor climático dominante que condiciona la distribución espacial modelada de *C. cateniformis*.

La disponibilidad hídrica durante los periodos de déficit pluviométrico constituye el factor más restrictivo en la distribución potencial y sugiere una alta sensibilidad de la especie a las condiciones de estrés hídrico estacional. En menor proporción, la temperatura media del trimestre más seco (BIO 9) aportó 7.1%, mientras que la estacionalidad de la precipitación (BIO 15) y la precipitación del trimestre más frío (BIO 19) registraron contribuciones de 3.4 y 3%, respectivamente (tabla 2). Lo anterior sugiere que la variabilidad climática asociada a la disponibilidad de humedad y las condiciones térmicas durante los periodos críticos desempeñó un papel determinante en la configuración del nicho ecológico potencial.

Las variables restantes presentaron contribuciones individuales menores a 2.5%, incluyendo la temperatura media anual (BIO 1) con 2.3%, la precipitación anual (BIO 12) con 1.8%, el rango de temperaturas diurnas (BIO 2) y la elevación con 1.7% cada una, así como la temperatura media del trimestre más lluvioso (BIO 8) con 1.5% y la precipitación del trimestre más seco (BIO 17) con 1%.

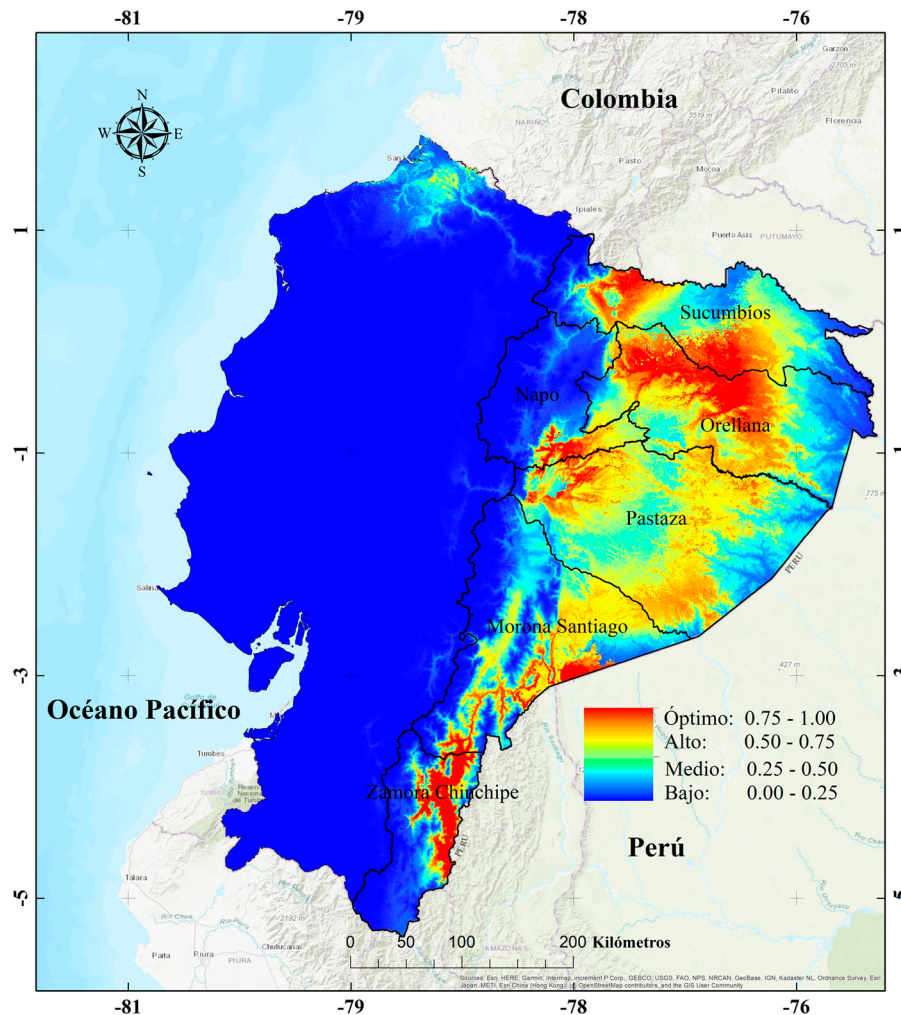


Figura 2. Distribución espacial modelada mediante MaxEnt para *Cedrelinga cateniformis* en Ecuador. El mapa muestra diferentes niveles de idoneidad del hábitat: las zonas en rojo representan áreas óptimas, las de naranja indican alta idoneidad, las de amarillo corresponden a idoneidad media, las de azul reflejan baja idoneidad y las de verde señalan áreas prioritarias para la gestión de la biodiversidad y la resiliencia ecológica.

