UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

Distribución Espacial del Cedro (*Cedrela angustifolia*) y Proyección Futura en el Santuario Nacional Pampa Hermosa.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

Ecología

PRESENTADO POR:

Barra Ramos, Mariestephan

ASESOR:

Dr. Paytan Montañez, Tulio Celestino

HUANTA - PERÚ

2026

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO
Archivo_Tesis_Barra-Ramos.pdf

AUTOR
Mariestephan Barra Ramos

RECUENTO DE PALABRAS
34394 Words

RECUENTO DE CARACTERES
199289 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS
132 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO
6.8MB

FECHA DE ENTREGA
Nov 18, 2026 12:52 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME
Nov 18, 2026 12:54 PM GMT-5

9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados

Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr Tulio C. Paytan Montañez
DOCENTE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
"Año la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

En la ciudad de Huanta, en el Aula A03 de Estudios Generales de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, ubicado en el Jr. Miguel Lazón N° 370 – cinco esquinas, a los 27 días del mes de octubre de 2026, siendo las 11: 30 horas, se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez	**Miembro Titular 1 (Presidente)**
Mtro. Yomer Cisneros Aguirre	**Miembro Titular 2**
Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez	**Miembro Titular 3**

Acto seguido se procedió a dar lectura de la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 200-2026-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis de la Br. Mariestephan Barra Ramos, con la tesis titulada: **"Distribución espacial del Cedro (Cedrela angustifolia) y proyección futura en el Santuario Nacional Pampa Hermosa"** asesorado por el Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez, para optar el Título profesional de Ingeniero Ambiental.

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, los mismos que fueron defendidos y absueltos por la tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular	( )
Aprobado Bueno	(x)
Aprobado Muy Bueno	( )
Aprobado Excelente	( )

Con la calificación de ...CATORCE..... (14)
Siendo las ..12:51 PM... se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
DOCENTE ORDINARIO - ASOCIADO

Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
Miembro Titular 1 (Presidente)

Yomer Cisneros Aguirre
INGENIERO EN AMBIENTE Y DESARROLLO
CIP N° 303048

Mtro. Yomer Cisneros Aguirre
Miembro Titular 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez

Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez
Miembro Titular 3

“Distribución Espacial del Cedro (*Cedrela angustifolia*) y Proyección Futura en el Santuario Nacional Pampa Hermosa”

AUTOR

Bach. Mariestephan Barra Ramos

ASESOR

Dr. Tulio Celestino Paytán Montañez

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, Wilfredo Barra Chávez y Elisa Ramos De La Cruz, por su apoyo, amor y sus enseñanzas. Gracias por estar siempre conmigo, por confiar en mí y por ayudarme en cada momento, con profunda gratitud y amor les dedico esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme sabiduría y acompañarme durante el desarrollo de esta investigación, por su amor inmenso que tiene por nosotros.

A mis padres y hermanos, por su confianza, apoyo y acompañamiento persistente durante mi formación y la elaboración de esta tesis. A mi tío Nilton, por su motivación y apoyo para perseverar hasta culminar este trabajo.

A la Jefatura y al equipo técnico del Santuario Nacional Pampa Hermosa, especialmente a la Ingeniera Anavelma, Ing. Jhoel y Bio. Edhysson, así como a los guardaparques Don Zacarias, Don Francisco, Susano, Antony, Frank y Yusara, por las enseñanzas brindadas y por las facilidades brindadas para obtener los datos necesarios para la realización de este estudio, el tiempo compartido con ustedes fue una experiencia muy valiosa que enriqueció mis conocimientos y fortaleció mis competencias profesionales.

Al Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez, por su orientación, asesoramiento y seguimiento durante el desarrollo de la presente investigación.

¡Muchas gracias!

RESUMEN

El cambio climático puede modificar las condiciones ambientales y alterar la distribución de las especies forestales. El objetivo de esta investigación fue analizar la distribución potencial actual de *Cedrela angustifolia* y su proyección futura bajo escenarios climáticos en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. La investigación fue de tipo aplicada, nivel predictivo y diseño no experimental, mediante el modelamiento de distribución de especies con MaxEnt. Se utilizaron 40 registros de presencia, de los cuales 35 fueron seleccionados mediante adelgazamiento espacial. De 23 variables ambientales iniciales, se seleccionaron cuatro predictores mediante análisis de correlación, multicolinealidad y criterios de importancia ecológica. El modelo presentó un alto desempeño discriminativo, con un AUC de 0,98. La distribución potencial actual comprendió 665,85 ha (3,29 % del área evaluada), principalmente en sectores orientales y nororientales asociados a bosques montanos y basimontanos. Para 2041-2070, la superficie potencial se redujo a 623,00 ha (-6,43 %) bajo SSP1-2.6, 611,15 ha (-8,21 %) bajo SSP3-7.0 y 479,19 ha (-28,03 %) bajo SSP5-8.5. Se identificaron áreas de pérdida, ganancia y estabilidad, así como desplazamientos del centroide de 3,17; 5,52 y 1,49 km, respectivamente, y una redistribución hacia mayores elevaciones. BIO2 presentó la mayor contribución en la condición actual, mientras que BIO15 predominó en las proyecciones futuras. Los resultados evidencian una reducción y reconfiguración espacial de la idoneidad potencial, proporcionando información para orientar acciones de conservación, restauración, monitoreo y conectividad del hábitat de *C. angustifolia*.

Palabras Claves: *Cedrela,* distribución geográfica, cambio climático, modelización del nicho ecológico.

ABSTRACT

Climate change can alter environmental conditions and the distribution of forest species. The objective of this study was to analyze the current potential distribution of *Cedrela angustifolia* and its future projection under various climate scenarios in the Pampa Hermosa National Sanctuary and its buffer zone. This was an applied, predictive, non-experimental study that used species distribution modeling with MaxEnt. Forty presence records were used, of which 35 were selected through spatial thinning. From 23 initial environmental variables, four predictors were selected based on correlation analysis, multicollinearity, and ecological importance criteria. The model demonstrated high discriminatory performance, with an AUC of 0.986. The current potential distribution covered 665.85 ha (3.29% of the evaluated area), primarily in eastern and northeastern sectors associated with montane and basimontane forests. For 2041–2070, the potential area was reduced to 623.00 ha (-6.43%) under SSP1-2.6, 611.15 ha (-8.21%) under SSP3-7.0, and 479.19 ha (-28.03%) under SSP5-8.5. Areas of loss, gain, and stability were identified, as well as centroide shifts of 3.17, 5.52, and 1.49 km, respectively, and a redistribution toward higher elevations. BIO2 made the greatest contribution under current conditions, while BIO15 predominated in future projections. The results demonstrate a reduction and spatial reconfiguration of potential suitability, providing information to guide conservation, restoration, monitoring, and habitat connectivity efforts for *C. angustifolia*.

Keywords: *Cedrela, geographic distribution, climate change, ecological niche modeling.*

ÍNDICE

INTRODUCCION 14
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17
1.1. Descripción y formulación del problema 17
1.2. Objetivos 20
1.2.1. Objetivo general 20
1.2.2. Objetivos específicos 20
1.3. Justificación e importancia 20
1.4. Hipótesis 22
1.5. Variables 23
II. MARCO TEORICO 25
2.1. Antecedentes 25
2.2. Bases teóricas 31
2.3. Definición de términos 42
III. METODOLOGÍA 44
3.1. Enfoque, tipo, nivel y diseño de investigación 44
3.2. Área de estudio 44
3.3. Ámbito temporal y espacial 49
3.4. Población y muestra 49
3.5. Técnicas e instrumentos 50
3.6. Procedimientos 51
3.7. Análisis de datos 56
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 58
4.1. Resultados 58
4.2. Discusión 96
V. CONCLUSIONES 106
VI. RECOMENDACIONES 107
VII. REFERENCIAS 108
VIII. ANEXOS 124

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Operacionalizacion de la variable 1* 23
Tabla 2. *Operacionalizacion de la variable 2* 24
Tabla 3. *Variables bioclimaticas descargadas*..... 59
Tabla 4. *Variables topográficas obtenidas* 60
Tabla 5. *Validación independiente del Downscaling*..... 60
Tabla 6. *Validación cruzada espacial del Downscaling*..... 62
Tabla 7. *Variables ambientales seleccionadas* 69
Tabla 8. *Analisis de Spatial Thinning con distintas distintas distancias*.. 69
Tabla 9. *Autocrrelacion espacial de los predictores mediante el indice de Moran's I* 70
Tabla 10. *Desempeño de los modelos*..... 72
Tabla 11. *Estabilidad media del AUC y area potencial*..... 73
Tabla 12. *Area potencial por modelo proyectado*..... 82
Tabla 13. *Tipo de cambio en la distribucion potencial futura*..... 85
Tabla 14. *Centroides de idoneidad ambiental* 88
Tabla 15. *Contribucion de las variables ambientales* 92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Fotografias de C.angustifolia en el SN Pampa Hermosa*..... 37
Figura 2. *Escenarios climaticos de SSP*..... 41
Figura 3. *Mapa de zonificacion del SN Pampa Hermosa* 45
Figura 4. *Mapa de ubicación del area de estudio* 46
Figura 5. *Mapa de rango altitudinal del área de estudio*..... 47
Figura 6. *Mapa de la cobertura vegetal del área de estudio* 48
Figura 7. *Diagrama del flujo metodológico de la investigación*..... 56
Figura 8. *Mapa ubicación de los registros de presencia*..... 58
Figura 9. *Dendrograma de variavles ambientales basado en correlacion de Pearson*..... 64
Figura 10. *Gráfico* de *Prueba de Jackkinife del grupo 1* 65
Figura 11. *Gráfico de Prueba de Jackknife del grupo 2* 66
Figura 12. *Gráfico de Prueba de Jackknife del grupo 3* 66
Figura 13. *Grafico de Prueba de Jackknife incluyendo BIO 2 y TPI*..... 67
Figura 14. *Gráfico del Factor de Inflacion de la varianza (VIF)* 68
Figura 15. *Mapa de variabilidad espacial de las predicciones del modelo MaxEnt* 74
Figura 16. *Mapa continuo de distribucion potencial actual* 75
Figura 17. *Mapa binario de distribucion potencial actual* 77
Figura 18. *Mapa continuo de distribucion potencical bajo escenarios climaticos* 79
Figura 19. *Mapa binario de distribucion potencial bajo escenarios climaticos* 81
Figura 20. *Gráfico del cambio neto del area potencial*..... 83
Figura 21. *Gráfico del tipo de cambio en la distribucion potencial* 86
Figura 22. *Mapa del cambio espacial en la distribucion potencial*..... 87
Figura 23. *Gráfico del desplazamiento espacial del centroide de idoneidad ambiental*..... 89
Figura 24. *Gráfico de curvas de desnidad de altitud y latitud*..... 90
Figura 25. *Gráfico de prueba Jackkinife bajo escenario actual*..... 93
Figura 26. *Gráfico de prueba Jackknife bajo escenario SSP1-2.6* 93
Figura 27. *Gráfico de prueba Jackknife bajos escenario SSP3-7.0*..... 94
Figura 28. *Gráfico de prueba de Jackknife bajo escenario SSP5-8.5* 95

INTRODUCCION

El cambio climático constituye uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad a escala global, el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) advierte que el calentamiento global podría superar los 1,5 °C durante las próximas décadas como consecuencia de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, ocasionando profundas alteraciones en los sistemas naturales (IPCC, 2021). Entre sus principales efectos destacan las modificaciones en los patrones de temperatura y precipitación, las cuales alteran las condiciones ambientales que determinan la presencia de las especies, modifican la idoneidad de sus hábitats y generan cambios en la estructura y composición de los ecosistemas (Antão et al., 2022; Lawlor et al., 2024; Santos et al., 2021).

Como consecuencia de estas alteraciones ambientales, numerosas especies han modificado su distribución geográfica en respuesta a las nuevas condiciones climáticas. Estudios recientes muestran desplazamientos promedio cercanos a 6,1 km por década hacia mayores latitudes o elevaciones, aunque la magnitud y dirección de estas respuestas varían entre regiones y grupos taxonómicos (Rubenstein et al., 2023). Asimismo, Heinicke et al. (2026) reportaron que únicamente el 46,6 % de los cambios documentados en los rangos de distribución corresponden a desplazamientos hacia mayores latitudes, elevaciones o profundidades marinas, evidenciando que la respuesta de las especies al cambio climático no es uniforme. Estos patrones han sido registrados en plantas, aves, insectos y otros organismos, confirmando que el clima constituye uno de los principales determinantes de la distribución geográfica de la biodiversidad (Wernberg et al., 2025).

Entre los ecosistemas más sensibles a estas alteraciones destacan los bosques montanos tropicales, reconocidos como importantes centros de biodiversidad y endemismo. Su elevada vulnerabilidad se relaciona con su limitada extensión geográfica, sus pronunciados gradientes altitudinales y la presencia de especies con nichos ecológicos estrechos, altamente dependientes de condiciones climáticas específicas (Mata-Guel et al., 2023). Estas características hacen que pequeñas variaciones en la temperatura y la precipitación provoquen modificaciones en la

distribución altitudinal de las especies, reduzcan la idoneidad del hábitat y alteren la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas, comprometiendo además los servicios ecosistémicos que proporcionan (Christmann & Menor, 2021). En consecuencia, estos ecosistemas han sido identificados como prioritarios para la implementación de estrategias de conservación y restauración frente al cambio climático (Bendix et al., 2021).

La estrecha relación entre las condiciones climáticas y la biodiversidad en los bosques montanos tropicales determina que la distribución de numerosas especies responda rápidamente a las variaciones ambientales. En estos ecosistemas, las especies tienden a desplazarse hacia mayores elevaciones en busca de condiciones climáticas favorables (Janaki et al., 2011), mientras que el incremento de la temperatura y la intensificación de las sequías reducen el crecimiento de los árboles tropicales y modifican la dinámica de estos bosques (Zuidema et al., 2022). De manera complementaria, Coelho et al. (2023) demostraron que la interacción entre el clima y las características geográficas explica cerca del 90 % de la variabilidad de la riqueza de especies a escala mundial, lo que evidencia el papel determinante de estos factores en la organización y funcionamiento de los ecosistemas.

Dentro de los bosques montanos tropicales, el género *Cedrela* comprende especies forestales de elevada importancia ecológica y económica debido a su contribución a la estructura y dinámica del bosque, así como al alto valor comercial de su madera. En particular, *Cedrela angustifolia* es una especie característica de los bosques montanos de Sudamérica, donde desempeña funciones ecológicas relacionadas con el mantenimiento de la biodiversidad, la protección del suelo y la provisión de hábitat para diversas especies (Ames-Martínez et al., 2025). Además de su importancia ecológica, constituye un recurso forestal de gran relevancia económica, razón por la cual las especies del género *Cedrela* han sido aprovechadas intensamente en diferentes países (Cotrina et al., 2020). La especie de *Cedrela angustifolia* se distribuye naturalmente en Perú, Bolivia, Ecuador y Argentina.

En el Perú, las especies del género *Cedrela* representan uno de los recursos forestales de mayor importancia económica; sin embargo, enfrentan una creciente presión derivada del aprovechamiento maderero, la pérdida y fragmentación del hábitat y la expansión de las actividades humanas (SERFOR, 2020a). Estas

amenazas, sumadas a los efectos del cambio climático, incrementan la vulnerabilidad de la especie al reducir la disponibilidad de hábitats adecuados y afectar la viabilidad de sus poblaciones naturales (Benavidez et al., 2025; Ortega et al., 2023; Rodríguez et al., 2022). Debido a su importancia ecológica, económica y cultural, la conservación de *C. angustifolia* resulta fundamental para mantener la integridad de los bosques montanos andinos y promover el manejo sostenible de los recursos forestales (Ames-Martínez et al., 2025).

En este contexto, los modelos de distribución de especies (Species Distribution Models, SDM) se han consolidado como herramientas fundamentales para evaluar la relación entre las especies y su ambiente, permitiendo estimar su distribución potencial actual y proyectar posibles cambios bajo escenarios futuros de cambio climático (Hernández et al., 2018; Mateo et al., 2011). Estos modelos facilitan la identificación de áreas con condiciones ambientales favorables para la presencia de las especies y constituyen un importante apoyo para la planificación de estrategias de conservación, restauración y manejo de la biodiversidad (Bax et al., 2021; Brunialti & Frati, 2021). Entre los algoritmos más utilizados destaca MaxEnt, ampliamente reconocido por su alta capacidad predictiva a partir de registros de presencia y variables ambientales, incluso cuando el número de observaciones disponibles es reducido (Novoseltseva, 2024).

Aunque existen estudios sobre la distribución del género *Cedrela* y la vulnerabilidad climática de *Cedrela angustifolia*, aún no se ha evaluado su distribución potencial actual y futura en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. Por ello, esta investigación analizó los posibles cambios en la distribución de la especie frente a escenarios climáticos mediante el algoritmo MaxEnt, considerando los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el periodo 2041-2070, con el propósito de generar información que contribuya a fortalecer su conservación y manejo de esta especie.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

El cambio climático constituye uno de los principales impulsores de las alteraciones ambientales que afectan la distribución de la biodiversidad a escala mundial. El incremento de la temperatura, las modificaciones en los regímenes de precipitación y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos transforman las condiciones ambientales que determinan la presencia, establecimiento y permanencia de las especies, ocasionando cambios en la idoneidad de sus hábitats y, por consiguiente, en su distribución potencial (Antão et al., 2022; IPCC, 2021; Lawlor et al., 2024). Diversas investigaciones han demostrado que las variables ambientales, especialmente las climáticas, constituyen los principales factores que explican los patrones espaciales de distribución de las especies, por lo que cualquier alteración en estas condiciones puede generar procesos de expansión, contracción o desplazamiento de sus áreas de distribución (Pecl et al., 2017; Rubenstein et al., 2023).

Entre los ecosistemas más sensibles a estas modificaciones se encuentran los bosques montanos tropicales, reconocidos por su elevada biodiversidad, alto endemismo y marcada heterogeneidad ambiental. La distribución de las especies en estos ecosistemas depende estrechamente de gradientes de temperatura, precipitación, altitud y características edáficas; por ello, pequeñas variaciones en dichas variables pueden modificar significativamente la disponibilidad de hábitats adecuados, alterar la composición y estructura de las comunidades vegetales (Bendix et al., 2021; Mata-Guel et al., 2023). Estudios desarrollados en los Andes tropicales evidencian que el cambio en las condiciones ambientales está provocando desplazamientos altitudinales de numerosas especies forestales y modificaciones en su distribución potencial, incrementando la vulnerabilidad de estos ecosistemas frente al cambio climático (Zuidema et al., 2022).

Dentro de estos bosques, *Cedrela angustifolia* constituye una especie forestal de elevada importancia ecológica, económica y ambiental. Su presencia contribuye al mantenimiento de la estructura y funcionamiento de los bosques montanos, favorece la conservación de la biodiversidad asociada y representa un recurso forestal de alto valor comercial por la calidad de su madera (Cotrina et al., 2020).

Sin embargo, la especie enfrenta una creciente presión debido a la explotación forestal, la fragmentación del hábitat, el cambio de uso del suelo y las modificaciones de las condiciones ambientales, factores que incrementan la vulnerabilidad de sus poblaciones naturales (Benavidez et al., 2025; Ortega Rodriguez et al., 2023; Rodríguez et al., 2022). Investigaciones recientes demuestran que la distribución potencial de *C. angustifolia* depende principalmente de variables ambientales relacionadas con la temperatura, la precipitación, la topografía y las condiciones del suelo, las cuales determinan la idoneidad del hábitat tanto en condiciones actuales como bajo escenarios futuros de cambio climático (Ames-Martínez et al., 2025).

La distribución natural de *Cedrela angustifolia* comprende los bosques montanos de Bolivia, Perú, Ecuador y Argentina, presentando una distribución heterogénea y fragmentada a lo largo de la región andina (Ames-Martínez et al., 2025). En el Perú, la especie ha sido registrada en los departamentos de Áncash, Apurímac, Cajamarca, Cusco, Junín, Pasco y Piura (SERFOR, 2020b). No obstante, durante el periodo 2001-2024 el país perdió aproximadamente 3 203 893 ha de cobertura boscosa debido al cambio de uso del suelo, la extracción ilegal de madera y otros procesos de degradación ambiental (GEOBOSQUES, 2025), situación que reduce la disponibilidad de hábitats adecuados y compromete la conservación de especies forestales como *C. angustifolia*.