Aunque estas variables mostraron una influencia marginal, su incorporación permitió refinar la delimitación ambiental del modelo, aportando información complementaria sobre la variabilidad térmica y altitudinal del área de estudio. De manera agregada, las variables relacionadas con la precipitación acumularon más de 80% de la contribución total, lo que sugiere una fuerte dependencia de *C. cateniformis* de los gradientes de humedad característicos de la Amazonía ecuatoriana, destacando la importancia de los regímenes pluviométricos estacionales como principales moduladores de la distribución potencial de la especie.

Mediante el geoprocesamiento del SDM generado en el software MaxEnt, se determinó el potencial de distribución

de *C. cateniformis*, que incluyó sitios definidos en las 6 provincias de la Amazonia ecuatoriana principalmente en la parte norte y sur (fig. 2). Específicamente las áreas óptimas para el desarrollo de esta especie se localizan en la provincia de Sucumbios, al oeste del cantón Lago Agrio, norte y centro del cantón Cascales, al este del cantón Gonzalo Pizarro, al este del cantón Cuyabeno y finalmente en 70% del territorio perteneciente al cantón Shushufindi, mientras que en la provincia de Orellana la idoneidad óptima está al oeste del cantón Aguarico, este y oeste del cantón Puerto Francisco de Orellana, en 75% del territorio del cantón La Joya de los Sachas y al noreste del catón Loreto.

Tabla 2

Importancia relativa de las variables bioclimáticas en la definición del nicho ecológico y la proyección espacial de la distribución potencial de *C. cateniformis* basada en 99 réplicas del modelo.

Código	Variables ambientales	Contribución (%)	Permutación (%)
BIO14	Precipitación del mes más seco	71.90	0.00
BIO 9	Temperatura media del trimestre más seco	7.10	2.90
BIO 15	Estacionalidad en la precipitación	3.40	34.90
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío	3.00	4.40
BIO 1	Temperatura media anual	2.30	4.50
BIO 12	Precipitación anual	1.80	0.10
BIO 2	Rango de temperaturas diurnas	1.70	0.80
Elevación	Elevación	1.70	9.90
BIO 8	Temperatura media del trimestre más lluvioso	1.50	8.00
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco	1.00	2.30

También hay condiciones óptimas en la provincia de Napo, al sureste del cantón Archidona, centro del cantón Tena y este del cantón Carlos Julio Arosemena Tola. De igual manera, en la provincia de Pastaza se registra una pequeña extensión al oeste del cantón Aranjú, mientras que en el cantón Santa Clara hay una pequeña extensión al oeste y en el cantón Pastaza. En la provincia de Morona Santiago las áreas con mayor idoneidad se encuentran al sur del cantón Taisha, gran parte del cantón Tiwintza y al sur del cantón Gualaquiza. Mientras que en la provincia de Zamora Chinchipe en gran parte del cantón Panguí, centro del cantón Yantzaza, oeste del cantón Paquisha, 80% del cantón Centinela del Condor, al este del cantón Zamora y, finalmente, al norte y este del cantón Nangaritza.

El área óptima del potencial de distribución de *C. cateniformis* fue de 13,288 km² (fig. 2). Esta superficie corresponde a la categoría de 0.75-1 para el desarrollo de la especie. En la Amazonía norte, conformada por las provincias de Sucumbios y Orellana se concentra la mayor extensión de hábitat potencial, con 8,458 km²; en la Amazonía central, que comprende Napo y Pastaza, se identificaron 1,544 km²; y finalmente, en la Amazonía sur, correspondiente a Morona Santiago y Zamora Chinchipe, se estimaron 3,286 km². Considerando que la superficie total del ecosistema tropical en el Ecuador es de aproximadamente 120,000 km², el área determinada por el modelo para *C. cateniformis* representa alrededor de 11.07% del territorio nacional con condiciones favorables para su supervivencia y producción (tabla 3), lo que evidencia un potencial significativo para su manejo sostenible en estas zonas.

El modelo también identificó zonas con idoneidad moderada a alta en las provincias de Zamora Chinchipe y Morona Santiago, donde los patrones climáticos presentan una menor variabilidad anual y diaria. Estas áreas se caracterizan por una distribución más homogénea de la precipitación y una menor amplitud térmica diaria y estacional, lo que se refleja en la estabilidad espacial de la idoneidad predicha (fig. 3). Hay una diferenciación regional clara en las áreas con condiciones apropiadas para la especie dentro de la Amazonía ecuatoriana. Al superponer la distribución potencial obtenida en el modelo con las isotermas e isobaras presentadas en la figura 3, se observó que los sitios con mayor idoneidad se concentraron principalmente en la Amazonía norte y, de manera más marcada, en la Amazonía sur. Estos patrones espaciales coincidieron con las condiciones climáticas reportadas en los informes meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2025), lo que permitió identificar regiones con mayor favorabilidad ambiental para *C. cateniformis*.

Los patrones climáticos en las provincias de Zamora Chinchipe y Morona Santiago muestran una mayor estabilidad tanto en el invierno como en el verano, así como en el día y la noche a lo largo del año; esta estabilidad se debe a la influencia de la cordillera Oriental que actúa como barrera orográfica que genera microclimas húmedos y regula la variabilidad térmica y pluviométrica. La topografía montañosa y la presencia de vastas áreas de bosques favorecen una distribución homogénea de la precipitación durante el año, con ciclos estacionales y diurnos menos marcados, lo que se traduce en una menor amplitud térmica diaria y estacional (fig. 3).

Tabla 3

Extensión territorial de las áreas óptimas modeladas para *C. cateniformis* en las 6 provincias de la Amazonia ecuatoriana.

Ubicación	Provincia	Cantón	Km ²	(%)
Amazonia Norte	Sucumbíos	Lago Agrio	8,458	63.65
		Cascales		
		Gonzalo Pizarro		
		Cuyabeno		
		Shushufindi		
	Orellana	Aguarico		
		Puerto Francisco de Orellana		
		La Joya de los Sachas		
		Loreto		
Amazonia Centro	Napo	Archidona	1,544	11.62
		Tena		
		Carlos Julio Arosemena Tola		
	Pastaza	Arajuno		
		Santa Clara		
		Pastaza		
Amazonia Sur	Morona Santiago	Taisha	3,286	24.73
		Tiwintza		
		Gualaquiza		
	Zamora Chinchipe	Pangui		
		Yantzaza		
		Paquisha		
		Centinela del Condor		
		Zamora		
		Nangaritza		

Las mayores probabilidades de idoneidad ambiental para *C. cateniformis* se asocian a rangos de precipitación entre 3,000 y 6,000 mm y a temperaturas comprendidas entre 22 y 26 °C. Estos rangos climáticos concentran los valores más altos de idoneidad predicha (fig. 3). En la Amazonía sur del Ecuador, particularmente en sectores influenciados por la cordillera Oriental, el modelo identificó áreas extensas y continuas con idoneidad alta, caracterizadas por condiciones de alta humedad y elevados niveles de precipitación. La distribución espacial de estas áreas muestra una relación consistente con gradientes altitudinales y climáticos propios de la región, evidenciando patrones regionales definidos de idoneidad ambiental para la especie.

Discusión

El modelado de nicho ecológico de *C. cateniformis* con 10 variables bioclimáticas de temperatura y precipitación ha permitido identificar áreas ambientalmente óptimas para el desarrollo y establecimiento de la especie dentro del bosque húmedo tropical, considerando sus requerimientos bioclimáticos. Los rangos de idoneidad ambiental obtenidos para *C. cateniformis* en la Amazonía ecuatoriana muestran coincidencias y diferencias con lo reportado por Rojas-Briceño et al. (2020) quienes registraron temperaturas entre 23 y 27 °C y precipitaciones de 1,800 a 2,440 mm. En este estudio, las mayores probabilidades de idoneidad se asociaron a temperaturas similares (22-26 °C), pero con