En este contexto, el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento constituyen uno de los principales remanentes de bosques montanos húmedos del centro del Perú y albergan poblaciones naturales de *Cedrela angustifolia*, cuya conservación forma parte de los objetivos establecidos en el Plan Maestro del área natural protegida (SERNANP, 2022). Sin embargo, las variaciones presentes y futuras de las variables ambientales podrían modificar la distribución potencial de la especie dentro del santuario, alterando la localización y extensión de las áreas con condiciones ambientales adecuadas para su establecimiento, crecimiento y regeneración natural. Aunque en los últimos años se realizaron estudios a nivel internacional sobre la distribución y perdida de su cobertura de esta especie (Ames-Martínez et al., 2025; Cotrina et al., 2020), aún no existen investigaciones que analicen la distribución potencial actual y futura de esta especie

en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento considerando la contribución de las variables ambientales bajo escenarios climáticos futuros a nivel local. Esta ausencia de información limita la identificación de áreas prioritarias para la conservación, dificulta la planificación de estrategias de manejo adaptativo y restringe la toma de decisiones orientadas a la protección de la especie frente a los efectos del cambio climático.

En consecuencia, resulta necesario estimar la distribución espacial actual y proyectar la distribución futura de *Cedrela angustifolia* mediante modelos de distribución de especies, a fin de identificar las áreas potencialmente adecuadas para la especie bajo diferentes escenarios climáticos y proporcionar información científica que apoye la planificación de estrategias de conservación, manejo y adaptación al cambio climático en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

1.1.1. Pregunta general

¿Cuál es la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) y su proyección futura bajo diferentes escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?

1.1.2. Preguntas especificas

- ¿Cuál es la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia 1981-2010 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?
- ¿Cuáles son los cambios proyectados en la distribución potencial futura del cedro (*Cedrela angustifolia*) para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?
- ¿Cuáles son las variables bioclimáticas y topográficas que presentan mayor contribución en la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) y su proyección futura bajo diferentes escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia 1981-2010 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.
- Evaluar los cambios proyectados en la distribución potencial futura de cedro (*Cedrela angustifolia*) para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.
- Determinar las variables bioclimáticas y topográficas que presentan mayor contribución a la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

1.3. Justificación e importancia

La presente investigación contribuirá a ampliar el conocimiento sobre la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento, aportando evidencia científica sobre la contribución de las variables ambientales en la distribución de esta especie forestal. Asimismo, permitirá analizar cómo las variaciones de estas variables podrían modificar su distribución potencial bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático, contribuyendo a la aplicación de los modelos de distribución de especies (SDM) en ecosistemas forestales y montanos (Özkan et al., 2026). Del mismo modo, los resultados complementarán la información existente sobre *C. angustifolia* en el Perú, donde aún son limitados los estudios desarrollados a escala local en áreas naturales protegidas.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación aplica un enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica y modelos de distribución de especies mediante el algoritmo MaxEnt (Novoseltseva, 2024), integrando registros de

presencia con variables ambientales previamente seleccionadas para estimar la distribución potencial actual y futura de *Cedrela angustifolia*. Asimismo, incorpora escenarios climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y procedimientos de validación del modelo, constituyendo una metodología reproducible que podrá ser utilizada en futuras investigaciones orientadas al modelamiento espacial de especies forestales en ecosistemas similares.

La información generada permitirá identificar las áreas con condiciones ambientales favorables para *Cedrela angustifolia* tanto en el escenario actual como bajo escenarios futuros de cambio climático. Estos resultados servirán como herramienta técnica para apoyar la planificación, gestión y toma de decisiones del Santuario Nacional Pampa Hermosa, facilitando la priorización de áreas para conservación, restauración, monitoreo ecológico y manejo de la especie, cumpliendo uno de sus objetivos de conservación (SERNANP, 2022). Asimismo, los resultados podrán ser utilizados como insumo para la actualización del Plan Maestro del área natural protegida y para el diseño de estrategias de adaptación frente al cambio climático.

La investigación posee una alta relevancia ambiental debido a que *Cedrela angustifolia* se encuentra clasificada como especie Vulnerable por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2021), en CITES está con categoría de apéndice II, y en el Perú según el DSNº 043-2006-AG la considera En Peligro, por lo que recibe protección legal, constituyendo uno de los principales componentes ecológicos de los bosques montanos tropicales (SERFOR, 2020). La generación de información sobre su distribución potencial contribuirá a fortalecer las estrategias de conservación de la especie y de su hábitat, favoreciendo el mantenimiento de la biodiversidad, la conectividad ecológica y los servicios ecosistémicos que brindan estos bosques. Además, el estudio aporta evidencia científica para la implementación de acciones de adaptación al cambio climático y contribuye al cumplimiento de los compromisos asumidos por el Perú en el marco del Convenio sobre la Diversidad Biológica desde el año 1992 y de las políticas nacionales de conservación de la biodiversidad.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La distribución potencial de *Cedrela angustifolia* disminuye y cambia bajo los escenarios climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), con predominio de las variables bioclimáticas en su modelamiento en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

1.4.2. Hipótesis especificas

- La distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) durante el periodo de referencia 1981-2010 es restringida con sectores específicos del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.
- La distribución potencial futura del cedro (*Cedrela angustifolia*) disminuirá durante el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, en comparación con la distribución potencial actual en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.
- Las variables bioclimáticas presentaran una mayor contribución que las variables topográficas en la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*), en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

1.5. Variables

Tabla 1

Operacionalización de la variable 1

Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Técnica/Instrumentos
Variables Ambientales predictoras	Conjunto de variables ambientales candidatas utilizadas como insumos para el modelamiento de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia*. Estas variables fueron sometidas a un proceso de selección, para obtener finalmente las variables predictoras empleadas en el modelo MaxEnt, juntamente con la presencia georreferenciada.	Variables bioclimáticas	19 BIO (1981-2010)	°C, mm, % y otras según las variables	Procesamiento y análisis espacial; CHELSA v2.1, Rstudio 4.2.2 y QGIS 3.40
			19 BIO (2041-2070) SSP1-2.6		
			19 BIO (2041-2070) SSP3-7.0		
			19 BIO (2041-2070) SSP5-8.5		
		Variables topográficas	Altitud	m snm	Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR; QGIS 3.40
			Pendiente	%	
			TRI	Adimensional	
			TPI	m	
		Selección de Variables	Correlación de Pearson	r	Análisis estadístico; Rstudio 4.2.2
			Prueba del Jackknife	Ganancia	Modelado; MaxEnt 3.4.4
			Factor de Inflación de la Varianza (VIF)	VIF	Análisis estadístico; Rstudio 4.2.2
		Registros de presencia	Registros georreferenciados de *Cedrela angustifolia*	m (x,y)	Registros de campo de la Jefatura del SNPH y registros de GBIF/iDigBio; procesamiento en QGIS 3.40 y Rstudio 4.2.2

Tabla 2

Operacionalización de la variable 2

Variable	Definición operacional	Dimensiones		Indicadores	Unidad de medida	Técnica/Instrumentos
Distribución potencial de *Cedrela angustifolia*	Distribución espacial potencial de *Cedrela angustifolia* estimada mediante el modelo MaxEnt, a partir de registros georreferenciados de presencia y variables ambientales predictoras, para la condición actual y para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.	Distribución potencial actual 1981-2010		Idoneidad ambiental	Adimensional (0-1)	Modelamiento de distribución de especies; MaxEnt 3.4.4 y QGIS 3.40
				Área de distribución	ha	
		Distribución potencial futura 2041-2070	SSP1-2.6	Idoneidad ambiental	Adimensional (0-1)	
				Área de distribución	ha	
			SSP3-7.0	Idoneidad ambiental	Adimensional (0-1)	
				Área de distribución	ha	
			SSP5-8.5	Idoneidad ambiental	Adimensional (0-1)	
				Área de distribución	ha	
		Cambio espacial de la distribución potencial		Cambio neto	ha y %	Análisis espacial; QGIS 3.40 y Rstudio 4.2.2
				Tipo de cambio	ha y %	
				Curvas de densidad de altitud y latitud	m snm y grados decimales	
				Desplazamiento espacial	km	

II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Ames-Martinez et al. (2025), en el estudio *Climate Change and Tree Cover Los Affect the Hábitat Suitability of Cedrela angustifolia: Evaluating Climate Vulnerability and Conservation in Andean Montane Forests*, evaluaron los efectos del cambio climático y la pérdida de cobertura arbórea sobre la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* en los bosques montanos andinos. Para ello, utilizó modelos de nicho ecológico mediante los algoritmos MaxEnt y Random Forest, considerando variables bioclimáticas, topográficas, edáficas y de cobertura arbórea, y proyectaron la distribución de la especie bajo los escenarios climáticos SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para los años 2040, 2070 y 2100. Los resultados evidenciaron que la estacionalidad fue la variable ambiental de mayor contribución en la distribución de la especie, además de proyectarse una reducción de su potencial de distribución entre 22,16 % y 36,88 % hacia finales del siglo XXI. Asimismo, Bolivia presentó la mayor idoneidad de hábitat en comparación con Ecuador, Perú y Argentina. Los autores concluyeron que el cambio climático y la pérdida de cobertura arbórea aumentarán la vulnerabilidad de *C. angustifolia*, por lo que recomendaron fortalecer las estrategias de conservación y manejo tanto dentro como fuera de las áreas protegidas.

Shen et al. (2022), en el artículo *Predicting the Impact of Climate Change on the Distribution of Two Relict Liriodendrom Species by Coupling the MaxEnt Model and Actual Physiological Indicators in Relation to Stress Tolerance*, tuvieron como objetivo predecir el impacto del cambio climático sobre la distribución potencial de *Liriodendron chinense* y *Liriodendron tulipifera*. Para ello, emplearon el algoritmo MaxEnt para modelar la distribución del hábitat adecuada bajo escenarios climáticos actuales y futuros, complementando el análisis con la evaluación de seis indicadores fisiológicos de tolerancia al estrés en diferentes procedencias de ambas especies. Los resultados evidenciaron una disminución significativa de las áreas de hábitat adecuadas para ambas especies; además, *L. chinense* presentó una contracción de su distribución, mientras que *L. tulipifera* mostró un desplazamiento hacia el norte. Asimismo, la precipitación de mayo y la precipitación del trimestre más seco fueron las variables ambientales de mayor influencia para *L. chinense* y

L. tulipifera. Los autores concluyeron que el cambio climático modificará la distribución potencial de ambas especies y que la integración de modelos de distribución con indicadores fisiológicos constituye una herramienta útil para orientar estrategias de conservación frente a escenarios climáticos futuros.

Khanal et al. (2022), en el estudio *Potential Impacto of Climate Change on the Distribution and Conservation Status of Pterocarpus marsupium, a Near Threatened South Asian medicinal tree species*, tuvieron como objetivo evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución geográfica potencial y el estado de conservación de *Pterocarpus marsupium* en el sur de Asia. Para ello, emplearon modelos de nicho ecológico para estimar la distribución actual y proyectar su distribución futura bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 para el año 2050, utilizando ocho modelos de circulación general (GCM). Los resultados mostraron que la distribución actual de la especie comprende gran parte de India y Sri Lanka, así como sectores de Nepal y Bután; además, las proyecciones climáticas evidenciaron cambios importantes en las áreas de mayor idoneidad, especialmente en el centro de India, y un desplazamiento de los hábitats adecuados hacia mayores elevaciones en zonas montañosas. Los autores concluyeron que el cambio climático modificará significativamente la distribución potencial de *P. marsupium* y que la identificación de áreas ambientalmente adecuadas en el presente y el futuro constituye una herramienta fundamental para orientar estrategias de conservación y manejo de la especie.

Medina et al. (2021), la investigación *Análisis de la Distribución de Cedrela salvadorensis Standl. (Meliaceae) e implicaciones para su conservación*, realizado en México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, tuvieron como objetivo determinar la distribución potencial y actual de *Cedrela salvadorensis* e identificar las Áreas Naturales Protegidas con potencial para contribuir a su conservación. Para ello, emplearon el algoritmo MaxEnt utilizando variables bioclimáticas y edáficas, además de realizar un recorte de la distribución potencial con la cobertura de vegetación no perturbada para estimar la distribución actual de la especie. Los resultados mostraron que la distribución potencial alcanzó una superficie de 98 143 km²; sin embargo, al considerar las áreas deforestadas, esta se redujo en un 31 %, y únicamente el 0,8 % de la distribución actual se encontraba

dentro de Áreas Naturales Protegidas. Los autores concluyeron que la deforestación ha reducido significativamente la distribución de *C. salvadorensis* y evidenciaron la limitada representación de la especie dentro de las áreas protegidas, resaltando la necesidad de fortalecer las estrategias de conservación y manejo para garantizar su persistencia.

Alberdi (2021), en el estudio denominado *Modelado de Distribución de especies en los bosques de los Andes Meridionales*, tuvo como objetivo analizar los posibles efectos del cambio climático sobre la distribución espacial de las formaciones forestales de los bosques andinos. Para ello, empleó el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) para modelar la distribución potencial de los bosques bajo condiciones climáticas actuales y futuras correspondientes al periodo 2040-2069, considerando variaciones en la temperatura y la precipitación. Los resultados evidenciaron que la mayoría de las formaciones forestales presentarían una pérdida de idoneidad climática en sus áreas de distribución actual y un desplazamiento geográfico de las áreas potencialmente adecuadas bajo escenarios futuros de cambio climático. La autora concluyó que el cambio climático modificará significativamente la distribución espacial de los bosques andinos, por lo que resulta necesario incorporar modelos predictivos en la planificación de estrategias de conservación y manejo de estos ecosistemas.

Siqueira et al. (2019), en el estudio denominado *Contemporary and future potential geographic distribution of Cedrela fissilis Vell. under climate change scenarios*, tuvieron como objetivo modelar la distribución geográfica potencial de *Cedrela fissilis*. bajo condiciones climáticas actuales y futuras. Para ello, emplearon el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt), utilizando registros de ocurrencia, variables climáticas y altitud, y proyectaron la distribución de la especie para el año 2070 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados evidenciaron una reducción de las áreas climáticamente adecuadas para la especie, estimada en aproximadamente 47 % bajo RCP 4.5 y 63 % bajo RCP 8.5, además de un desplazamiento de las áreas potencialmente favorables hacia nuevas regiones. Los autores concluyeron que el cambio climático podría modificar significativamente la distribución potencial de *C. fissilis*, generando una reducción de las áreas adecuadas, especialmente bajo el escenario de mayores emisiones, por lo que

recomendaron considerar las áreas que mantendrían condiciones favorables en las estrategias de conservación de la especie.

2.1.2. Nacionales

Chamochumbi (2023), en su estudio *La distribución espacial del cedro (Cedrela odorata L.) dentro del Bosque de Protección San Matías-San Carlos y su zona de Amortiguamiento: proyecciones para el periodo 2041-2060*, tuvo como objetivo determinar la distribución espacial actual y proyectar la distribución futura de *Cedrela odorata* bajo escenarios de cambio climático, así como identificar las zonas con mayor presión antrópica para fortalecer la gestión del área protegida. Para ello, empleó el modelo de distribución de especies MaxEnt 3.4.4., utilizando 99 registros de ocurrencia y 21 variables ambientales, además de proyectar la distribución para el periodo 2041-2060 bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5; Complementariamente, aplicó un análisis de densidad Kernel para identificar las áreas con mayor presión de deforestación. Los resultados evidenciaron una reducción del 81,5 % y 91 % del área con mayor probabilidad de distribución de la especie bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. El autor concluyó que el cambio climático, junto con la presión antrópica, disminuirá significativamente el potencial de distribución de *Cedrela odorata*, por lo que recomendó fortalecer las estrategias de conservación, control y gestión territorial sustentadas en información científica.

Cotrina et al. (2021), en el estudio *Biographic Distribution of Cedrela spp. Genus in Perú Using MaxEnt Modeling: Aconservation and Restoration Approach*, tuvieron como objetivo determinar la distribución biogeográfica potencial del género *Cedrela* en el Perú mediante modelos de distribución de especies, con la finalidad de identificar áreas ambientalmente adecuadas para su conservación, restauración y manejo sostenible, así como evaluar su presencia dentro del sistema nacional de áreas protegidas. Para ello, emplearon el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), utilizando 947 registros de ocurrencia correspondientes a 10 especies del género *Cedrela*, incluyendo *Cedrela angustifolia*. El modelo incorporó 19 variables bioclimáticas, tres variables topográficas, nueve variables edáficas, radiación solar y humedad relativa para estimar la probabilidad de ocurrencia de las especies. Los resultados indicaron que aproximadamente el 6,7 % del territorio peruano (86 916,2

km²) presentó alta probabilidad de distribución potencial para el género *Cedrela*, distribuida en 17 departamentos. Asimismo, determinaron que solo el 4,4 % de estas áreas potenciales se encontraba dentro de áreas naturales protegidas, mientras que una proporción importante correspondía a zonas con alta susceptibilidad a degradación. Los autores concluyeron que el modelamiento mediante MaxEnt constituye una herramienta útil para identificar áreas prioritarias de conservación y restauración del género *Cedrela* en el Perú, contribuyendo a la planificación de estrategias de manejo sostenible frente a las amenazas que afectan a estas especies forestales.

Rojas et al. (2020), en el artículo *Current and future Distribution of Five Timber Forest Species in Amazonas, Northeast Perú: Contributions towards a Restoration Strategy*, un estudio cuyo objetivo fue modelar la distribución potencial actual y futura de cinco especies forestales maderables en el departamento de Amazonas, Perú. Para ello, emplearon el modelo de máxima entropía (MaxEnt) utilizando registros de presencia de las especies y 26 variables ambientales relacionadas con condiciones climáticas, topografía y características del suelo. La distribución potencial fue evaluada bajo condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático para los periodos 2050 y 2070, con el propósito de identificar posibles cambios en las áreas ambientalmente adecuadas para cada especie. Los resultados evidenciaron que las cinco especies evaluadas presentaron modificaciones en su distribución futura, con procesos de expansión y/o reducción de sus áreas potencialmente adecuadas respecto a la distribución actual. En particular, para *Cedrela montana*, se envió una distribución potencial actual de 6125,44 km², de la cual aproximadamente 35,81 % correspondió a áreas degradadas con potencial para restauración forestal. Los autores concluyen que el cambio climático modificará la distribución futura de las especies forestales evaluadas, generando pérdidas o ganancias de áreas potencialmente adecuadas. El modelo MaxEnt permitió identificar zonas prioritarias para conservación y restauración, contribuyendo a la planificación del manejo forestal sostenible.

Lozano (2020), en la investigación denominada *Modelamiento espacial de nichos ecológicos para evaluación de presencia de Cedrela odorata, Cedrela montana y Cedrelinga cateniformis - Amazonas*, tuvo como objetivo modelar los nichos

ecológicos de estas especies forestales en el departamento de Amazonas. La investigación fue de tipo aplicada, con diseño no experimental longitudinal, y empleó 3564 registros de presencia de las especies, 19 variables bioclimáticas de WorldClim y el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt), complementado con Sistemas de Información Geográfica para representar y calcular las áreas potenciales de distribución. Los resultados evidenciaron áreas con alta probabilidad de presencia (75-100 %) de 114 537,02 ha para *Cedrela odorata*, entre 250 y 1200 m snm., y de 85 082,22 ha para *Cedrela montana*, entre 750 y 2100 m snm.; asimismo, los modelos presentaron un alto desempeño, con valores de AUC superiores a 0,90. La autora concluyó que el modelamiento mediante MaxEnt permitió estimar satisfactoriamente la distribución potencial de las especies estudiadas y constituye una herramienta útil para identificar áreas con condiciones favorables para su conservación, restauración y planificación forestal en el departamento de Amazonas.

2.1.3. Regionales

Terreros-Camac et al. (2025) en el estudio denominado *Fenología de cinco especies coexistentes de Cedrela (Meliaceae) en el valle de Chanchamayo, Junín - Perú*, tuvieron como objetivo registrar preliminarmente el comportamiento fenológico de cinco especies simpátricas del género *Cedrela* en el valle de Chanchamayo, Junín. Para ello, realizaron observaciones mensuales durante un año (2021-2022) de tres fenofases: brotamiento, madurez y senescencia, relacionándolas con las estaciones seca y lluviosa y con información de especímenes de herbario. Los resultados evidenciaron diferencias en el comportamiento fenológico entre las especies, identificándose un comportamiento no estacional en *Cedrela odorata* y *C. fissilis*, y estacional en *C. domatifolia*, *C. angustifolia* y *C. montana*; asimismo, la floración ocurrió principalmente al inicio de la estación lluviosa y la fructificación durante los meses de mayor precipitación, con algunas diferencias entre especies. Los autores concluyeron que las especies de *Cedrela* presentan diferentes patrones fenológicos en el valle de Chanchamayo, los cuales podrían constituir estrategias de aislamiento reproductivo y requieren estudios adicionales para comprender su relación con las condiciones ambientales.