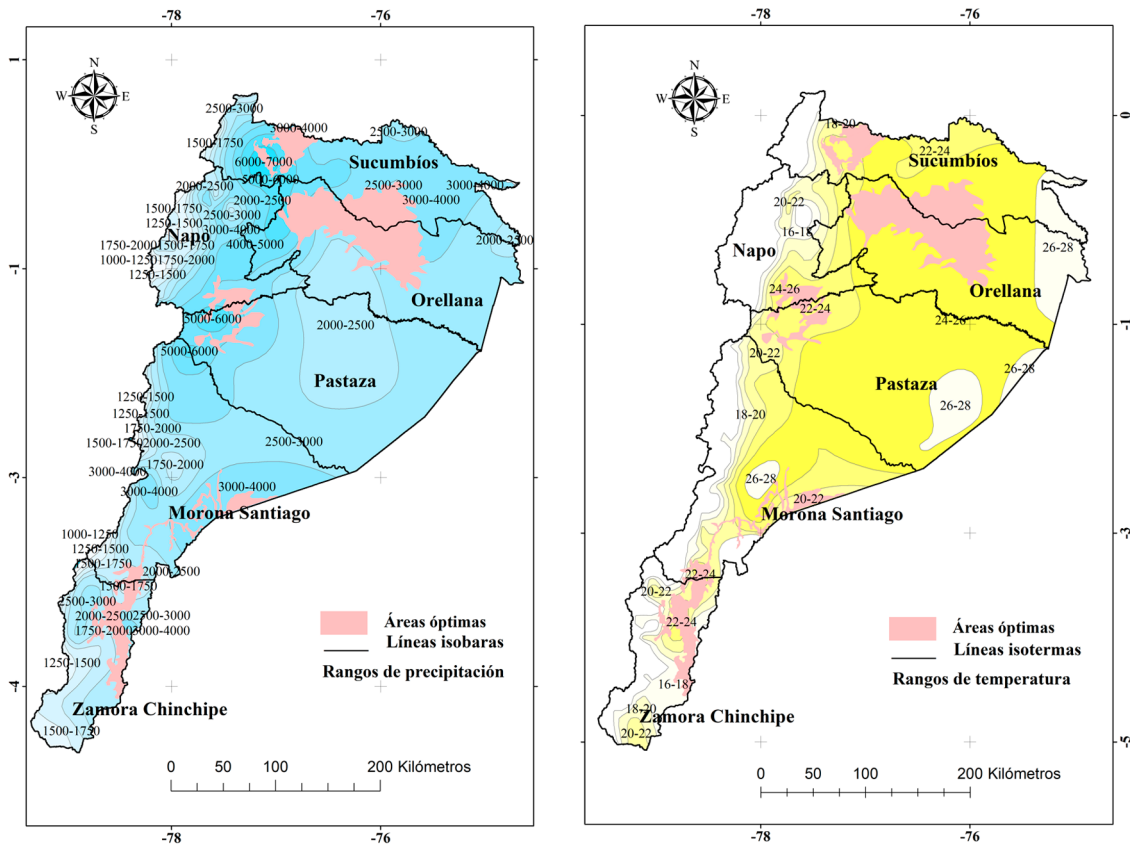


Figura 3. Distribución espacial de las isolíneas de temperatura y precipitación, y áreas bioclimáticamente óptimas para *Cedrelinga cateniformis* en las 6 provincias de la Amazonía ecuatoriana. La figura representa la distribución espacial de las condiciones bioclimáticas relevantes para el modelado de nicho ecológico. El mapa de la izquierda muestra las isolíneas de precipitación anual (mm) y su gradiente espacial, mientras que el mapa de la derecha presenta las isolíneas de temperatura media anual (°C), junto con las zonas que exhiben mayor idoneidad ambiental en color rosa pálido para el establecimiento de sistemas agroforestales con la especie.

precipitaciones más altas (3,000-6,000 mm). La similitud térmica sugiere que la temperatura representa un factor relativamente estable para la especie, mientras que la precipitación evidencia una mayor amplitud ecológica. Estas diferencias podrían estar relacionadas con las condiciones más húmedas características de la Amazonía ecuatoriana. En conjunto, los resultados sugieren que *C. cateniformis* presenta tolerancia a un amplio gradiente de precipitación, favoreciendo su distribución en ambientes altamente húmedos.

En la Amazonía alta del Ecuador, la topografía asociada a la cordillera oriental, frecuentemente referida como flanco oriental andino, modula de manera significativa la dinámica térmica y de humedad a escala local y regional (Arias-Gutiérrez et al., 2016). Las elevaciones montañosas actúan como barreras orográficas que interceptan los flujos de aire húmedo provenientes del

Atlántico y favorecen procesos de ascenso forzado, condensación y precipitación recurrente (Vargas-Chaves, 2024). Este mecanismo incrementa la cobertura nubosa persistente y reduce la radiación solar directa durante el día, lo cual limita el calentamiento diurno, mientras que la alta humedad atmosférica y la nubosidad nocturna disminuyen la pérdida de calor por radiación, que atenúan el enfriamiento nocturno (Polasky et al., 2025). Como resultado, se generan microclimas con menor amplitud térmica diaria y estacional, así como una mayor estabilidad térmica a lo largo del año (Gomes-Oliveira et al., 2022). Estas condiciones, reforzadas por la compleja topografía y la continuidad de la cobertura boscosa, explican por qué las áreas identificadas por el modelo no experimentan cambios térmicos bruscos y mantienen niveles elevados de humedad, lo que contribuye a la persistencia de condiciones ambientales favorables para *C. cateniformis*.

En la Amazonía sur, Morona Santiago y Zamora Chinchipe se observó un foco de idoneidad notable que coincide con sectores donde la Cordillera Oriental genera una interacción orográfica que favorece microclimas locales con elevada humedad y ciclos convectivos frecuentes; esa influencia orográfica incrementa la retención de humedad y la frecuencia de eventos de precipitación intensa, favoreciendo sitios con condiciones climáticas óptimas para el establecimiento y crecimiento de *C. cateniformis* (INAMHI, 2025). Asimismo, los patrones estacionales ecuatorianos caracterizados por una estación lluviosa marcada por mayor transporte de humedad desde la cuenca amazónica y la circulación de vientos ondeantes, y por una estación relativamente más seca con mayor variabilidad interanual modulan la fenología y la disponibilidad hídrica en los microhábitats modelados. En este contexto, la interacción de masas de aire húmedo tropical transportada por la circulación atlántica y la convección local reforzada por sistemas convectivos y el reciclaje hídrico de la propia vegetación explican la persistencia de áreas con precipitación anual elevada 3,000-6,000 mm y temperaturas moderadas 22-26°C que el modelo identifica como óptimos hallazgos concordantes con estudios recientes sobre climatología y dinámica convectiva en la Amazonía ecuatoriana (Calvas-Serrano et al., 2024).

Los patrones de distribución potencial obtenidos en este estudio muestran que las áreas con mayor idoneidad ambiental para *C. cateniformis* se concentran en zonas con alta precipitación y condiciones climáticas húmedas, lo que coincide con la dinámica climática de la Amazonia del Ecuador caracterizada por periodos lluviosos que favorecen el establecimiento de la especie (Vistin-Guamantaquí et al., 2025). Estas condiciones se relacionan con la influencia de masas de aire húmedo provenientes del Atlántico y la Amazonía, junto con el efecto orográfico de la cordillera, factores que contribuyen a generar los rangos de precipitación entre 3,000 y 6,000 mm identificados como óptimos en el modelo. Asimismo, las áreas con menor idoneidad coincidieron con zonas donde la estacionalidad seca es más marcada, lo que sugiere limitaciones en la expansión de la especie hacia ambientes marginales. Los resultados obtenidos refuerzan la importancia de las condiciones climáticas regionales y de la conservación de áreas con microclimas favorables para la persistencia y manejo sostenible de *C. cateniformis* en la Amazonía ecuatoriana.

De manera similar a lo reportado en la Amazonía norte del Perú, donde se proyecta un incremento de áreas con idoneidad media para *C. cateniformis* bajo escenarios futuros, los resultados obtenidos en la Amazonía ecuatoriana también evidencian la presencia de extensas

zonas con idoneidad media distribuidas principalmente en las provincias de Pastaza, Morona Santiago, sectores de Orellana y áreas intermedias de Sucumbios y Napo. Estas regiones, presentan condiciones subóptimas, con características ambientales favorables que podrían permitir la expansión potencial de la especie en el futuro (Polasky et al., 2025). Esta coincidencia entre ambos estudios sugiere que las áreas con idoneidad media representan zonas estratégicas para la planificación forestal y la implementación de sistemas agroforestales, especialmente en territorios que han sido alterados por actividades antrópicas. En este sentido, mientras el estudio realizado en Perú proyecta una expansión futura de estas áreas, los resultados obtenidos en Ecuador ya evidencian la existencia actual de estos espacios con potencial de establecimiento, lo que refuerza la importancia de considerarlos en estrategias de restauración, manejo sostenible y conservación de *C. cateniformis* a mediano y largo plazo (Gomes-Oliveira et al., 2022).