Acevedo (2018), en su investigación titulada *Identificación de la variable climática que controla el crecimiento de Cedrela sp., Cedrela nebulosa T.D. y Cedrela angustifolia C. DC. en los bosques montanos del Perú*, tuvo como objetivo determinar la relación entre el crecimiento radial de estas especies y las variables climáticas. La investigación fue de tipo básica, nivel correlacional y diseño no experimental, descriptivo-correlacional. Mediante técnicas dendrocronológicas, analizó muestras procedentes de bosques montanos de Junín y relacionó las cronologías de crecimiento con registros de temperatura y precipitación. Los resultados mostraron que *C. angustifolia* presentó una correlación positiva entre su crecimiento radial y la temperatura durante junio a septiembre ($r = 0,49$; $p = 0,029$), mientras que presentó una relación negativa con la precipitación durante junio a octubre ($r = -0,44$; $p = 0,095$). La autora concluyó que la temperatura fue la principal variable climática asociada al crecimiento radial de *C. angustifolia* y *C. nebulosa*, evidenciando la sensibilidad de estas especies frente a las condiciones climáticas en los bosques montanos del Perú.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Cambio climático y biodiversidad

De acuerdo con la ONU (2020), el fenómeno del cambio climático consiste en alteraciones profundas y constantes en las condiciones de temperatura y los ciclos de la atmosfera terrestre. El IPCC (2021) señala que, si bien existen factores naturales en este proceso, la causa predominante en la actualidad es la intervención humana. El aumento excesivo en la concentración de gases de efecto invernadero ha roto la estabilidad que la atmósfera mantuvo históricamente.

La magnitud de esta alteración es evidente en los datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2024), los registros indican que, durante 2023, la acumulación de estos gases alcanzo umbrales alarmantes: el dióxido de carbono (CO_2) se situó en 420,0 ppm, mientras que el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) registraron 1934 ppb y 336,9 ppb. Este desequilibrio se agrava por la pérdida de sumideros de carbono; la FAO (2025) reporta que, pese a que los bosques representan un tercio del área terrestre global, la deforestación persiste a un ritmo de 10,9 millones de hectáreas anuales. En el Perú, esta crisis se concentra en la Amazonía, en el periodo comprendido entre 2001 y 2022, la devastación forestal

superó los 2,9 millones de hectáreas de bosque virgen, afectando principalmente a las regiones de Junin, Ucayali, Loreto, San Martín, Huánuco y Madre de Dios (Soto & Koelle, 2025). A este panorama se añade el cambio de uso de suelo, elemento clave en las perturbaciones ambientales, estas modificaciones intervienen negativamente en los procesos hidrológicos y los ciclos biogeoquímicos, consolidándose como uno de los detonantes del calentamiento global (Benavidez et al., 2025).

Las alteraciones del sistema climático repercuten en la ocurrencia e intensidad de diversos eventos extremos en distintas regiones del planeta, tales como sequias, precipitaciones intensas, olas de calor y ciclones tropicales (IPCC, 2021). El impacto sobre la biodiversidad es profundo: las especies se ven forzadas a desplazar sus rangos geográficos para rastrear nichos climáticos aptos (Rubenstein et al., 2023), una amenaza sustancial a la biodiversidad global, que se manifiestan en diferentes niveles, incluyendo poblaciones, especies, ecosistemas y biomas (Bonifácio-Anacleto et al., 2024). Particularmente, los ecosistemas forestales presentan una vulnerabilidad crítica debido a su dinámica de recuperación lenta, lo que compromete su resiliencia frente a la velocidad del cambio global (Reichmuth et al., 2025).

2.2.2. Cambio climático en ecosistemas montanos tropicales

Un bosque montano tropical es un ecosistema forestal ubicado en las laderas de las montañas, caracterizado por una marcada estratificación altitudinal que genera condiciones climáticas y biológicas únicas, distintas a las de las tierras bajas (Llerena et al., 2014). Las modificaciones del clima global ya están generando impactos en los bosques tropicales a nivel mundial, evidenciándose en cambios en la distribución de los biomas forestales, variaciones en la composición de especies y en la biomasa, así como en el incremento de plagas, enfermedades y la mayor ocurrencia de incendios forestales (Ometto et al., 2022).

Diversas investigaciones evidencian cambios en la estructura y diversidad de los bosques tropicales andinos y amazónicos, asociados a los efectos adversos del calentamiento global. Asimismo, el incremento en la competencia entre especies está favoreciendo una mayor homogeneización en la composición de las comunidades, lo que se traduce en una disminución de la biodiversidad (Aguirre et

al., 2025; Fadrique et al., 2026; Restrepo et al., 2025). Esto repercute de manera considerable en la distribución y estabilidad de los bosques montanos tropicales en los Andes peruanos. Proyecciones hacia el año 2100 señalan que alrededor del 58% de estos ecosistemas podrían presentar condiciones climáticas inadecuadas, especialmente en altitudes entre 800 y 1200 m snm., se estima que cerca del 64% de los bosques montañosos ubicados dentro de áreas protegidas estarían expuestos a elevados niveles de impacto (Alberdi, 2021; Bax et al., 2021), incluso incide en el crecimiento y la capacidad de regeneración de estos bosques, alterando la dinámica de la vegetación y los ciclos de nutrientes bajo escenarios de cambio climático (Bartholomew et al., 2026).

2.2.3. Vulnerabilidad de especies forestales

Se considera vulnerabilidad al nivel de susceptibilidad que presenta una especie o un ecosistema frente a posibles daños ocasionados por diversas amenazas, teniendo en cuenta su sensibilidad intrínseca y su capacidad adaptativa para resistir o recuperarse de dichos impactos (IPCC, 2014). En este contexto, los bosques de niebla que se extienden desde México hasta Panamá concentran más de 6000 especies de plantas vasculares, lo que equivale aproximadamente al 18 % de la diversidad vegetal regional, siendo reconocidos como uno de los ecosistemas más vulnerables y frágiles (Barahona et al., 2025).

Entre las especies que habitan estos bosques montanos tropicales son la *Cedrela,* cuyo crecimiento y la estructura de la xilema están fuertemente influenciados por el clima. Estudios han demostrado que las sequias, variaciones en temperatura y precipitación reducen su crecimiento y afectan su funcionalidad hidráulica (Rodríguez-Ramírez et al., 2022). Asimismo, mediante modelos de nicho ecológico, se evaluó su distribución actual y futura, donde su área potencial disminuirá entre 22% y 37% hacia el año 2100 bajo distintos escenarios climáticos (Ames-Martínez et al., 2025).

Adicionalmente, se han detectado cambios en la concentración, el aprovechamiento y la redistribución de nutrientes, los cuales se relacionan con un incremento en la densidad de la madera y una reducción progresiva del crecimiento con el paso del tiempo (Ortega et al., 2023). De igual manera, la sensibilidad de la especie al aumento térmico evidencia posibles impactos del calentamiento global en su

desarrollo (Marcon et al., 2019). Teniendo en cuenta que las especies arbóreas cumplen funciones clave en la regulación de los ciclos del carbono y del agua, así como en la conservación de la biodiversidad y en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos indispensables para la sociedad, su vulnerabilidad frente al cambio climático representa una preocupación ecológica y socioambiental significativa.

2.2.4. Distribución potencial de una especie

La distribución potencial de una especie corresponde al conjunto de áreas que presentan condiciones ambientales favorables para su establecimiento, supervivencia y persistencia, estimadas a partir de la relación entre los registros de ocurrencia de la especie y las variables ambientales (Benavides et al., 2024). Esta distribución representa el hábitat ambientalmente adecuado y no necesariamente coincide con la distribución observada, ya que puede verse limitada por factores como la capacidad de dispersión, las barreras geográficas y las interacciones bióticas. En este contexto, los modelos de distribución de especies permiten generar mapas espacialmente explícitos de la distribución potencial o de la idoneidad ambiental mediante la extrapolación de las relaciones entre la presencia de la especie y las condiciones ambientales a toda el área de estudio (Soley-Guardia et al., 2024).

Por otra parte, el área de distribución de una especie se define como la fracción del espacio geográfico donde esta se encuentra presente e interactúa de manera permanente con el ecosistema. La presencia o ausencia de una especie en un territorio está condicionada por factores biogeográficos, fisiológicos y ecológicos, los cuales determinan los límites de su distribución y su capacidad para ocupar determinados ambientes (Mata et al., 2015).

2.2.5. Variables ambientales predictoras

La distribución geográfica de las especies está determinada por la interacción de diversos factores ambientales que condicionan las posibilidades de establecimiento, supervivencia y persistencia de las poblaciones. En los modelos de distribución de especies, estos factores se representan mediante variables ambientales predictoras, las cuales permiten relacionar los registros de ocurrencia con las condiciones ambientales presentes en el territorio y estimar su distribución potencial en el espacio y el tiempo (Frans & Liu, 2024; Thuiller, 2024). Entre los predictores

empleados con mayor frecuencia se encuentran las variables climáticas y topográficas, debido a que representan gradientes ambientales relacionados con las condiciones de temperatura, precipitación, elevación y características del relieve que pueden influir en la distribución de las especies (Brambilla et al., 2024; Frans & Liu, 2024). Asimismo, la selección de las variables predictoras debe considerar su relevancia ecológica, escala espacial y posible colinealidad, debido a que la inclusión de predictores redundantes puede modificar la interpretación de las relaciones entre las especies y su ambiente (Guisan et al., 2025).

a) Variables climáticas

Las variables climáticas representan uno de los principales factores que limitan la distribución de las especies, debido a que determinan condiciones fisiológicas esenciales como la disponibilidad de agua, los rangos térmicos y la productividad de los ecosistemas (Abdulwahab et al., 2022). En los modelos de distribución de especies, las variables bioclimáticas derivadas de temperatura y precipitación son ampliamente utilizadas porque permiten representar condiciones climáticas promedio, estacionales y extremas que influyen sobre los requerimientos ecológicos de las especies (Gardner et al., 2019).

Las bases de datos bioclimáticas, como WorldClim y CHELSA, incluyen 19 variables que describen aspectos como temperatura media anual, temperatura máxima y mínima, precipitación anual y estacionalidad climática (Waltari et al., 2014). Estas variables son ampliamente utilizadas debido a que cuentan con información histórica y proyecciones futuras asociadas a escenarios de cambio climático, permitiendo evaluar posibles modificaciones en la distribución potencial de las especies bajo diferentes condiciones climáticas futuras (Karger et al., 2017).

En especies forestales de bosques montanos, variables relacionadas con temperaturas extremas y disponibilidad hídrica pueden representar factores limitantes importantes, debido a que pequeñas modificaciones climáticas pueden generar cambios en la idoneidad ambiental de sus hábitats (Feeley et al., 2020; Restrepo et al., 2025).

b) Variables topográficas

Las variables topográficas constituyen factores ambientales que influyen directamente en la distribución de las especies al modificar las condiciones micro climáticas, la disponibilidad de agua, la radiación solar y las características del suelo (Kübler et al., 2016). Variables como la elevación, la pendiente, la orientación y los índices derivados del relieve (por ejemplo, el índice de posición topográfica y el índice de rugosidad del terreno) son ampliamente utilizados en los modelos de distribución de especies, ya que permiten representar la heterogeneidad ambiental del paisaje y mejorar la capacidad predictiva de los modelos, especialmente en ecosistemas montañosos (Amatulli et al., 2018).

2.2.6. El Cedro (Cedrela angustifolia)

a) Taxonomía

- **Reino:** Plantae
- **División:** Magnoliophyta (Angiospermas)
- **Clase:** Magnoliopsida (Dicotiledóneas)
- **Orden:** Sapindales
- **Familia:** Meliaceae
- **Género:** *Cedrela*
- **Especies:** *Cedrea angustifolia*

b) Características generales

La *C. angustifolia*, conocida como “cedro blanco”, “cedro de altura” o “atoc cedro”, es una especie arbórea propia de los bosques montanos andinos. Puede alcanzar hasta 51 m de altura y superar los 3 m de diámetro. Se distribuye en un rango altitudinal aproximado de 1800 a 3500 m snm y se distingue por presentar hojas compuestas de tipo pinnado, con folios estrechos. Además, produce frutos en forma de cápsulas leñosas que contienen semillas aladas, las cuales son dispersadas por el viento (SERFOR, 2020b; SERNANP, 2022).

Figura 1

Fotografías de C. angustifolia en el SN Pampa Hermosa

(a)  (b) 

Nota. (a) Individuo conocido localmente como "El Abuelo" de *Cedrela angustifolia*; (b) corteza externa de *Cedrela angustifolia*.

c) Distribución geográfica y ecológica

La *Cedrela angustifolia* es una especie forestal distribuida un 81% en Bolivia, 7% en Perú, 9% en Argentina y 3% en Ecuador, evidenciando una distribución heterogénea y fragmentada en toda la región del bosque montano andino (Ames-Martínez et al., 2025). En el Perú, esta especie se ha reportado en diversas regiones, entre ellas Áncash, Apurímac, Piura, Cusco, Pasco, Cajamarca y Junín (SERFOR, 2020b), su presencia está asociada a gradientes altitudinales, alta humedad atmosférica y marcada estacionalidad de precipitaciones, factores que determinan su nicho ecológico y sensibilidad frente a variaciones climáticas (Ames-Martínez et al., 2025).

d) Importancia ecológica y económica

La *Cedrela angustifolia* constituye una especie forestal de alto valor comercial, destacada por su relevancia tanto ecológica como social dentro de los ecosistemas neotropicales (Terreros et al., 2025). Por encontrarse en cabeceras de cuenca y presentar suelos con alta capacidad de infiltración y retención, además de condiciones climáticas favorables, estos bosques cumplen una función estratégica

en la generación de servicio ecosistémicos, destacando su rol en la provisión y regulación del agua (Llerena et al., 2014). Además contribuye a la biodiversidad del bosque, funcionando como soporte estructural y ecológico, influye en procesos ecológicos clave, como estabilidad del suelo, provisión de hábitat y relaciones biológicas con otras especies, su patrón de crecimiento y su comportamiento ecológico frente a las condiciones climáticas contribuyen a comprender con mayor claridad la capacidad de resiliencia de los bosques montanos ante las variaciones ambientales y climáticos (Acevedo et al., 2017).

El bosque de *C. angustifolia* dentro del Santuario, se calcula que tienen aproximadamente 200 a 300 años de antigüedad (SERNANP, 2022), los árboles viejos de gran tamaño cumplen funciones ecológicas claves, como la regulación de los regímenes hidrológicos, el ciclo de nutrientes y otros procesos ecosistémicos. Además, influye en la distribución y abundancia de individuos de su misma especie y de muchas otras especies vegetales y animales (Lindenmayer & Laurance, 2017).

Las especies del género *Cedrela* tienen un elevado valor económico, ya que su madera es reconocida entre las de mayor calidad a nivel mundial, por este motivo, durante décadas han estado algunas veces a una fuerte presión de extracción, especialmente en las zonas de más fácil acceso (Ayala, 2022; Cardoso & Cuellar, 2016). Un informe forestal señala que la especie de cedro, durante el año 2017, el volumen de madera de cedro exportado alcanzo 646,6747m^3, con destinos como China, México, República Dominicana y Estados Unidos, generando ingresos estimados en 639 310,29 USD (SERFOR, 2019).

e) Estado de conservación y amenazas

En varios países la madera de *Cedrela* se ha utilizado para productos de madera liviana, tales como muebles, tableros, cajas y carpintería ligera, valorada por ser fácil de trabajar y relativamente resistente (Vander, 2015). Debido a la sobrexplotación y perdida de hábitat, se considera vulnerable, su manejo forestal es clave para permitir el aprovechamiento económico sin agotar las poblaciones naturales (Cotrina et al., 2020). El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) ha desarrollado investigaciones orientadas a la restauración, el estudio ecológico y el manejo silvícola de *C. angustifolia*, con énfasis en su reforestación y en la producción de plantones destinadas a recuperar poblaciones degradadas (Cardoso

& Cuellar, 2016). De acuerdo con datos estadísticos del año 2016, la extracción de cedro se llevó a cabo en diez regiones del Perú, entre ellas Amazonas, Junin, Cusco, Huánuco, Cajamarca, Loreto, Madre de Dios, Ucayali, San Martín y Pasco (SERFOR, 2020a).

Entre las amenazas más relevantes se incluyen la explotación intensiva de su madera debido a su elevado valor comercial, la deforestación y la transformación del uso del suelo, cambio climático, baja regeneración natural y la perdida de hábitat (Ames-Martínez et al., 2025; Cotrina et al., 2021; GEOBOSQUES, 2025). Por estas amenazas, según la UICN (2021), esta especie está clasificada en la categoría vulnerable, lo que indica que presenta un elevado riesgo de extinción en estado silvestre a mediano plazo, además, el CITES (2019) lo clasifico en el apéndice II, lo que implica control obligatorio de exportación e importación para evitar su sobreexplotación, para exportar cualquier producto maderable del género *Cedrela* (como madera en trozas, aserrada o chapada), deben declarar sus existencia de stock ante el SERFOR y cumplir requisitos como presentar planes de manejo forestal (SERFOR, 2021a). Asimismo esta categorizada como En Peligro (EN) mediante el Decreto Supremo N. º043-2006-AG, por lo que recibe protección legal.

2.2.7. Modelamiento de Distribución de Especies (MDE)

El modelamiento de Distribución de Especies (MDE) también conocido como *Species Distribution Modeling* (SDM), constituye una herramienta cuantitativa que vincula los registros de presencia de una especie con variables ambientales (Clima, topografía, cobertura vegetal, entre otras) para estimar su distribución geográfica actual y potencial, permitiendo proyectar cambios bajo distintos escenarios climáticos (Hernández et al., 2018; Mateo et al., 2011).

Este instrumento resulta esencial en el ámbito de la ecología y la conservación, ya que aporta de manera significativa a la protección de la biodiversidad al facilitar la identificación de zonas prioritarias para la conservación, así como la evaluación de si las especies están adecuadamente representadas dentro de las Áreas Naturales Protegidas (UICN, 2021; IPBES, 2019). Se utilizan para obtener información ecológica y evolutiva en los ámbitos terrestres, dulceacuícolas y marinos, donde el realismo y la robustez del modelo se ven influenciados por la selección de predictores relevantes y el método de modelado (Benavides et al., 2024). Asimismo,

facilita analizar los efectos del cambio climático al proyectar posibles variaciones en la distribución de las especies bajo diferentes escenarios climáticos futuros, lo que permite identificar procesos de perdida de hábitat, fragmentación y desplazamientos altitudinales y latitudinales (Timaná & Cuentas, 2015; SERFOR, 2020b). Del mismo modo, esta herramienta aporta al manejo y la planificación territorial, respaldando la toma de decisiones en el ordenamiento territorial y el uso del suelo (Araujo, 2024; Zhang et al., 2012). Además, promueve el uso sostenible de los recursos naturales al permitir la identificación de zonas aptas para su manejo, la evaluación de riesgos de sobreexplotación y la planificación de acciones de restauración ecológica (Torres Silva, 2023; Cotrina et al., 2021). Finalmente, también resulta clave para el monitoreo y control de especies invasoras, contribuyendo a la prevención y mitigación de sus impactos ecológicos (Mengistu et al., 2023).

De acuerdo con Mateo et al. (2011), las diversas metodologías empleadas en el modelamiento de la distribución de especies pueden agruparse en tres categorías. (1) Técnicas discriminantes, que requieren información tanto de presencia como de ausencia para construir los clasificadores; entre las más utilizadas se incluyen *Classification and Regression Trees* (CART), *Random Forest*, *Mixture* Discriminant Analysis y el método de *máxima entropía* (MaxEnt), entre otros. En el caso de MaxEnt, los datos de ausencia no necesitan ser proporcionados directamente, debido a que el algoritmo genera datos de fondo (*background*) a partir de las condiciones ambientales disponibles. (2) Técnicas descriptivas, las cuales se basan únicamente en datos de presencia y representan las primeras aproximaciones empleadas en el modelamiento de la distribución de especies; dentro de este grupo se encuentran métodos como Convex Hull, BIOCLIM, ANUCLIM y BIOMAP. (3) Técnicas mixtas, las cuales combinan reglas descriptivas y discriminantes, y además generan sus propias pseudo - ausencias para mejorar el ajuste y la capacidad predictiva de los modelos.