Por otro lado, es importante considerar lo señalado por Booth (2022), quien indica que la variabilidad climática interanual, especialmente aquella asociada a eventos como El Niño y La Niña, puede influir significativamente en estos ecosistemas. Esta situación resulta relevante, ya que *C. cateniformis* presenta una baja tolerancia a cambios bruscos en las condiciones ambientales. La alteración de los patrones de precipitación y temperatura durante estos eventos puede afectar su desarrollo en la cuenca amazónica y, en consecuencia, modificar o incluso reducir las áreas previamente identificadas como hábitats adecuados para la especie.

La implementación de sistemas agroforestales con *C. cateniformis* debe iniciarse mediante una planificación territorial basada en los resultados del modelo de distribución de especies (SDM), apoyada con herramientas SIG y visitas en campo para identificar áreas degradadas y suelos con potencial de recuperación ecológica dentro de los cantones antes determinados. Este proceso debe complementarse con la participación de las comunidades locales a través de talleres participativos, donde se integren conocimientos técnicos y saberes tradicionales para definir de manera conjunta los espacios más adecuados para el establecimiento de estos sistemas. Mediante representaciones cartográficas participativas, se pueden orientar las intervenciones hacia zonas estratégicas como áreas de recarga hídrica, corredores de conectividad ecológica y sitios con potencial de captura de carbono, favoreciendo la resiliencia de los paisajes agrícolas fragmentados frente al cambio climático. En este sentido, la articulación social y técnica, coinciden con lo señalado por Murniati et al. (2022), permite promover una gestión inclusiva, adaptativa y sostenible que fortalezca

tanto la recuperación ecológica como los beneficios socioeconómicos para las comunidades locales.

En toda la Amazonía ecuatoriana se debe implementar un sistema de monitoreo ambiental participativo que trabaje conjuntamente con el Ministerio de Ambiente y Energía monitoreando parámetros como el almacenamiento de carbono, biodiversidad y calidad del suelo, las comunidades locales apoyadas por universidades pueden registrar el crecimiento de *C. cateniformis* la presencia de fauna asociada y la humedad del suelo mediante herramientas digitales, esto servirá para evaluar la efectividad de los sistemas agroforestales en la captura de carbono y la restauración ecológica. Se propone incluir *C. cateniformis* en programas nacionales de restauración productiva y mecanismos REDD+ (reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal) orientados a la captura de carbono, donde a mediano y largo plazo el gobierno podría ofrecer incentivos tributarios o económicos a productores que adopten modelos agroforestales sustentables. Además, se recomienda integrar los resultados del SDM en los planes de ordenamiento territorial provincial y garantizar así la compatibilidad entre desarrollo rural y conservación. Esta articulación institucional fomentará la resiliencia ecológica, la recuperación de la biodiversidad y el cumplimiento de compromisos climáticos internacionales del Ecuador.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- Alarcón-Aguirre, G., Canahuire-Robles, R. R., Guevara-Duarez, F. M., Rodríguez-Achata, L., Gallegos-Chacón, L. E. y Garate-Quispe, J. (2021). Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios. *Ecosistemas*, 30, 2175. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>