2.2.8. Escenarios Climáticos: conceptos y tipologías

Un escenario futuro de cambio climático consiste en una proyección científica que plantea cómo podrían modificarse las condiciones climáticas a nivel global en el tiempo, considerando distintos supuestos relacionados con las emisiones de gases

de efecto invernadero, el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y las políticas orientadas al clima (IPCC, 2014).

Figura 2

Escenarios climáticos de SSP

	SSP1-1.9 'Sustainability'	SSP1-2.6 'Sustainability'	SSP2-4.5 'Middle of the road'	SSP3-7.0 'Regional rivalry'	SSP5-8.5 'Fossil-fuelled development'
RCP equivalent	No equivalent RCP	RCP2.6	RCP4.5	No equivalent RCP	RCP8.5
	The way the world might change in the future				
Emissions reduction	Very high and immediate	High and immediate	Moderate from 2040s	None	None
Energy sources	Renewables	Renewables and biofuels	Renewables and fossil fuels	Fossil fuels	Increased fossil fuels
Carbon dioxide removal	New technology	New technology	None	None	None
Global socio-economic trends	Gradual move towards sustainability and environmental respect; increasing action towards Sustainable Development Goals (SDGs)	Gradual move towards sustainability and environmental respect; increasing action towards SDGs	Similar to the past; unevenly distributed; slow progress towards SDGs	Slow growth at the expense of the environment and increasingly unequal	Rapid growth at the expense of the environment; resource-intensive lifestyles and industries; dependence on technological solutions
	What the future climate may look like under each SSP				
Global warming by 2100	1.0–1.8 °C	1.3–2.4 °C	2.1–3.5 °C	2.8–4.6 °C	3.3–5.7 °C
Resulting global warming levels*	Overshoots 1.5 °C slightly around 2050 then returns and stabilises near 1.5°C by 2100	Reaches 2 °C around 2050s and stabilises	Reach 2 °C around 2050s 2.7 °C by 2100	Reach 2 °C around 2050s 3 °C around 2070s 4 °C possible by 2100	Reach 2 °C around 2050s 3 °C around 2060s 4 °C by around 2080s

Nota. Tomado de Climate Change 2021: The Physical Science Basis, por IPCC (2021).

La Figura 2 representa los escenarios climáticos RCP y SSP que son marcos de escenarios utilizados para analizar el cambio climático, pero difieren en su enfoque contenido y aplicación, el RCP (vías de concentración representativas), describen las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y tienen como propósito principal caracterizar posibles escenarios climáticos futuros según los niveles de emisión (IPCC, 2014).

Por otro lado, tenemos las SSP (Vías socioeconómicas compartidas), fueron desarrollados para enriquecer los antiguos escenarios RCP incorporando dimensiones socioeconómicas globales como crecimiento demográfico, economía, uso de suelo y políticas climáticas, lo que da escenarios más completos y realistas para estudiar cambios futuros (IPCC, 2021).

Estos escenarios climáticos de SSP se emparejan con niveles de forzamiento radiactivo para generar trayectorias de cambio climático que se consideran tanto emisiones como aspectos socioeconómicos, publicado en el 2021 en el sexto informe de evaluación (IE6) CMIP6.

2.3. Definición de términos

a) AUC (Área Bajo la Curva)

Es una medida que evalúa la capacidad discriminativa de un modelo de distribución de especies mediante el área bajo la curva ROC (AUC). Sus valores varían entre 0 y 1; los valores más cercanos a 1 indican una mayor capacidad del modelo para diferenciar condiciones asociadas a la presencia de la especie de aquellas no asociadas (Merow et al., 2013).

b) MaxEnt (Máxima Entropía)

Es un algoritmo de modelamiento que utiliza registros de presencia y variables ambientales para estimar la distribución potencial de una especie, mediante la búsqueda de la distribución de máxima entropía bajo las condiciones ambientales asociadas a los registros de presencia (Harris et al., 2024).

c) Idoneidad ambiental

Es una estimación continua del grado de adecuación de las condiciones ambientales de un área para la presencia potencial de una especie. Los valores más altos indican una mayor correspondencia con las condiciones ambientales asociadas a sus registros (Bradley et al., 2024).

d) Multicolinealidad

Es una condición estadística en la que dos o más variables independientes presentan una alta clasificación entre sí, generando información redundante y pudiendo afectar la interpretación y desempeño de los modelos (Negi et al., 2025).

e) Umbral de corte:

Es el valor límite utilizado para transformar una predicción continua de idoneidad ambiental en una clasificación binaria (presencia potencial/ausencia potencial), permitiendo delimitar áreas adecuadas para una especie (Yu et al., 2024).

f) Cambio espacial:

Es la modificación en la ubicación, extensión o configuración geográfica de la distribución potencial de una especie entre diferentes condiciones temporales o ambientales. Puede expresarse mediante áreas de pérdida, ganancia y estabilidad, así como por el desplazamiento de la distribución entre condiciones actuales y futuras (Lawlor et al., 2024).

III. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque, tipo, nivel y diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basó en el procesamiento y análisis de variables ambientales cuantitativas (bioclimáticas y topográficas) mediante técnicas de análisis espacial y modelamiento de distribución de especies, con la finalidad de determinar la distribución potencial actual y proyectar la distribución potencial futura de *C. angustifolia*. Este enfoque permitió analizar datos cuantificables mediante procedimientos sistemáticos para responder al objetivo de investigación (Hernández-Sampieri et al., 2014).

El estudio fue de tipo aplicado, debido a que empleó herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de distribución de especies para analizar la distribución espacial actual y proyectar la distribución futura de *Cedrela angustifolia* bajo diferentes escenarios de cambio climático en el Santuario Nacional Pampa Hermosa. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2018), la investigación aplicada se orienta a la adquisición de nuevos conocimientos con una finalidad práctica específica.

El nivel de investigación es predictivo, debido a que mediante el modelamiento de distribución de especies (MaxEnt) se proyectó la distribución potencial futura de *Cedrela angustifolia* bajo diferentes escenarios de cambio climático. La caracterización de la distribución potencial actual permitió establecer una línea base para evaluar los cambios potenciales en la distribución de la especie bajo escenarios climáticos futuros (Elith et al., 2011; Rivero et al., 2021).

El diseño de la investigación fue no experimental, debido a que no se manipularon las variables de estudio, sino que se analizaron los registros de presencia de *Cedrela angustifolia* y las variables ambientales disponibles para estimar su distribución potencial (Hernández-Sampieri et al., 2014).

3.2. Área de Estudio

a) Santuario Nacional Pampa Hermosa

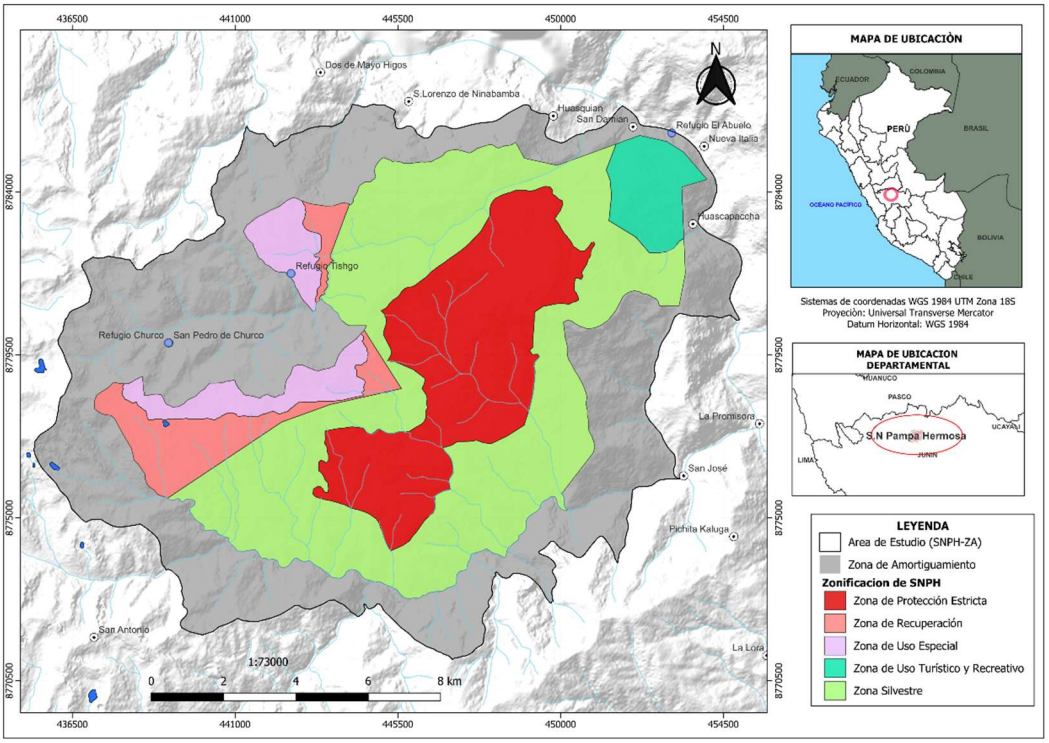
La Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) explica que las areas naturales protegidas son destinadas a la protección de la naturaleza mediante instrumentos legales y sistemas de gestión efectivos. En Perú, se registra

259 areas naturales protegidas (ANP), estas ANP representa alrededor del 18,64% del territorio terrestre nacional y un 7,89% de soberanía marina (Andina, 2025; SERNANP, 2026).

El Santuario Nacional Pampa Hermosa es un área natural protegida del Perú, establecida el 26 de marzo de 2009 mediante el Decreto Supremo N° 005-2009-MINAM, su objetivo principal es asegurar la protección de una porción representativa de los bosques montanos tropicales de la selva central del Perú. Estos ecosistemas se caracterizan por su alta riqueza biológica, donde destacan especies endémicas o con distribución limitada, además de diversos grupos taxonómicos de gran valor científico (SERNANP, 2022).

Figura 3

Mapa de zonificación del SN Pampa Hermosa



Nota. Mapa de zonificación del SN Pampa Hermosa. Elaboración a partir de los shapefiles de zonificación proporcionados por la Jefatura del SN Pampa Hermosa.

La Figura 3 muestra la zonificación del Santuario Nacional Pampa Hermosa en las cuales se clasifican en cinco sectores de manejo y gestión: (1) protección estricta, para la conservación con acceso restringido; (2) recuperación, destinada a restaurar áreas alteradas; (3) uso especial, donde se regulan actividades preexistentes; (4) uso

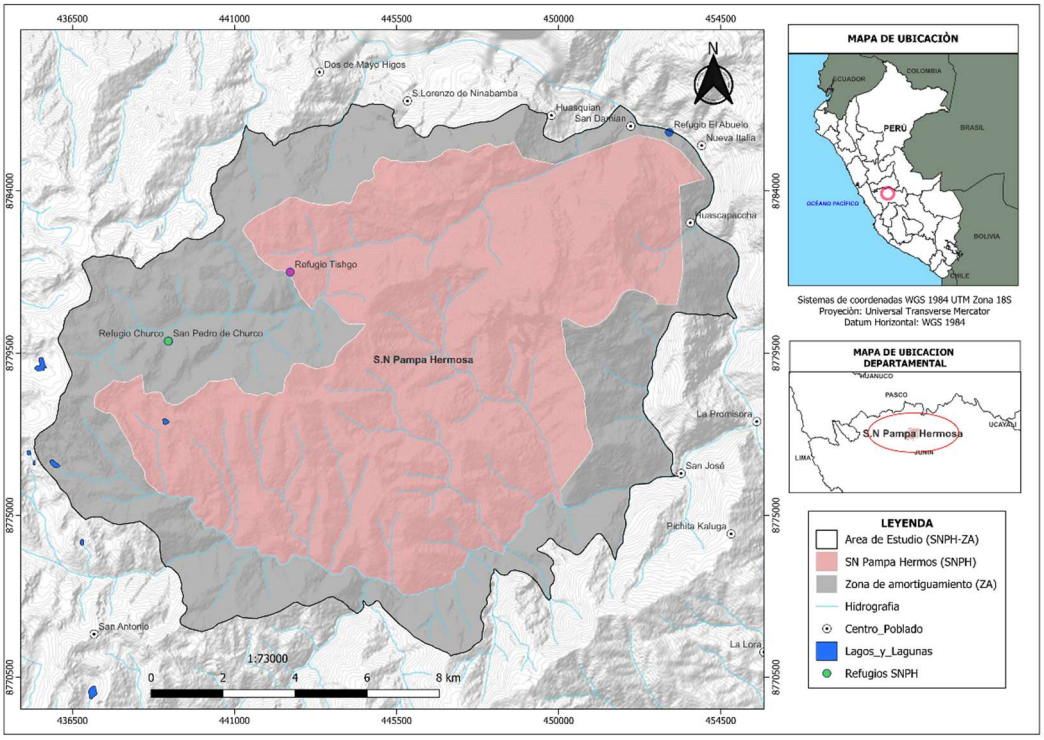
turístico y recreativo, para actividades de visita compatibles con la conservación; y (5) zona silvestre, orientada a mantener los ecosistemas naturales permitiendo actividades de bajo impacto. Además, cuenta con una zona de amortiguamiento que contribuye a reducir los impactos externos sobre el área protegida (SERNANP, 2022).

b) Ubicación geográfica

El estudio se desarrolló en el Santuario Nacional Pampa Hermosa (SNPH), con una superficie de 11 543,74 ha, mientras que su zona de amortiguamiento (ZA) abarca aproximadamente 8 658,49 ha. Dado que esta investigación también consideró la ZA, el área total de estudio fue de 20 202,23 ha (SERNANP, 2022).

Figura 4

Mapa de Ubicación del área de estudio



Nota. Ubicación geográfica nacional, departamental y local del área de estudio. Elaboración a partir del shapefiles proporcionados por la Jefatura del SN Pampa Hermosa.

La Figura 4 se muestra la ubicación geográfica del Santuario Nacional Pampa Hermosa, situado en el departamento de Junín, en las provincias de Tarma y Chanchamayo, específicamente en los distritos de Huasahuasi y Chanchamayo.

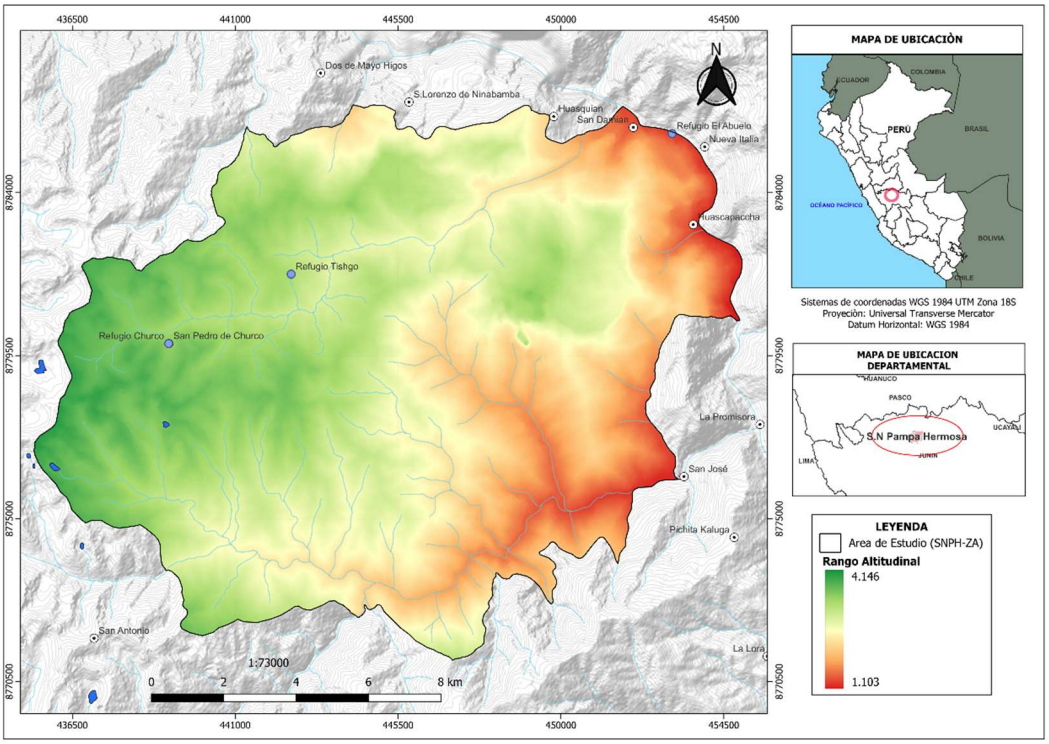
Asimismo, se delimitan el área del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento, que en conjunto constituyen el ámbito espacial considerado en el presente estudio.

c) Características geográficas

En los ecosistemas montañosos, donde los procesos ecológicos dependen en gran medida de la altitud y de la constante presencia de neblina, la clasificación de ecorregiones elaborada por el Centro de Datos para la Conservación (CDC, 2006), identifica en el Santuario Nacional Pampa Hermosa principalmente dos unidades: la puna húmeda y las yungas.

Figura 5

Mapa de rango altitudinal del área de estudio



Nota. Mapa de altitud elaborada elaborado a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del satélite ALOS PALSAR. El rango altitudinal del área varía entre 1103 y 4146 m snm.

La Figura 5 muestra el rango altitudinal dentro del área de estudio, que se encuentra desde 1138 hasta 4146 m snm. Además, las yungas peruanas se extienden aproximadamente entre los 1400 y 3900 m snm. y se caracterizan por una elevada nubosidad, variación climática altitudinal, orografía accidentada y diversidad de

formaciones vegetales, con temperaturas medias anuales cercanas a 25,6ºC y precipitaciones promedio que alcanzan los 4378mm anuales. Por su parte, la puna húmeda se distribuye aproximadamente entre los 3450 y 3950 m snm., la temperatura promedio anual varía aproximadamente entre 7 ºC y 0 ºC, en tanto que la precipitación media puede llegar hasta los 700 mm por año (SERNANP, 2022).

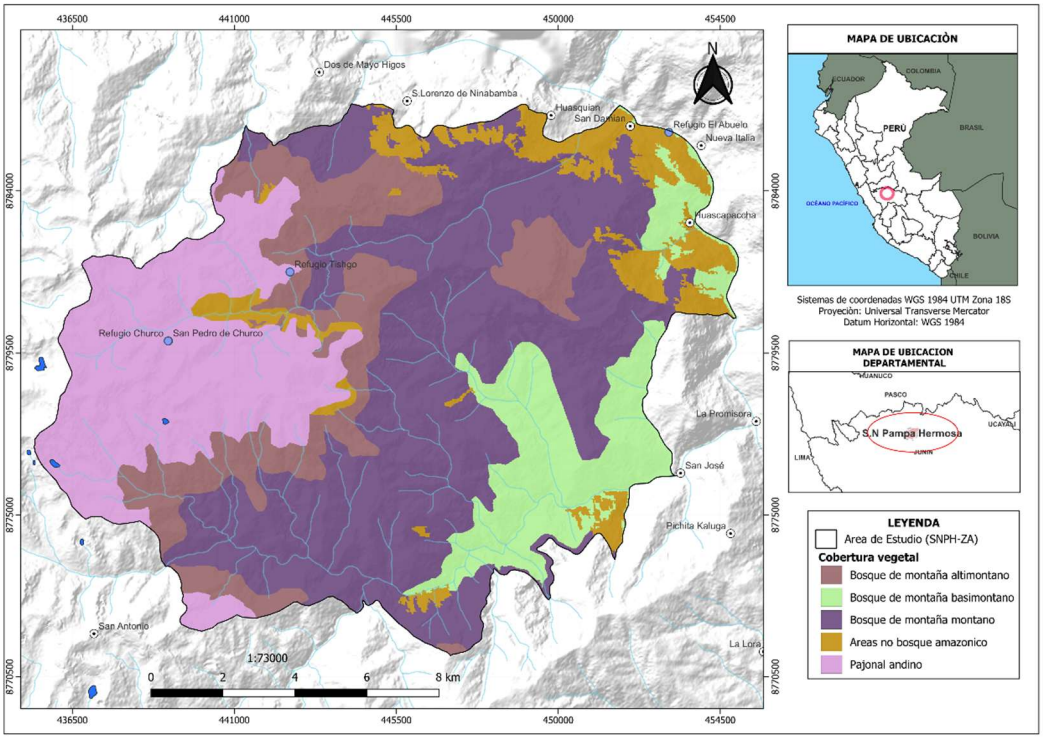
El SN Pampa Hermosa se localiza entre las subcuencas de los ríos Ulcumayo y Casca, las cuales forman parte de la cuenca del río Amazonas. En su interior se originan numerosas microcuencas y cursos de agua, entre los que destacan Mesapata, Mayoc, Pistachaca y Huascapaccha, además de diversos riachuelos que alimentan los ríos Ulcumayo y Casca (SERNANP, 2022). Esta red hidrográfica desempeña un papel fundamental en la regulación hídrica y en el mantenimiento de los bosques montanos húmedos del área protegida.

d) Cobertura vegetal

El Santuario Nacional de Pampa Hermosa está conformado principalmente por dos tipos de ecosistemas, pero estas a la vez se dividen en 5 tipos de cobertura vegetal.