- Álvarez, K., Valdivia, G. y Flora, L. (2024). Las luchas de las mujeres shuar en contextos extractivos: una ecología política feminista y comunitaria desde la Amazonía ecuatoriana. *Journal of Latin American Geography*, 23, 193–219. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1353/lag.2024.a948101>
- Anto-Rubio, M. P. (2020). Impacto de la minería y tala ilegal en el desarrollo y la seguridad nacional. *Revista de Ciencia e Investigación en Defensa-CAEN*, 1, 123. <https://doi.org/10.58211/recide.v1i2.23>
- Arias-Gutiérrez, R., González-Sousa, R., Herrera-Sorzano, A. y Pérez-Quintana, M. (2016). Agrobiodiversidad amazónica y estrategias de desarrollo local sostenible. *Revista de Ciencias Sociales*, 151, 43–57. <https://doi.org/10.15517/rcs.v1i151.24969>
- Beeman, S. P., Morrison, A. M., Unnasch, T. R. y Unnasch, R. S. (2021). Ensemble ecological niche modeling of West Nile virus probability in Florida. *Plos One*, 16, e0256868. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256868>
- Booth, T. H. (2022). Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology*, 47, 1506–1514. <https://doi.org/10.1111/aec.13234>
- Broennimann, O., Mráz, P., Petitpierre, B., Guisan, A. y Müller-Schärer, H. (2014). Contrasting spatio-temporal climatic niche dynamics during the eastern and western invasions of spotted knapweed in North America. *Journal of Biogeography*, 41, 1126–1136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jbi.12274>
- Buendía-Espinoza, J. C., Díaz-Aguilar, I., Cahuich-Damián, J. E., Morales-García, A., Martínez-Hernández, P. A. y Zamora-Elizalde, M. C. (2020). Análisis de adaptabilidad de *Leucaena collinsii* en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 1233–1245. <https://doi.org/10.29312/remexca.v1i16.2611>
- Buitrón-Cañadas, V. y López-Sandoval, M. F. (2019). El trabajo femenino indígena en la economía agrícola familiar en la Amazonía del Ecuador. *Espacio y Desarrollo*, 33, 67–89. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201901.004>
- Calvas-Serrano, G., Maita, J., Angamarca, E., Eguiguren, P. y Veintimilla, D. (2024). Impactos del cambio climático en la distribución potencial de especies forestales priorizadas de la Amazonía ecuatoriana. *Bosques Latitud Cero*, 14, 31–46. <https://doi.org/10.54753/blc.v14i1.2115>
- Conrado-Da Cruz, D., Rey-Benayas, J. M., Costa-Ferreira, G., Ribeiro-Santos, S. y Schwartz, G. (2021). An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New Forests*, 52, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09777-3>
- Cruz-Román, J., Lema-Palauquibay, L., Carrasco-López, D. y Román-Santamaría, E. (2023). Modelos de nicho ecológico aplicados a invasiones biológicas: el caso de *Cirsium vulgare* Savi Ten. a través de los continentes. *Sur Academia: Revista Académica-Investigativa de la Facultad Jurídica, Social y Administrativa*, 10, 27–42. <https://doi.org/10.54753/suracademia.v10i20.1970>
- De Santana, A. C., De Santana, Á. L., De Santana, Á. L., De Oliveira, G. M. T. S. y do Santos, M. A. S. (2023). Bioeconomic evaluation of an agroforestry system and the potential to recover degraded areas and capitalize producers in the state of Pará, Brazilian Amazon. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 61, 439–455. <https://doi.org/10.5380/DMA.V61I0.80516>
- Díaz-Pablo, M. E., Alegre-Orihuela, J. C., Gómez-Bravo, C. A., Mendoza-Tamani, P. y Arévalo-Hernández, C. O. (2024).