Figura 6

Mapa de la cobertura vegetal del área de estudio



Nota. Elaboración a partir del Mapa de cobertura Vegetal (MINAM, 2015).

La Figura 6 muestra diferentes coberturas vegetales predominantes distribuidas dentro del área de estudio, se identifican cinco tipos principales dentro del Santuario y su zona de amortiguamiento: (1) el pajonal andino, donde predominan especies de gramíneas como ichu, festuca, calamagrostis entre otros; (2) areas no bosque amazónico, corresponden a superficies de la región amazónica que han perdido su cobertura boscosa original; (3) el bosque de montaña montano, caracterizada por condiciones húmedas, vegetación densa y una elevada diversidad de especies; (4) el bosque de montaña basimontano, formación boscosa que se desarrolla en las laderas de la vertiente oriental de los andes en zonas de menor latitud; y (5) bosque de montaña altimontano, se encuentran por encima de los bosques de montaña montano y cerca del límite con los pajonales altoandinos (MINAN, 2015; SERNANP, 2022).

3.3. Ámbito temporal y espacial

3.3.1. Ámbito temporal

El ámbito temporal comprendió el período climático de referencia 1981-2010, utilizado para caracterizar la distribución potencial actual de *Cedrela angustifolia*, y el horizonte temporal futuro 2041-2070, empleado para proyectar su distribución potencial bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. El período futuro correspondió a un horizonte de proyección basado en condiciones climáticas simuladas, y no a un período de observación o seguimiento directo de la especie.

3.3.2. Ámbito espacial

El estudio se desarrolló en el ámbito espacial del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento, ubicados en el departamento de Junín, específicamente en los distritos de Chanchamayo y Huasahuasi.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población estuvo constituida por el bosque de *Cedrela angustifolia* correspondientes al Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. El tamaño de la población no fue determinado, debido a que no se realizó un inventario exhaustivo de todos los registros de presencia de la especie en el ámbito de estudio.

3.4.2. Muestra

La muestra estuvo conformada inicialmente por 40 individuos de *Cedrela angustifolia*, con registros georreferenciados, cada uno correspondiente a un individuo diferente de la especie. Estos registros fueron obtenidos mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, basado en su disponibilidad, identificación taxonómica y confiabilidad de la información geográfica, y constituyeron el conjunto inicial de registros de presencia disponible para el estudio.

Posteriormente, los 40 registros iniciales fueron sometidos a un procedimiento de adelgazamiento espacial (*spatial thinning*), con el propósito de reducir la dependencia espacial entre registros cercanos y evitar una representación excesiva de determinadas localidades en el modelamiento. Como resultado de este proceso, se conservaron 35 individuos de *Cedrela angustifolia* espacialmente independientes, los cuales constituyeron el conjunto final de registros de presencia utilizado para la calibración del modelo MaxEnt.

3.5. Técnicas e instrumentos

3.5.1. Técnicas

- Modelamiento de distribución de especies mediante el algoritmo MaxEnt (Maximun Entropy).
- Análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.5.2. Instrumentos

- Base de datos georreferenciada de registros de presencia de *Cedrela angustifolia.*
- Capas bioclimáticas (CHELSA v2.1)
- Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR 12.5m.
- Capas ambientales derivadas (pendiente, TRI y TPI).
- Software MaxEnt versión 3.4.4
- Software Qgis versión 3.40
- Software Rstudio versión 4.2.2

3.6. Procedimientos

3.6.1. Recopilación de datos

a) Obtención de presencia de *Cedrela angustifolia*

Se recopilaron registros georreferenciados de presencia de *Cedrela angustifolia* a partir de fuentes digitales de información sobre biodiversidad, entre ellas GBIF (https://www.gbif.org/es/) e iDigBio (https://portal.idigbio.org/portal/search), así como de presencia georreferenciados proporcionados por la Jefatura del Área Natural Protegida. Para establecer un número de registros adecuado para el modelamiento, se consideró como referencia metodológica el uso de al menos 30 registros de presencia, criterio reportado en estudios previos de modelamiento de distribución de especies (Avaligbé et al., 2021; Irem & Orhan, 2024; Naranjo et al., 2014). Los registros recopilados fueron revisados para verificar su ubicación geográfica, correspondencia taxonómica y ausencia de duplicados, antes de ser utilizados en las etapas posteriores del modelamiento.

b) Obtención variables ambientales

-Variables climáticas

Se descargan las 19 variables bioclimáticas ampliamente recomendadas y utilizadas en estudios de modelamiento de distribución de especies (Chamochumbi, 2023; Khanal et al., 2022; Medina et al., 2021). Estas variables se obtuvieron de la base de datos CHELSA versión 2.1 (https://www.chelsa-climate.org/), utilizando el modelo climático global MPI-ESM1-2-HR, perteneciente al conjunto de modelos climático de la sexta fase del Coupled Model Intercomparison Profect (CMIP6).

Para las condiciones climáticas actuales, se utilizaron los datos correspondientes al periodo 1981-2010. Para las proyecciones futuras, se descargaron datos correspondientes al periodo 2041-2070 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. La selección del periodo futuro se realizó considerando su utilidad para evaluar posibles modificaciones en la distribución de especies y generar información aplicable a la planificación de medidas de conservación y adaptación frente al cambio climático (Chamochumbi, 2023; Khanal et al., 2022; Scafetta, 2024). Todos los archivos se descargaron en formato .zip, cada conjunto contuvo las 19 capas bioclimáticas en formato GeoTIFF(.tif), con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente $1Km^2$).

-Variables Topográficos

Para este estudio se consideró variables topográficas, primeramente, se descargó la capa del Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución espacial de 12.5 m, proveniente del satélite ALOS PALSA, mediante el portal Alaska Satellite Facility (ASF) (https://search.asf.alaska.edu/#/). El DEM fue recortado al ámbito del estudio utilizando QGIS versión 3.40 y, a partir de este, se generaron las variables índice de posición topográfica (TPI), índice de rugosidad del terreno (TRI) y pendiente, utilizadas para representar la variabilidad espacial del relieve (Guillaume et al., 2024; Patiño et al., 2023).

3.6.2. Estandarización de la base de datos

a) Estandarización del registro de presencia de *C. angustifolia*

Los registros de presencia de *Cedrela angustifolia* fueron integrados en una base de datos en formato CSV (valores separados por comas), conformada por tres campos: especie, longitud y latitud. Posteriormente, los registros fueron transformados al sistema de referencia WGS 84/UTM, zona 18 Sur (EPSG:32718), para su procesamiento y análisis espacial.

b) Estandarización de las variables ambientales

Se realizó el *downscaling* estadístico a las 19 variables bioclimáticas de CHELSA v2.1, cuya resolución espacial original es de aproximadamente 1 km, hasta una resolución final de 12,5 m; mediante regresión ponderada geográficamente *Geographically Weighted Regression* (GWR), utilizando predictores topográficos de alta resolución (Tu & Duan, 2024; Wang et al., 2021). El procedimiento se aplicó individualmente a cada variable bioclimática, considerando como predictores la elevación, pendiente, orientación y el índice de posición topográfica (TPI), con el fin de incorporar la variabilidad espacial asociada a las características del relieve (Xu et al., 2015). Mediante el modelo GWR se estimó localmente la relación entre cada variable bioclimática y los predictores topográficos, considerando la variación espacial de dichas relaciones dentro del área de estudio (Sun et al., 2022). El *downscaling* permitió generar capas climáticas de mayor resolución espacial para su posterior utilización en el modelamiento, sin asumir que la resolución espacial alcanzada representa una precisión observacional equivalente. El desempeño del *downscaling* se evaluó mediante dos procedimientos de validación: validación

independiente y validación cruzada espacial mediante cinco *folds* (Liu et al., 2018; Wang et al., 2021).

Posteriormente, las capas bioclimáticas y topográficas fueron preparadas para la selección de variables y el modelamiento de la distribución potencial. Se organizaron las 19 variables bioclimáticas correspondientes a las condiciones actuales y a los escenarios futuros SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, junto con las variables topográficas utilizadas durante el proceso de *downscaling.* Las capas fueron exportadas en formato ASCII Grid (*.asc), manteniendo una extensión espacial común, el mismo sistema de referencia, resolución espacial y alineación de píxeles. Finalmente, se verificó la correspondencia espacial entre las capas y la presencia de valores NoData, con el propósito de garantizar su compatibilidad e integridad para los análisis posteriores.

3.6.3. Selección de variables ambientales predictoras

La selección de las variables ambientales predictoras se realizó mediante una secuencia de análisis orientada a reducir la redundancia y la multicolinealidad entre los predictores. De las 23 variables inicialmente disponibles, se identificaron grupos de variables correlacionadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson, considerando un valor absoluto de $|r| \geq 0{,}70$, y mediante un análisis de agrupamiento representado en un dendrograma (Cotrina et al., 2020; Gotelli & Ellison, 2013; Schober & Schwarte, 2018). Posteriormente, las variables de cada grupo fueron evaluadas mediante un modelo preliminar en MaxEnt, considerando la contribución porcentual, la importancia por permutación y el análisis Jackknife. La selección se complementó con la relevancia ecológica de las variables para la especie (Sánchez et al., 2021). Finalmente, las variables preseleccionadas fueron sometidas a un análisis de multicolinealidad mediante el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), estableciendo como criterio de aceptación un valor < 5. Este procedimiento permitió conformar un conjunto reducido de variables ambientales con menor redundancia para el modelamiento final (De Marco & Nóbrega, 2018; Guisan et al., 2017).

3.6.4. Aplicación de spatial thinning

Debido a la concentración espacial de algunos registros de presencia, se aplicó un procedimiento de adelgazamiento espacial (*spatial thinning*) con el propósito de

reducir la agrupación de las ocurrencias y minimizar la posible dependencia espacial y el sesgo asociado al esfuerzo de muestreo en el modelamiento de distribución (Aiello-Lammens et al., 2015; Baker et al., 2024). Para determinar una distancia de separación adecuada, se evaluaron distancias mínimas de 13, 20, 25 y 50 m. La selección de la distancia de *thinning* se realizó considerando la resolución espacial de los predictores ambientales, el grado de autocorrelación espacial, la cantidad de registros de presencia conservados y su efecto sobre el desempeño del modelo y el área potencial estimada. La autocorrelación espacial se evaluó mediante el índice de Moran (Moran's I), utilizando los valores de los predictores ambientales asociados a los registros de presencia (Ahmad & Gopi, 2025). Asimismo, se consideró que distancias de *thinning* mayores pueden reducir considerablemente el número de ocurrencias disponibles y no necesariamente aumentar el desempeño del modelo, por lo que su aplicación debe guardar un equilibrio entre la reducción de la dependencia espacial y la conservación de registros suficientes para el modelamiento (Ten Caten & Dallas, 2023).

3.6.5. Modelamiento de distribución potencial de C. angustifolia

Se empleó el software MaxEnt versión 3.4.4, basado en el algoritmo de máxima entropía, para estimar la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* bajo las condiciones climáticas actuales (1981-2010) y proyectarla para el periodo futuro (2041-2070). El modelo utiliza registros de presencia y datos de fondo para caracterizar las condiciones ambientales disponibles en el área de estudio, por lo que no requiere registros de ausencia (Liao et al., 2025; Novoseltseva, 2024), La elección de este método fue pertinente debido a la disponibilidad de datos de presencia y al número limitado de registros, considerando que MaxEnt puede utilizarse con muestras relativamente pequeñas, aunque su desempeño depende de la calidad, distribución espacial y representatividad ambiental de los registros (Avaligbé et al., 2021; Irem & Orhan, 2024; Naranjo et al., 2014).

Como datos de entrada se utilizaron los registros de presencia previamente depurados y las capas ambientales seleccionadas mediante el procedimiento descrito anteriormente. Se utilizaron 10 000 puntos de fondo, seleccionados aleatoriamente por MaxEnt, para caracterizar las condiciones ambientales disponibles en el área de estudio. Asimismo, se activó la opción *Remove duplicate*

presence records para eliminar registros espacialmente duplicados dentro de una misma celda ambiental y evitar una representación desproporcionada de determinadas condiciones ambientales en el ajuste del modelo (Souza et al., 2020; Washaya & Manyangadze, 2025).

El modelo se configuró con un multiplicador de regularización de 2, con el propósito de controlar la complejidad del modelo y reducir el riesgo de sobreajuste. La regularización constituye un mecanismo importante para controlar la complejidad de los modelos MaxEnt y favorecer una representación más generalizable de la relación entre las ocurrencias y las variables ambientales (Mateo et al., 2011; Merow et al., 2013). Se realizaron 10 réplicas mediante el procedimiento de validación cruzada (*cross-validation*) implementado en MaxEnt, utilizando diferentes particiones de los registros de presencia para el entrenamiento y la evaluación del modelo. El desempeño se evaluó mediante el Área Bajo la Curva (AUC) de la curva ROC, calculando el promedio y la desviación estándar entre las réplicas. Asimismo, la variabilidad espacial de las predicciones se evaluó mediante la desviación estándar de los mapas obtenidos entre las réplicas (Avaligbé et al., 2021; Irem & Orhan, 2024).

La salida del modelo se generó mediante la transformación *cloglog* y las predicciones continuas fueron exportadas en formato raster ASCII (*.asc*) para su posterior procesamiento espacial. Para representar la distribución potencial se utilizó la predicción promedio (AVG) de las réplicas. Posteriormente, la predicción continua se transformó en un mapa binario mediante el umbral *Maximum Training Sensitivity Plus Specificity* (MTSS), diferenciando las áreas potencialmente idóneas de aquellas consideradas no idóneas (Pliscoff & Fuentes, 2011). Finalmente, los mapas binarios fueron utilizados para cuantificar la distribución potencial bajo las condiciones actuales y futuras y, posteriormente, determinar las áreas de pérdida, ganancia y estabilidad entre los escenarios evaluados (Xiang et al., 2025).

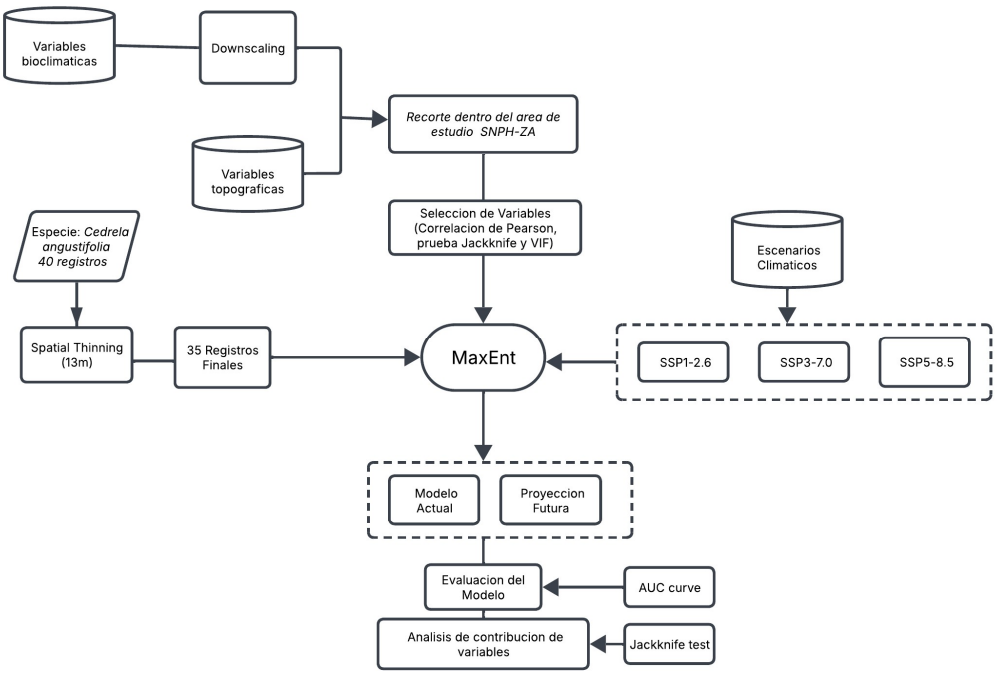
3.6.6. Contribución de las variables ambientales en la distribución potencial

Para determinar la importancia relativa de las variables ambientales en la predicción de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia*, se empleó el análisis de Jackknife implementado en el algoritmo MaxEnt, complementado con la evaluación de la contribución porcentual y la importancia por permutación para

cada una de las proyecciones. Estas métricas permitieron evaluar el aporte relativo de cada variable a la capacidad predictiva del modelo y determinar cuáles variables contienen más información para explicar la distribución potencial de la especie (Mahatara et al., 2021; Miller et al., 2012).

Figura 7

Diagrama del flujo metodológico de la investigación



Nota. Resumen de las etapas metodológicos desarrolladas en la investigación.

3.7. Análisis de datos

Los datos fueron procesados y analizados mediante herramientas estadísticas, espaciales y de modelamiento, con el propósito de estimar la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* bajo las condiciones climáticas actuales y futuras. El procesamiento espacial se realizó mediante QGIS versión 3.40, los análisis estadísticos mediante RStudio versión 4.2.2 y el modelamiento de distribución mediante MaxEnt versión 3.4.4.

Los registros de presencia fueron sometidos a un procedimiento de adelgazamiento espacial (*spatial thinning*) para reducir la concentración espacial de las presencias y la posible dependencia espacial entre los registros (Aiello-Lammens et al., 2015; Baker et al., 2024). Se evaluaron diferentes distancias mínimas de separación y se

analizó la autocorrelación espacial mediante el índice de Moran (Moran's I). Las variables ambientales fueron evaluadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) y un análisis de agrupamiento representado mediante dendrograma, con el propósito de identificar relaciones entre los predictores y reducir la redundancia de información (Gotelli & Ellison, 2013; Schober & Schwarte, 2018). Posteriormente, las variables preseleccionadas fueron evaluadas mediante un modelamiento preliminar en MaxEnt, considerando la contribución porcentual, la importancia por permutación y el análisis de Jackknife (Mahatara et al., 2021; Miller et al., 2012). Finalmente, la multicolinealidad se evaluó mediante el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), utilizando como criterio un valor inferior a 5 (De Marco & Nóbrega, 2018; Guisan et al., 2017).

Las variables bioclimáticas fueron sometidas a un proceso de *downscaling* estadístico mediante regresión ponderada geográficamente (GWR). El desempeño de las capas climáticas generadas se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio normalizado (nRMSE) y el error absoluto medio normalizado (nMAE), mediante procedimientos de validación independiente y validación cruzada espacial (Tu & Duan, 2024b; Wang et al., 2021).

La distribución potencial de *C. angustifolia* se estimó mediante el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), utilizando los registros de presencia y las variables ambientales seleccionadas. MaxEnt permite estimar la distribución potencial a partir de datos de presencia y condiciones ambientales disponibles en el área de estudio (Elith et al., 2011). Las predicciones continúas obtenidas mediante MaxEnt fueron transformadas en mapas binarios utilizando el umbral *Maximum Training Sensitivity Plus Specificity* (MTSS). A partir de estos mapas se calculó la superficie de distribución potencial y se determinaron los cambios espaciales entre las condiciones actuales y futuras, diferenciando las áreas de pérdida, ganancia y estabilidad. Asimismo, se calcularon los centroides de las áreas potencialmente adecuadas y la distancia entre sus posiciones para estimar el desplazamiento espacial de la distribución potencial bajo los diferentes escenarios climáticos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

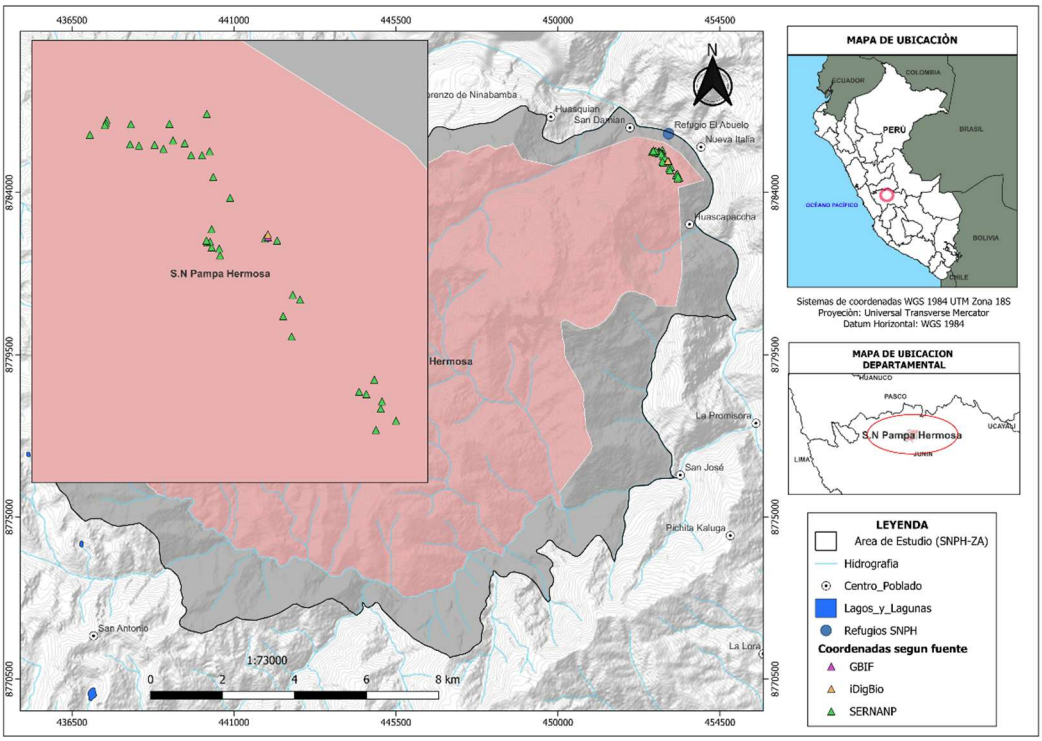
4.1.1. Desempeño y preparación del modelo

a) Obtención de base de datos

Se recopilaron los registros de presencia georreferenciados de *Cedrela angustifolia* y las variables ambientales, que incluyen variables bioclimáticas y topográficas.

Figura 8

Mapa de ubicación de los registros de presencia



Nota. Registros de presencia georreferenciados de *Cedrela angustifolia*, diferenciados según la fuente de recopilación de los datos.

La Figura 8 muestra la ubicación geográfica de los 40 individuos de *Cedrela angustifolia*, obtenidos dentro del área de estudio con sus respectivas coordenadas geográficas en UTM (ANEXO 1). De este total, 38 registros fueron proporcionados por la Jefatura del Santuario Nacional Pampa Hermosa y correspondieron a información de campo, mientras que 2 registros adicionales fueron obtenidos de las plataformas digitales de biodiversidad GBIF e iDigBio.

Tabla 3

Variables bioclimáticas descargadas

N.º	Variables Bioclimáticas	Distribución Actual	Distribución futura		
		Periodo	Periodo 2041-2070		
		1981-2010	SSP1 - 2.6	SSP3 - 7.0	SSP5 - 8.5
1	BIO1	Temperatura media anual			
2	BIO2	Rango medio diurno			
3	BIO3	Isotermalidad			
4	BIO4	Estacionalidad de la temperatura			
5	BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido			
6	BIO6	Temperatura mínima del mes más frio			
7	BIO7	Rango anual de temperatura			
8	BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo			
9	BIO9	Temperatura media del trimestre más seco			
10	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido			
11	BIO11	Temperatura media del trimestre más frio			
12	BIO12	Precipitación anual			
13	BIO13	Precipitación del mes más húmedo			
14	BIO14	Precipitación del mes más seco			
15	BIO15	Estacionalidad de la precipitación			
16	BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo			
17	BIO17	Precipitación del trimestre más seco			
18	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido			
19	BIO19	Precipitación del trimestre más frio			

La Tabla 3 muestra las 19 variables bioclimáticas obtenidas para representar las condiciones de temperatura y precipitación del área de estudio que se descargaron del periodo de 1981-2010 y el periodo de 2041-2070 para los tres escenarios. Estas variables comprenden indicadores relacionados con valores medios, rangos y estacionalidad de la temperatura y la precipitación, y fueron consideradas como insumos ambientales para las etapas posteriores de selección de variables y modelamiento.

Tabla 4

Variables topográficas obtenidas

Nª	Variables topográficas	Unidad
1	Altitud	m
2	Pendiente	%
3	TRI (Índice de rugosidad del terreno)	Adimensional
4	TPI (Índice de posición topográfica)	m

La Tabla 4 muestra las cuatro variables topográficas obtenidas a partir del modelo digital de elevación (DEM) utilizado en el estudio. Las variables representaron diferentes características del relieve del área de estudio, incluyendo la altitud, pendiente, rugosidad y posición topográfica. Las capas obtenidas presentaron una resolución espacial de 12,5 m y fueron estandarizadas espacialmente para su utilización en las etapas posteriores del análisis.

b) Desempeño del downscaling estadístico

Para evaluar el desempeño del *downscaling* estadístico de las variables bioclimáticas se realizaron dos procedimientos de validación: una validación independiente y una validación cruzada espacial mediante cinco folds. En ambos procedimientos se calcularon el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio normalizada (nRMSE) y el error absoluto medio normalizado (nMAE) para cada variable bioclimática. Los valores presentados en las Tablas 5 y 6 corresponden a los promedios de las métricas obtenidas durante las respectivas validaciones.

Tabla 5

Validación independiente del Downscaling

Variable	R^2 promedio	nRMSE promedio (%)	nMAE promedio (%)
BIO1	0,989	2,52	1,49
BIO2	0,736	4,70	3,30
BIO3	0,898	6,59	4,81
BIO4	0,976	3,76	2,74
BIO5	0,989	2,51	1,49
BIO6	0,989	2,50	1,50

BIO7	0,934	5,62	4,16
BIO8	0,989	2,54	1,51
BIO9	0,989	2,51	1,49
BIO10	0,989	2,53	1,51
BIO11	0,989	2,51	1,49
BIO12	0,960	4,56	2,48
BIO13	0,783	10,30	7,45
BIO14	0,965	4,88	2,45
BIO15	0,967	4,55	2,76
BIO16	0,957	4,68	2,60
BIO17	0,963	5,02	2,50
BIO18	0,813	4,42	2,39
BIO19	0,963	5,02	2,50

Nota. R^2 = coeficiente de determinación; nRMSE = raíz del error cuadrático medio normalizada; nMAE = error absoluto medio normalizado. Los valores corresponden a los promedios obtenidos durante el procedimiento de validación.

En la Tabla 5 muestra los valores promedio entre cada una de las 19 variables bioclimáticas del periodo temporal actual y futuros obtenidos en la validación independiente, los resultados mostraron valores de R^2 entre 0,736 y 0,989, con nRMSE entre 2,50 % y 10,30 % y nMAE entre 1,49 % y 7,45 %. Las variables BIO1, BIO4, BIO5, BIO6, BIO7, BIO8, BIO9, BIO10, BIO11, BIO12, BIO14, BIO15, BIO16, BIO17 y BIO19 presentaron valores de R^2 superiores a 0,90 o próximos a este valor, acompañados de errores normalizados relativamente bajos, evidenciando una alta correspondencia entre los valores de referencia y los estimados. BIO2 presentó un R^2 de 0,736, aunque sus errores fueron reducidos (nRMSE = 4,70 %; nMAE = 3,30 %), mientras que BIO3, BIO13 y BIO18 presentaron una menor capacidad explicativa relativa, con R^2 de 0,898, 0,783 y 0,813, respectivamente. En particular, BIO13 presentó los mayores errores normalizados de esta validación (nRMSE = 10,30 %; nMAE = 7,45 %), por lo que mostró una mayor diferencia relativa entre los valores estimados y de referencia.

Tabla 6

Validación cruzada espacial del Downscaling

Variable	R^2 promedio	nRMSE (%)	nMAE (%)
BIO1	0,967	5,22	3,93
BIO2	0,953	4,86	3,37
BIO3	0,505	2,32	1,26
BIO4	0,876	10,20	8,53
BIO5	0,967	5,19	3,92
BIO6	0,968	5,12	3,84
BIO7	0,629	8,97	4,96
BIO8	0,967	5,21	3,95
BIO9	0,968	5,15	3,87
BIO10	0,966	5,24	3,95
BIO11	0,968	5,15	3,87
BIO12	0,760	5,49	2,15
BIO13	0,705	6,67	3,09
BIO14	0,818	4,16	3,81
BIO15	0,831	4,29	4,08
BIO16	0,720	6,31	2,79
BIO17	0,808	4,62	3,15
BIO18	0,843	3,46	2,56
BIO19	0,808	4,62	3,15

Nota. R^2 = coeficiente de determinación; nRMSE = raíz del error cuadrático medio normalizada; nMAE = error absoluto medio normalizado. Los valores corresponden a los promedios obtenidos durante el procedimiento de validación.

La Tabla 6 muestra los valores promedio de cada una de las 19 variables bioclimáticas, de las métricas obtenidas mediante la validación cruzada espacial de cinco *folds*. Los valores de R^2 oscilaron entre 0,505 y 0,968, mientras que el nRMSE vario entre 2,32 % y 10,20 % y nMAE entre 1,26 % y 8,53 %. Las variables BIO1, BIO2, BIO5, BIO6, BIO8, BIO9, BIO10 y BIO11 mantuvieron un desempeño favorable, con R^2 superiores a 0,95 y errores normalizados bajos. BIO12, BIO14, BIO15, BIO16, BIO17, BIO18 y BIO19 también presentaron una correspondencia favorable, aunque con valores de R^2 inferiores y/o mayores errores relativos. BIO3 y BIO7 presentaron los valores de R^2 más bajos (0,505 y 0,629, respectivamente), aunque sus errores normalizados fueron relativamente bajos. Por ello, estos

resultados evidencian que la capacidad explicativa medida mediante R^2 y la magnitud del error no necesariamente presentan el mismo comportamiento y deben interpretarse conjuntamente.

En términos generales, ambas estrategias de validación mostraron que las variables BIO1, BIO5, BIO6, BIO8, BIO9, BIO10 y BIO11 presentaron el comportamiento más consistente, con valores elevados de R^2 y bajos valores de nRMSE y nMAE. BIO2 también presentó un desempeño favorable debido a sus bajos errores normalizados, aunque su R^2 fue menor en la validación independiente. Las variables BIO4, BIO12, BIO14, BIO15, BIO16, BIO17, BIO18 y BIO19 mostraron un desempeño intermedio a favorable, mientras que BIO3 y BIO7 presentaron una menor capacidad explicativa según el R^2. No se identificó una variable con un desempeño globalmente bajo en ambas validaciones, debido a que incluso aquellas con menores valores de R^2 presentaron errores normalizados relativamente reducidos en alguno de los procedimientos.

En conjunto, los resultados evidenciaron diferencias en el desempeño del *downscaling* entre las variables bioclimáticas y entre los procedimientos de validación. No obstante, la mayoría de las variables presentó valores de R^2 relativamente elevados y errores normalizados reducidos, lo que indica una correspondencia adecuada entre los valores de referencia y los estimados.

c) Selección de variables ambientales predictoras

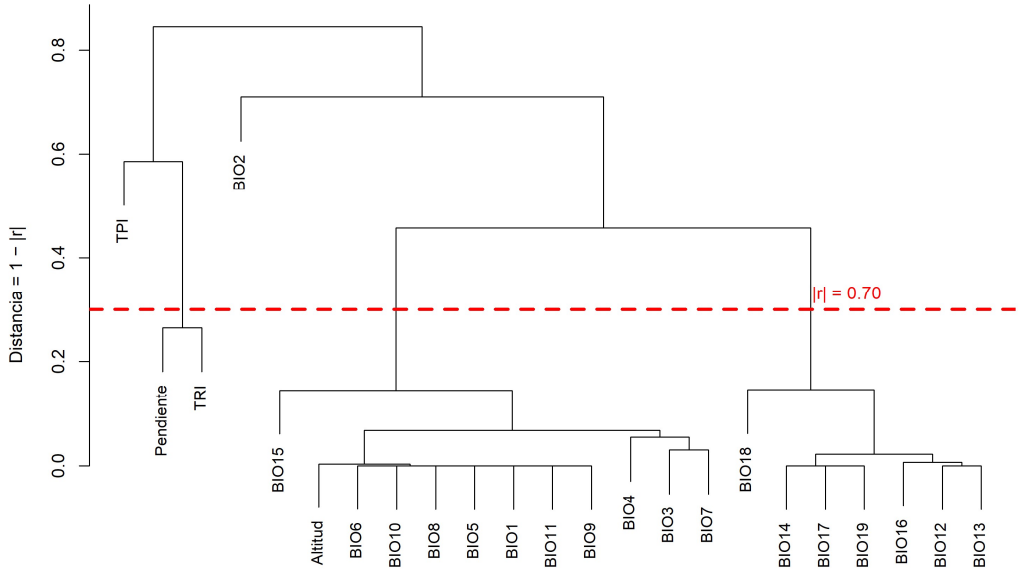
Se presentan los resultados del análisis de clasificación de Pearson, la selección de variables representativas de los grupos correlacionados y de las variables independientes, las pruebas de Jackknife y el análisis del factor de inflación de la varianza (VIF). Finalmente, se muestran las variables ambientales predictoras seleccionadas para la construcción del modelo final en MaxEnt.

-Análisis de correlación de Pearson

Los resultados de la aplicación de correlación de Pearson aplicada a las 23 variables ambientales se presentaron mediante una matriz de Pearson (ANEXO 2).

Figura 9

Dendrograma de variables ambientales basado en correlación de Pearson



Nota. El dendrograma representa la distancia de compensación calculada como $1 - |r|$, donde las variables que dan conectadas por debajo de la línea roja pertenecen a grupos de variables altamente correlacionadas ($| r | \geq 0{,}70$).

La Figura 9 muestra el dendrograma obtenido a partir de la matriz de correlación de Pearson que identifica grupos altamente correlacionados, lo cual se identificaron tres grupos de variables correlacionadas y dos variables no correlacionadas del umbral establecido. El Grupo 1 estuvo conformado por altitud, BIO1, BIO3, BIO4, BIO5, BIO6, BIO7, BIO8, BIO9, BIO10, BIO11 y BIO15, con correlaciones entre 0,925 y 1,00. El Grupo 2 estuvo integrado por BIO12, BIO13, BIO14, BIO16, BIO17, BIO18 y BIO19, con correlaciones entre 0,821 y 1,00. El Grupo 3 estuvo constituido por pendiente y TRI, con una correlación de 0,735. Por su parte, BIO2 y TPI no presentaron correlaciones superiores al umbral establecido, por lo que se mantuvieron como variables independientes.

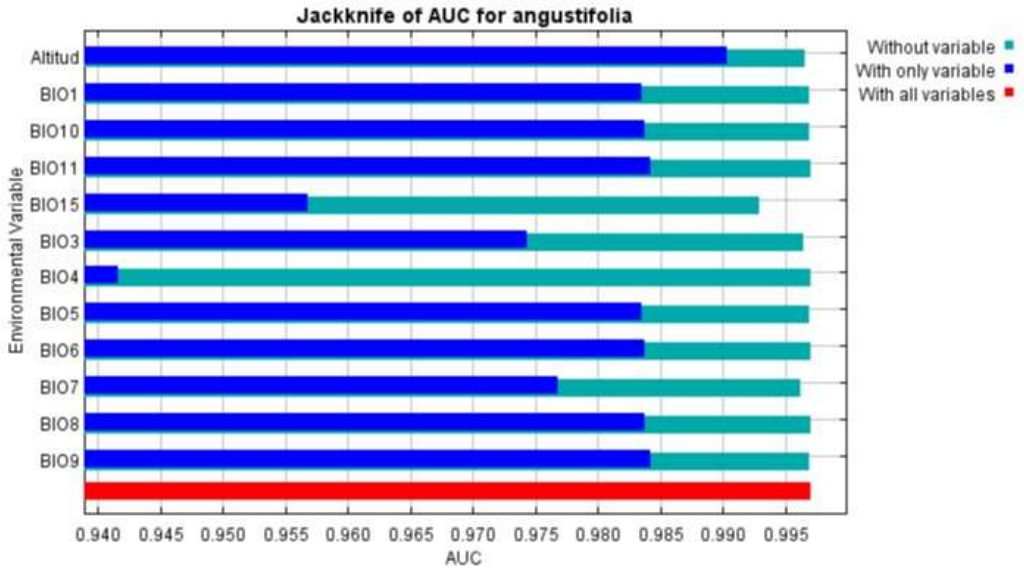
-Selección de variables representantes de los grupos correlacionados

La altitud presentó la mayor contribución porcentual (33,2 %) y la mayor importancia por permutación (78,5 %). Sin embargo, presentó altas correlaciones con diversas variables bioclimáticas, particularmente con BIO1 (r = -0,997), BIO5 (r = -0,997), BIO6 (r = -0,997), BIO10 (r = -0,996) y BIO11 (r = -0,997) (ANEXO 2). Asimismo, el análisis de inflación de la varianza (VIF) mostró un valor de 5,66

para altitud, superior al umbral de 5 establecido para controlar la multicolinealidad (ANEXO 4). En consecuencia, la altitud fue excluida del conjunto de predictores.

Figura 10

Gráfico de Prueba de Jackknife del grupo 1



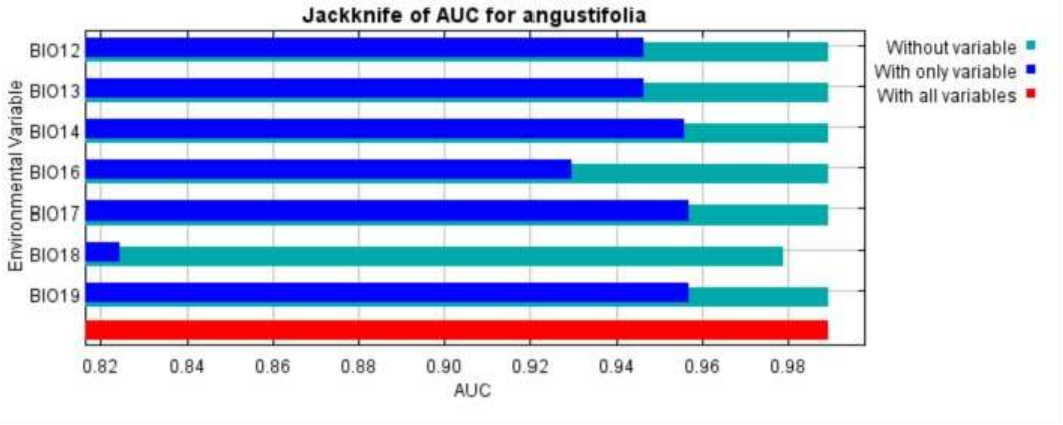
Nota. Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

La Figura 10 muestra el grafico de la prueba Jackknife, aplicado a las variables bioclimáticas del Grupo 1, mostrando una disminución del AUC al excluir BIO15, lo que indicó un aporte de información que no era completamente sustituido por los demás predictores del grupo. Además, BIO15 presentó la mayor contribución porcentual (18,6 %) e importancia por permutación (11,4 %), seguida de BIO3 (17,0 % y 9,3 %) y BIO6 (13,3 % y 0,0 %), respectivamente.

Por ello, BIO15 fue seleccionada como representante del Grupo 1. Esta variable representa la estacionalidad de la precipitación y caracteriza la variación temporal de la precipitación a lo largo del año.

Figura 11

Gráfico de Prueba de Jackknife del grupo 2

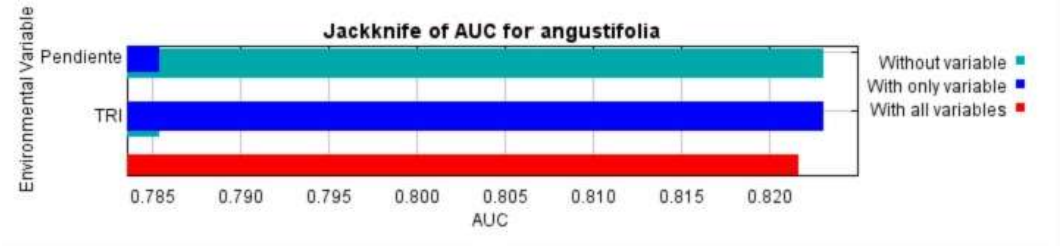


Nota. Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

En la Figura 11 muestra la prueba de Jackknife en el Grupo 2, BIO18 presentó la mayor contribución porcentual (41,8 %) y la mayor importancia por permutación (30,0 %), seguida de BIO12, BIO13 y BIO17. La exclusión de BIO18 produjo una disminución del AUC en el análisis Jackknife, lo que evidenció un aporte complementario dentro del grupo. En consecuencia, BIO18 fue seleccionada como representante del Grupo 2. Esta variable corresponde a la precipitación del trimestre más cálido y representa la disponibilidad de agua durante el periodo de mayor temperatura.