- Reservas de carbono en tres sistemas silvopastoriles de la Amazonía peruana. *Manglar*, 21, 305–311. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.033>
- Franklin, J. (2023). Species distribution modelling supports the study of past, present, and future biogeographies. *Journal of Biogeography*, 50, 1533–1545. <https://doi.org/10.1111/jbi.14617>
- García-Quintana, Y., Arteaga-Crespo, Y., De Decker, M. y Castelo, M. C. (2023). Seed viability, germination, and seedling quality patterns of three forest species for restoration in Amazonian conditions. *Enfoque UTE*, 14, 18–32. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.890>
- GBIF. (2025). GBIF: Global Biodiversity Information Facility. Recuperado el 2 enero, 2025 de: <https://www.gbif.org>
- Haag, V., Koch, G., Melcher, E. y Welling, J. (2020). Characterization of the wood properties of *Cedrelinga cateniformis* as a substitute for timbers used for window manufacturing and outdoor applications. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22, 23–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000103>
- Heredia-R, M., Torres, B., Cayambe, J., Ramos, N., Luna, M. y Díaz-Ambrona, C. G. H. (2020). Sustainability assessment of smallholder agroforestry indigenous farming in the Amazon: a case study of Ecuadorian Kichwas. *Agronomy*, 10, 1973. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121973>
- Hernández-Núñez, H. E., Andrade, H. J., Suárez-Salazar, J. C., Sánchez, J. R., Gutiérrez, D. R., Gutiérrez-García, G. A. et al. (2021). Carbon storage in agroforestry systems in Colombia's eastern plains. *Revista de Biología Tropical*, 69, 352–368. <https://doi.org/10.15517/RBT.V69I1.42959>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2025). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Disponible en: <https://www.worldclim.org/data/index.html>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2025). Boletín de predicción climática N°08-2025, agosto-octubre. Recuperado el 13 enero, 2025 de: <https://servicios.inamhi.gob.ec/clima/>
- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R. et al. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83, 581–593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- León-Baque, E. E., Vásquez-Granda, V. D. y Valderrama-Chávez, M. D. (2021). Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8, 24. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2608>
- López, V., Espíndola, F., Calles, J. y Ulloa, J. (2013). *Atlas Amazonia ecuatoriana bajo presión*. Quito, Ecuador: EcoCiencia.
- Programa Nacional de Reforestación. (2019). Plan Nacional de Restauración Forestal 2019-2030. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.
- Morais-Sousa, R. L., Geraldo de Carvalho, F., Bragança-Gil, A. S., Bernardi-Vieira, T. y Sala-Michelan, T. (2025). Temperature and precipitation influence the distribution of different Cyperaceae life forms: the role of protected areas in the Amazon for conservation. *Biological Conservation*, 301, 110886 <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110886>
- Murniati, Suharti, S., Minarningsih, Nuroniah, H. S., Rahayu, S. y Dewi, S. (2022). What makes agroforestry a potential restoration measure in degraded conservation forest? *Forests*, 13, 267. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f13020267>
- Gomes-Oliveira, M., Souza-Araujo, C., Do-Vale, I. y Souza-Miranda, I. (2022). Tree population structure in fragments of different sizes in the Eastern Amazon. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 5743–5763. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s10668-021-01681-w>
- Pauletto, D., Arco-Verde, M. F., Crespo-Silva, I., de Sousa-Lopes, L. S., Correa-Araujo, A. J., Araujo-Lucas, F. C. et al. (2025). Adoption and diversity of agroforestry systems in the Amazon biome: a bibliometric overview. *Land*, 14, 524. <https://doi.org/10.3390/land14030524>
- Polasky, A., Sapkota, V., Forest, C. E. y Fuentes, J. D. (2025). Discrepancies in precipitation trends between observational and reanalysis datasets in the Amazon Basin. *Scientific Reports*, 15, 7268. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87418-5>
- Rojas-Briceño, N. B., Cotrina-Sánchez, D. A., Barboza-Castillo, E., Barrera-Gurbillón, M. A., Sarmiento, F. O., Sotomayor, D. A. et al. (2020). Current and future distribution of five timber forest species in Amazonas, northeast Peru: contributions towards a restoration strategy. *Diversity*, 12, 305. <https://doi.org/10.3390/D12080305>
- Scarcelli, N., Mariac, C., Couderc, M., Castro-Ruiz, D., Estivals, G., Angulo-Chávez, C. A. C. et al. (2025). The complete chloroplast genome of tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke 1922, Fabaceae). *Ecology and Evolution*, 15, 1–5. <https://doi.org/10.1002/ece3.71355>
- Scrivanti, L. R. y Anton, A. M. (2020). Spatial distribution of *Poa scaberula* (Poaceae) along the Andes. *Heliyon*, 6, e05220. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05220>
- Tropicos. (2025). Missouri Botanical Garden. Recuperado el 10 enero, 2025 de: <https://www.tropicos.org>
- Uribe-Taborda, S. F., González-Serna, A. y Torres-Aguía, E. (2020). La gobernación de los Quijos, Sumaco y La Canela. Marcos del proceso de producción sociohistórica del territorio en la Alta Amazonía ecuatoriana, siglos XVI-XIX. *Universitas*, 32, 55–76. <https://doi.org/10.17163/uni.n32.2020.03>
- Vargas-Chaves, I. (2024). Recursos genéticos y recursos biológicos: una aproximación jurídica desde su rol en la biodiversidad como un interés tutelado. *Revista Academia & Derecho*, 15, 1–21.
- Vieira-Capucho, H. L., De Souza-Bezerra, C., Souza-Tomaz, J., Freitas-de Souza, S., Lopes, R., Ferreyra-Ramos, S. L. et al. (2025). Modelagem de nicho ecológico para conservação de *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. Em cenários de mudanças climáticas. *Nativa*, 13, 144–155. <https://doi.org/10.31413/nat.v13i1.18574>

Vistin-Guamantaqui, D. A., Cabezas-Andrade, L. D., Balseca-Castro, J. E. y Medina-Ñuste, L. F. (2025). Potential distribution model for the establishment of forest plantations with *Pourouma cecropiifolia* in Ecuadorian Amazonia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28, 051. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5946>