Figura 12

Gráfico de Prueba de Jackknife del grupo 3



Nota. Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

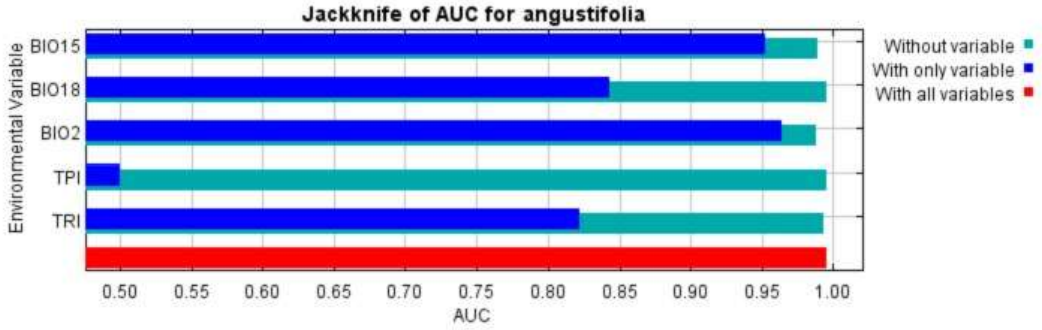
La Figura 12 muestra la prueba de Jackknife en el Grupo 3, la pendiente presentó una contribución porcentual de 83,0 % y una importancia por permutación de 79,1 %, mientras que TRI presentó valores de 17,0 % y 20,9 %, respectivamente. Sin embargo, el análisis Jackknife mostró que la exclusión de la pendiente no reducía el desempeño del modelo, mientras que la exclusión de TRI produjo una disminución considerable del AUC. Por ello, TRI fue seleccionado como representante del grupo, debido a que mostró mayor aporte de información complementaria. El TRI cuantifica la heterogeneidad o rugosidad del terreno a partir de las diferencias de elevación entre una celda y sus vecinas, característica que puede relacionarse con condiciones locales de drenaje, humedad, exposición y microclima.

-Selección de variables independientes

Los resultados del análisis Jackknife de las variables predictoras candidatas se presentan en la figura correspondiente, donde se muestra el aporte individual de cada variable al desempeño del modelo y la información complementaria que aporta respecto al conjunto de predictores.

Figura 13

Gráfico de Prueba de Jackknife incluyendo BIO2 y TPI



Nota. Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

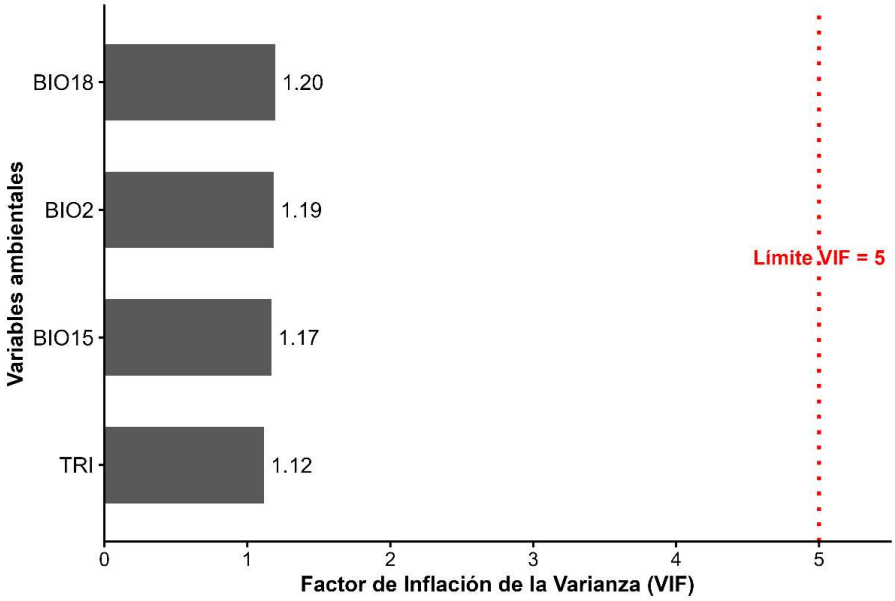
La Figura 13 muestra la prueba de Jackknife incluyendo las variables independientes y las variables candidatas del grupo correlacionadas, donde BIO2 no presentó correlaciones superiores al umbral establecido con las demás variables ambientales. Esta variable corresponde al rango diurno medio de temperatura y

representa la amplitud térmica promedio entre las temperaturas máximas y mínimas diarias. En la evaluación preliminar, BIO2 presentó aporte al modelo y fue considerada ambientalmente pertinente para representar el régimen térmico del área de estudio.

Por su parte, TPI se mantuvo inicialmente como variable candidata debido a su independencia respecto de los demás predictores. Sin embargo, presentó una contribución porcentual de 0 % y una importancia por permutación de 0 %. Además, su exclusión incrementó el AUC, mientras que su utilización como único predictor produjo un desempeño inferior. En consecuencia, TPI fue descartada por no aportar información predictiva adicional al conjunto de variables candidatas

Figura 14

Gráfico del Factor de Inflación de la varianza (VIF)



Nota. Se muestran los valores del factor de inflación de la varianza (VIF) de las variables ambientales seleccionadas. La línea roja discontinua indica el umbral de exclusión (VIF = 5) para la evaluación de multicolinealidad.

La Figura 14 muestra los valores de VIF obtenidos para las variables que permanecieron después de la evaluación de correlación, aporte predictivo y pertinencia ecológica. Los valores fueron inferiores al umbral de 5, lo que indicó ausencia de multicolinealidad elevada entre los predictores finalmente seleccionados.

Tabla 7

Variables ambientales seleccionadas

N.º	Variables Ambientales
1	BIO2 (Rango diurno medio de temperatura)
2	BIO15 (Estacionalidad de la precipitación)
3	BIO18 (Precipitación del trimestre más cálido)
4	TRI (Índice de rugosidad del terreno)

La Tabla 7 presenta las cuatro variables ambientales predictoras seleccionadas para el modelamiento final de la distribución potencial de *C. angustifolia*: BIO2, BIO15, BIO18 y TRI. El proceso permitió reducir el conjunto inicial de 23 variables a cuatro predictores finales, considerando la correlación de Pearson, la contribución porcentual, la importancia por permutación, el análisis Jackknife, la pertinencia ecológica y la evaluación de la multicolinealidad mediante VIF. De esta manera, se conservaron variables climáticas y topográficas con aporte al modelo, evitando la incorporación simultánea de predictores con información redundante.

d) Aplicación de spatial thinning

La selección de la distancia de depuración se realizó considerando conjuntamente la resolución espacial de los predictores ambientales, la autocorrelación espacial de los valores ambientales asociados a los registros de presencia y el efecto de la depuración sobre el desempeño del modelo y en su área potencial.

Tabla 8

Análisis de Spatial Thinning con distintas distancias

Distancia Thinning	Registros	Porcentaje conservado (%)	AUC	Área potencial (ha)
Original	40	100	0,993 ± 0,003	552,83 ha
13m	35	87,5	0,986 ± 0,003	665,85 ha
20m	31	77,5	0,988 ± 0,006	746,75 ha
25m	26	65	0,988 ± 0,005	782,02 ha
50m	21	52,5	0,988 ± 0,005	696,36 ha

La Tabla 8 muestra los valores de porcentaje conservado, AUC, área potencial según la distancia de adelgazamiento espacial utilizado, los efectos de las diferentes distancias de *Spatial Thinning* sobre el número de registros de presencia, el porcentaje de registros conservados que corresponde a la proporción de registros retenidos respecto del conjunto original de 40 registros. Los valores de AUC corresponden al promedio ± desviación estándar de las réplicas del modelo y el desempeño del modelo y la superficie de distribución potencial. La distancia de 13 m conservó 35 de los 40 registros originales (87,5 %), mientras que las distancias de 20, 25 y 50 m conservaron 31 (77,5 %), 26 (65,0 %) y 21 (52,5 %) registros, respectivamente. Se observó una disminución progresiva del número de registros a medida que aumentó la distancia de depuración. En cuanto al desempeño del modelo, la configuración original presentó un AUC de 0,993 ± 0,003, mientras que las configuraciones de 13, 20, 25 y 50 m presentaron valores de 0,986 ± 0,003, 0,988 ± 0,006, 0,988 ± 0,005 y 0,988 ± 0,005, respectivamente. Las diferencias entre las configuraciones fueron reducidas y no se observó un incremento del AUC asociado al aumento de la distancia de depuración. La superficie de distribución potencial estimada también varió entre las configuraciones evaluadas. La distancia de 13 m produjo una superficie de 665,85 ha, mientras que las distancias de 20, 25 y 50 m produjeron 746,75; 782,02 y 696,36 ha, respectivamente. La configuración original presentó una superficie potencial de 552,83 ha.

Tabla 9

Autocorrelación espacial de los predictores mediante el índice de Moran's I

Variable	Distancia	Moran's I	p-valor
BIO2	13	0,412	0,031
	20	0,564	0,003
	25	0,635	0,0007
	50	0,70	<0,001
BIO15	13	0,54	0,006
	20	0,62	0,001
	25	0,68	0,0002
	50	0,72	<0,001
BIO18	13	0,37	0,042
	20	0,46	0,012

	25	0,54	0,003
	50	0,66	<0,001
TRI	13	0,39	0,036
	20	0,48	0,010
	25	0,55	0,002
	50	0,66	<0,001

Nota. ns = no significativo ($p \geq 0,05$); $p < 0,05$ = significativo; $p < 0,01$ = muy significativo; $p < 0,001$ = altamente significativo.

La Tabla 9 muestra los valores del índice de Moran obtenidos para los cuatro predictores ambientales bajo las diferentes distancias de *Spatial Thinning*. Todas las configuraciones presentaron autocorrelación espacial positiva y estadísticamente significativa ($p < 0,05$). Para los cuatro predictores, la distancia de 13 m presentó los menores valores de Moran's I respecto de las demás distancias evaluadas. En BIO2, el índice aumentó de 0,412 a 13 m a 0,564; 0,635 y 0,700 para las distancias de 20, 25 y 50 m, respectivamente. Se observó una tendencia similar en BIO15, BIO18 y TRI.

Considerando conjuntamente los resultados obtenidos, la distancia de 13 m conservó el mayor número de registros entre las alternativas de depuración evaluadas, presentó los menores valores de autocorrelación espacial y mantuvo un desempeño del modelo comparable con las demás configuraciones. Asimismo, esta distancia fue próxima a la resolución espacial de los predictores ambientales, establecida en 12,5 m. En consecuencia, se seleccionó una distancia mínima de 13 m para la depuración espacial de los registros de presencia. Como resultado, se obtuvieron 35 registros, los cuales fueron utilizados para la calibración del modelo final de MaxEnt.

e) Desempeño del modelo de distribución potencial

El modelo de distribución potencial de *Cedrela angustifolia* presentó un alto desempeño discriminativo en los cuatro escenarios evaluados, con valores de AUC superiores a 0,98. La evaluación se realizó mediante validación cruzada (*cross-validation*) con 10 réplicas, utilizando el procedimiento automático de particionamiento implementado en MaxEnt 3.4.4. Debido a que se dispuso de 35 registros de presencia, en cada réplica se utilizaron entre 31 y 32 registros para el

entrenamiento y entre 3 y 4 registros para la evaluación. De esta manera, cada partición fue utilizada sucesivamente como conjunto de prueba, mientras que las restantes se emplearon para calibrar el modelo. El AUC reportado corresponde al desempeño promedio obtenido a partir de las réplicas de validación, permitiendo evaluar la capacidad discriminativa del modelo frente a datos no utilizados durante su entrenamiento.

Tabla 10

Desempeño de los modelos

Modelo	AUC promedio	Training AUC	Test AUC	Test Gain
Actual	0,986 ± 0,003	0,9857	0,9855	23,331
SSP1-2.6	0,987 ± 0,007	0,9878	0,9872	29,844
SSP3-7.0	0,988 ± 0,007	0,9884	0,9880	30,506
SSP5-8.5	0,985 ± 0.006	0,9859	0.9859	28,695

En la Tabla 10 muestra los valores de AUC promedio, de Training, Test AUC y Gain para cada escenario proyectado y en el escenario actual. El AUC promedio fue de 0,986 ± 0,003, mientras que para los escenarios futuros SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se obtuvieron valores de 0,987 ± 0,007, 0,988 ± 0,007 y 0,985 ± 0,006. Estos resultados indican que el modelo presentó una buena capacidad para diferenciar las condiciones ambientales asociadas a los registros de presencia de *C. angustifolia* de aquellas disponibles en el área de estudio.

Respecto al AUC de entrenamiento en el escenario actual presentó un valor de 0,9857, mientras que el AUC de prueba alcanzó 0,9855. Para los escenarios futuros, el AUC de entrenamiento presentó valores de 0,9878; 0,9884 y 0,9859 para SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente, mientras que el AUC de prueba fue de 0,9872; 0,9880 y 0,9859. La reducida diferencia entre los AUC de entrenamiento y prueba en los cuatro escenarios indica una respuesta consistente del modelo ante las particiones de los datos de presencia utilizadas durante la validación. Asimismo, el Test Gain presentó valores de 23,331 para el escenario actual; un 29,844 para SSP1-2.6; un 30,506 para SSP3-7.0 y 28,695 para SSP5-8.5. El Test Gain representa la ganancia del modelo al predecir los registros de prueba respecto a una distribución de referencia basada en el fondo ambiental. Por tanto, valores elevados de AUC indican que el modelo presenta una mayor capacidad para discriminar entre los

registros de presencia y las localidades de referencia, asignando mayores valores de idoneidad ambiental a los sitios de presencia que a los sitios seleccionados como referencia. En este estudio, los valores obtenidos muestran una capacidad predictiva consistente en los cuatro escenarios, con el mayor Test Gain registrado para el escenario SSP3-7.0 (30,506) y el menor para el escenario actual (23,331).

-Estabilidad entre replicas

Para analizar la estabilidad estadística del modelo actual, se calcularon la media, desviación estándar (DE), valor mínimo y valor máximo de los principales indicadores de desempeño de los valores de las 10 réplicas (ANEXO 6).

Tabla 11

Estabilidad media del AUC y área potencial

Estabilidad	Media	DE	Mínima	Máxima
Training AUC	0,985	0,0005	0,984	0,986
Test AUC	0,985	0,0035	0,98	0,991
Test Gain	23,33	1,75	21,21	26,97
Área potencial	666,76	15,71	643	692,92

Nota. DE: Desviación Estándar

La Tabla 11 muestra los resultados de la estabilidad media del AUC y área potencial, el Training AUC presentó una media de 0,985, con una DE de aproximadamente 0,0005 y valores comprendidos entre 0,984 y 0,986. La baja dispersión de los valores indica que el desempeño del modelo durante el entrenamiento fue altamente consistente entre las diez réplicas. El Test AUC presentó una media de 0,985; con una DE aproximada de 0,0035; y valores entre 0,9807 y 0,9918. La diferencia relativamente pequeña entre las réplicas indica que la capacidad discriminativa del modelo se mantuvo estable cuando se utilizaron diferentes particiones de los registros para su evaluación. Asimismo, el rango reducido de los valores de AUC de prueba respalda la consistencia del desempeño predictivo del modelo. El Test Gain presentó una media de 23,33 ± 1,75; con valores entre 21,21 y 26,97. La variación observada entre las réplicas fue moderada y no mostró diferencias extremas, lo que indica una respuesta relativamente consistente del modelo en la predicción de los registros utilizados como datos de prueba.

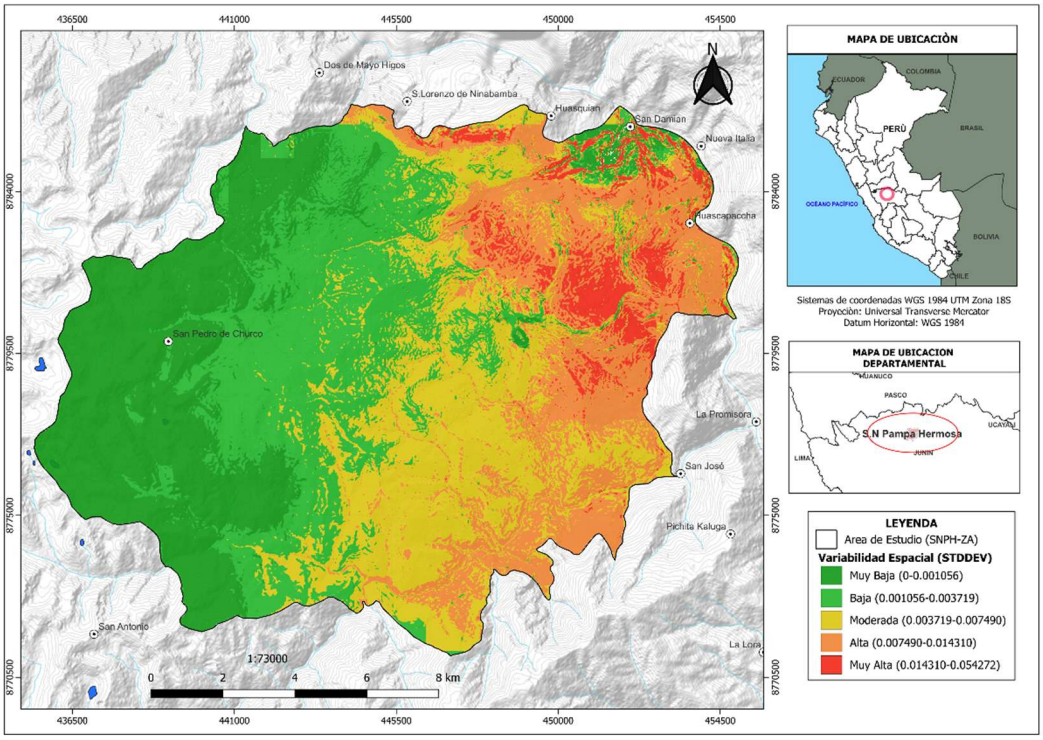
En cuanto al área potencial obtenida para cada réplica, esta presentó una media de 666,76 ha y una DE de 15,71 ha; con valores entre 643,26 y 692,92 ha. La diferencia entre el valor mínimo y máximo fue de aproximadamente 49,66 ha. Esta variación representa cambios en la extensión espacial predicha entre las réplicas y permite complementar la evaluación de la estabilidad del modelo. Sin embargo, el área potencial constituye un resultado espacial de la predicción y no un indicador estadístico de desempeño, por lo que se interpreta de manera complementaria a los valores de AUC y Test Gain.

- Estabilidad espacial de las predicciones

La estabilidad espacial de las predicciones se evaluó mediante el raster de desviación estándar (STDDEV) generado a partir de las diez réplicas del modelo MaxEnt.

Figura 15

Mapa de variabilidad espacial de las predicciones del modelo MaxEnt



Nota. Los valores bajos indican mayor concordancia y estabilidad espacial, mientras que valores altos indican mayor variabilidad entre las réplicas.

La Figura 15 muestra las zonas donde las predicciones de idoneidad presentan mayor o menor variabilidad entre las réplicas. Los valores del raster STDDEV

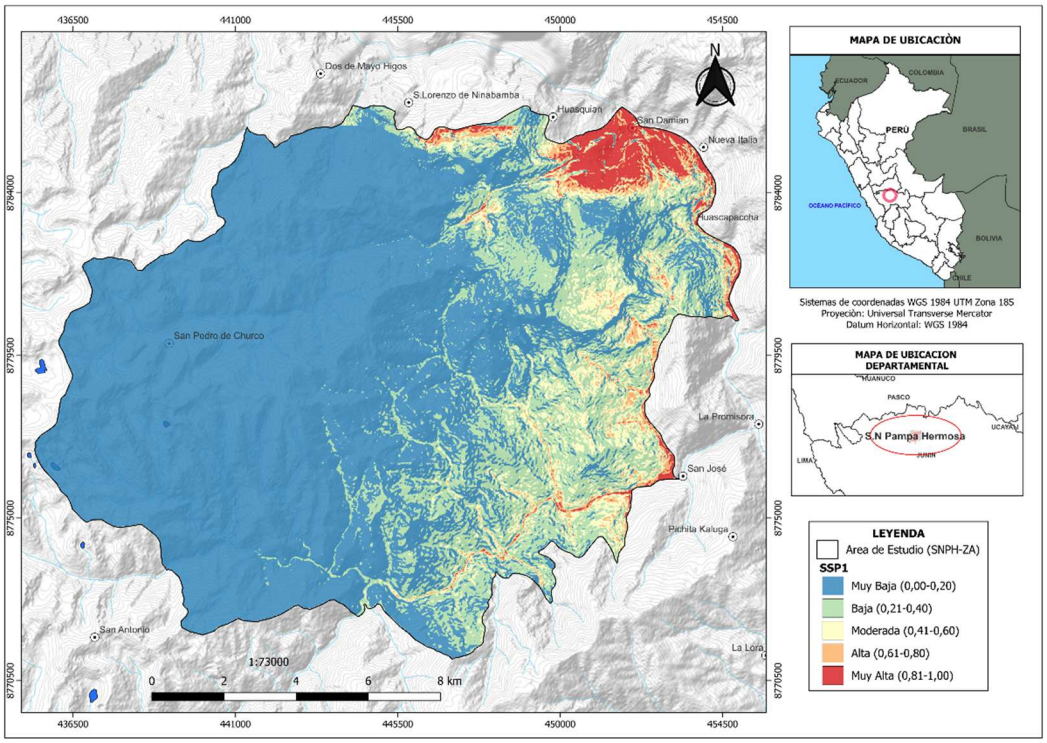
fueron reclasificados en cinco categorías. Las categorías de menor variabilidad representan sectores donde las diez réplicas presentan predicciones más similares y, por tanto, mayor estabilidad espacial. En contraste, las categorías de alta y muy alta variabilidad representan sectores donde existe mayor diferencia entre las predicciones de las réplicas. El raster presentó valores de STDDEV entre 0 y 0,054272, con una media de 0,005027. Asimismo, el 75 % de los píxeles presentó valores iguales o inferiores a 0,007490, mientras que el 95 % presentó valores iguales o inferiores a 0,014310. Los píxeles presentaron valores relativamente bajos de desviación estándar, indicando una mayor concordancia entre las predicciones de las réplicas.

4.1.2. Distribución potencial actual de C. angustifolia en el SNPH

Se muestran los mapas continuo y binario de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* estimado por MaxEnt.

Figura 16

Mapa continuo de distribución potencial actual



Nota. La escala de colores representa el gradiente de idoneidad ambiental potencial estimado mediante el modelo MaxEnt para el periodo de referencia 1981-2010.

La Figura 16 muestra el mapa continuo de distribución potencial actual, cuyos valores de idoneidad ambiental oscilaron aproximadamente entre 0 a 1. Para facilitar la representación espacial del gradiente de idoneidad, los valores continuos del raster AVG se agruparon en cinco categorías: muy baja (0,00-0,20), baja (>0,20-0,40), moderada (>0,40-0,60), alta (>0,60-0,80) y muy alta (>0,80-1,00). Estas categorías permitieron visualizar de manera diferenciada los niveles de idoneidad ambiental potencial estimados por el modelo.

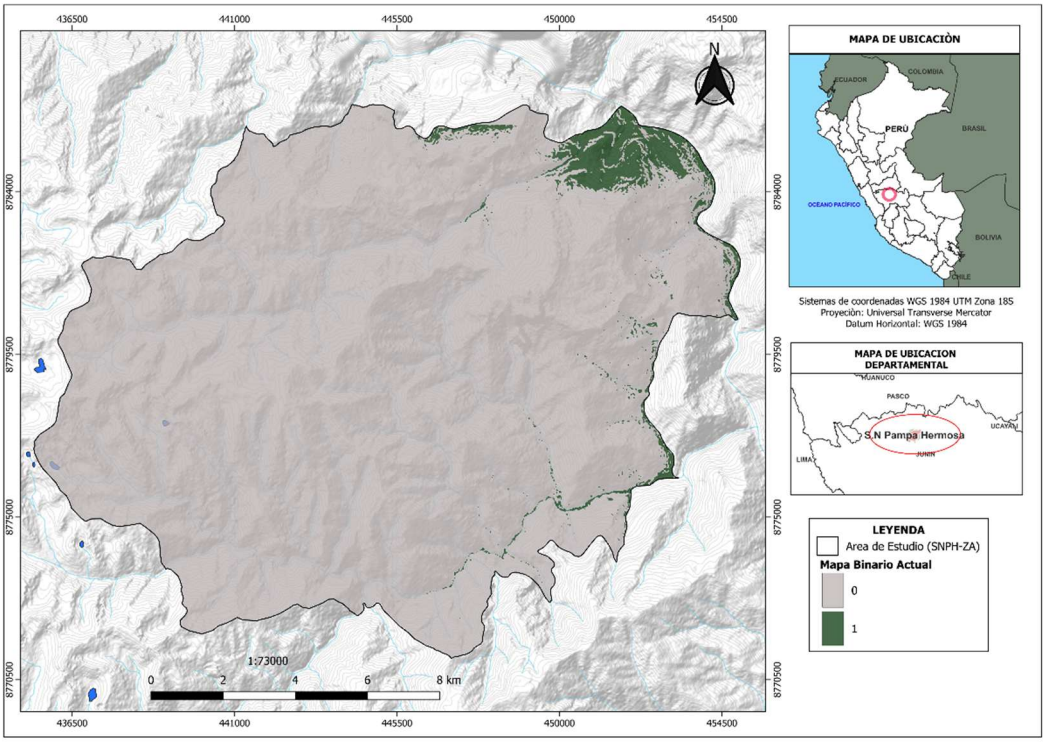
En términos espaciales, se observa un predominio de los valores de muy baja idoneidad en el sector occidental del área de estudio, representados principalmente por tonalidades azules. Las categorías de baja y moderada idoneidad presentan una distribución más fragmentada, principalmente hacia los sectores central y oriental. Por otro lado, los valores correspondientes a las categorías alta y muy alta idoneidad se concentran principalmente hacia el sector oriental y nororiental, donde se observan parches de tonalidades naranjas y rojas. Este patrón indica una distribución espacial heterogénea de las condiciones ambientales favorables para *C. angustifolia*, con una mayor concentración de valores de idoneidad hacia el sector oriental del área de estudio.

En conjunto, el mapa representa la distribución espacial de la idoneidad ambiental potencial estimada por MaxEnt y no la presencia confirmada de la especie en cada una de las áreas representadas. Los valores más altos indican sectores con condiciones ambientales más favorables según el modelo, mientras que los valores bajos condiciones no favorables para la especie.

A partir del umbral de 0,7340, correspondiente al criterio Maximum Training Sensitivity Plus Specificity (MTSS), se reclasificó el mapa continuo de idoneidad ambiental obtenido mediante MaxEnt, generándose el mapa binario de la distribución potencial actual de *Cedrela angustifolia*.

Figura 17

Mapa binario de distribución potencial actual



Nota. Mapa binario obtenido mediante la aplicación del umbral de clasificación del modelo MaxEnt (MTSS = 0,7340). El valor 1 representa áreas potencialmente idóneas para *Cedrela angustifolia*, mientras que el valor 0 representa áreas potencialmente no idóneas.

La Figura 17 muestra las áreas clasificadas con valor 1 y 0, el 1 corresponden a sectores que presentaron valores de idoneidad ambiental iguales o superiores al umbral establecido, por lo que representan las zonas con mayor favorabilidad ambiental y mayor probabilidad relativa de presencia potencial de la especie, de acuerdo con las predicciones del modelo. Estas áreas se localizaron principalmente en el sector noreste del área de estudio, donde se observa una concentración de parches de color verde.

En contraste, las áreas clasificadas con valor 0 presentaron valores de idoneidad inferiores al umbral y abarcaron la mayor parte del área de estudio. Esto indica que, bajo las condiciones ambientales actuales correspondientes al periodo de referencia 1981-2010, dichos sectores presentan una menor favorabilidad ambiental para la presencia potencial de *C. angustifolia* según el modelo.

La distribución potencialmente idónea mostró un patrón espacial localizado y discontinuo, con una concentración predominante hacia el sector noreste y pequeños parches distribuidos principalmente en sectores orientales y centrales. A partir de la reclasificación se estimó una superficie de 665,85 ha de áreas potencialmente idóneas, equivalente al 3,29 % del área total de estudio (20 202,23 ha). En consecuencia, aproximadamente el 96,71 % del área de estudio presentó valores inferiores al umbral de clasificación.

En términos espaciales, los resultados indican que las áreas con mayor idoneidad ambiental potencial se encuentran restringidas a una proporción reducida del territorio, concentrándose principalmente en el sector noreste. Estas áreas representan los sectores donde, de acuerdo con el modelo MaxEnt, las condiciones ambientales son más favorables y, por tanto, donde existe una mayor probabilidad relativa de presencia de *C. angustifolia*. Sin embargo, esta clasificación representa una estimación de idoneidad ambiental potencial y no implica presencia confirmada de la especie en las áreas clasificadas con valor 1.

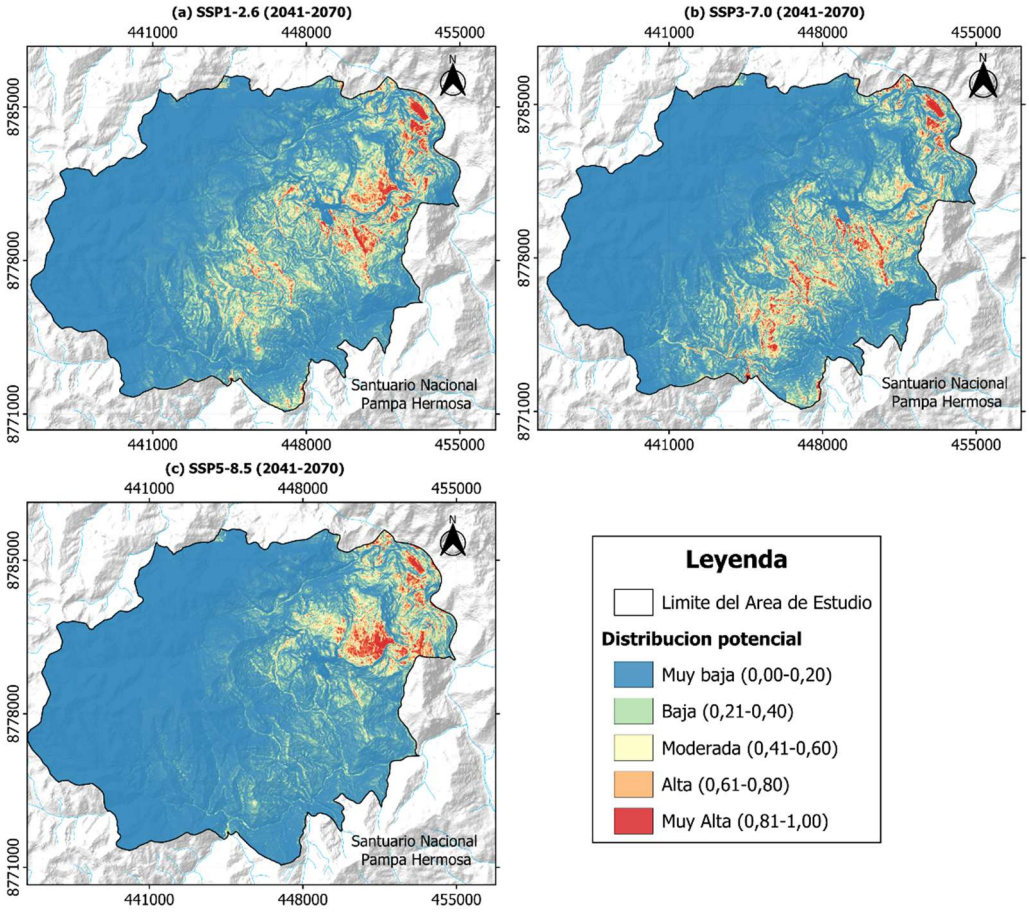
4.1.3. Distribución potencial futura de C. angustifolia en el SNPH

En esta sección se presentan los mapas continuo y binario de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* para cada escenario climático futuro: SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Asimismo, se muestran las superficies correspondientes a la distribución potencial actual y a las proyecciones futuras, permitiendo comparar y calcular el cambio neto la extensión de las áreas potencialmente adecuadas entre los diferentes escenarios.

La distribución potencial futura de *C. angustifolia* representa el gradiente espacial de idoneidad ambiental estimado mediante MaxEnt bajo los escenarios climáticos futuros. Los modelos presentaron valores elevados de AUC en los tres escenarios evaluados: 0,987 para SSP1-2.6, 0,988 para SSP3-7.0 y 0,985 para SSP5-8.5, lo que evidenció un alto desempeño discriminativo de los modelos.

Figura 18

Mapa continuo de distribución potencial bajo escenarios climáticos



Nota. La escala de colores representa el gradiente de idoneidad ambiental para *C. angustifolia*, donde los tonos azules indican menor idoneidad y los tonos amarillos a rojos indican mayor idoneidad; (a) Distribución potencial bajo el escenario SSP1-2.6; (b) Distribución potencial bajo el escenario SSP3-7.0; y (c) Distribución potencial bajo el escenario SSP5-8.5.

La Figura 18 muestra los mapas continuos de los modelos de distribución potencial futura de *Cedrela angustifolia*, mostró un patrón espacial heterogéneo de idoneidad ambiental dentro del Santuario Nacional Pampa Hermosa, donde los sectores oeste y suroeste presentaron predominantemente valores bajos de idoneidad ambiental (0,00-0,20), mientras que los valores moderados, altos y muy altos se concentraron principalmente en los sectores oriental y noreste del área de estudio. Las áreas con valores superiores a 0,80 se localizaron principalmente en núcleos específicos del sector noreste. Bajo el escenario SSP1-2.6, las áreas con idoneidad alta (0,61-0,80) y muy alta (0,81-1,00) se concentraron principalmente en el sector noreste,

formando núcleos continuos y parches de mayor idoneidad. Las áreas con idoneidad moderada (0,41-0,60) se distribuyeron principalmente hacia la franja central y oriental del Santuario.

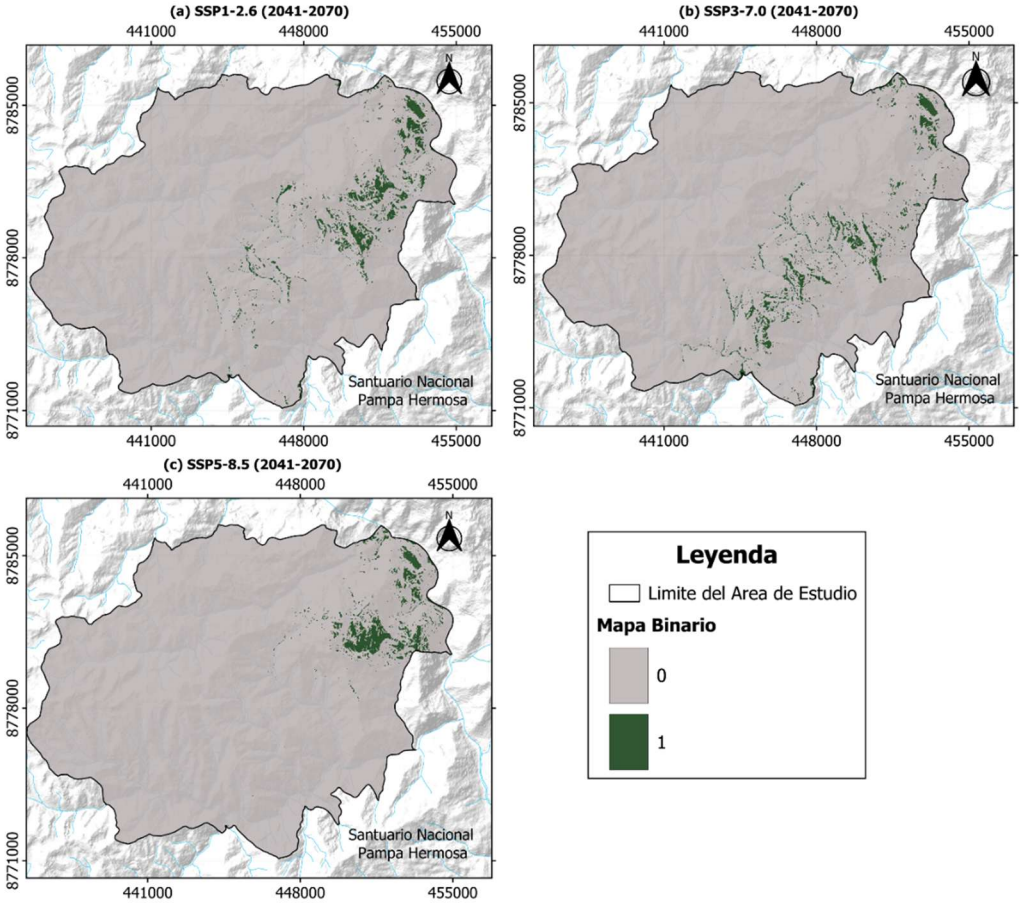
Para el escenario SSP3-7.0, se observó una mayor extensión espacial de las áreas con idoneidad moderada a muy alta en comparación con el escenario SSP1-2.6. Estas áreas se distribuyeron principalmente a lo largo del margen oriental y se extendieron hacia el sector sureste, donde se identificaron núcleos adicionales de idoneidad alta y muy alta. En el escenario SSP5-8.5, las áreas con idoneidad muy alta (0,81-1,00) se concentraron principalmente en el extremo noreste del Santuario. Asimismo, se observó una menor presencia de áreas con idoneidad moderada y alta en los sectores central y sur respecto a los escenarios SSP1-2.6 y SSP3-7.0.

En términos generales, los tres escenarios presentaron una concentración de los mayores valores de idoneidad ambiental en los sectores oriental y noreste del Santuario, mientras que los sectores oeste y suroeste mantuvieron predominantemente valores bajos. La distribución espacial de las categorías de idoneidad varió entre escenarios, con una mayor extensión de áreas moderadas a muy altas en SSP3-7.0 y una mayor concentración de las áreas de idoneidad muy alta hacia el noreste en SSP5-8.5.

Para la elaboración de los mapas binarios se utilizó el mismo umbral de corte establecido para la distribución potencial actual. Este umbral se aplicó de manera uniforme a las proyecciones correspondientes a los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, con la finalidad de mantener un criterio de clasificación consistente y garantizar la comparabilidad de las áreas potencialmente adecuadas entre la condición actual y los diferentes escenarios futuros.

Figura 19

Mapa binario de distribución potencial bajo escenarios climáticos



Nota. Mapas binarios generados mediante la aplicación del umbral de clasificación del modelo para los escenarios climáticos: (a) SSP1-2.6, (b) SSP3-7.0 y (c) SSP5-8.5. El valor 1 área idónea y el valor 0 hábitat no idónea para la presencia de *C. angustifolia*.

La Figura 19 muestra los mapas continuos de idoneidad ambiental para los 3 escenarios climáticos, estos fueron reclasificados en dos categorías: áreas potencialmente idóneas, con valores de idoneidad ≥ 0,7340, y áreas potencialmente no idóneas, con valores < 0,7340. la reclasificación permitió identificar espacialmente las zonas que presentan los valores más elevados de idoneidad ambiental para *Cedrela angustifolia* durante el periodo 2041-2070 bajo los tres escenarios climáticos evaluados.

Bajo el escenario SSP1-2.6, las áreas potencialmente idóneas se concentraron principalmente en los sectores noreste y centro-este del área de estudio. La clase

potencialmente idónea presentó núcleos relativamente continuos, principalmente hacia el noreste, mientras que la mayor parte de los sectores oeste y suroeste correspondió a áreas potencialmente no idóneas. En el escenario SSP3-7.0, las áreas potencialmente idóneas se distribuyeron principalmente en el sector oriental, con presencia de núcleos hacia las zonas central y sureste. En comparación con SSP1-2.6, se observó una configuración espacial más discontinua de las áreas clasificadas como potencialmente idóneas, con presencia de parches separados dentro del área de estudio. Para el escenario SSP5-8.5, las áreas potencialmente idóneas se concentraron principalmente en el sector norte y noreste. La clase potencialmente idónea presentó una distribución más concentrada espacialmente, mientras que los sectores central y sur mostraron predominantemente la categoría potencialmente no idónea.

En conjunto, los tres escenarios mostraron que las áreas clasificadas como potencialmente idóneas mediante el umbral de 0,7340 se localizaron principalmente hacia los sectores oriental y noreste del área de estudio. La distribución espacial de estas áreas presentó diferencias entre escenarios, observándose una mayor continuidad de los núcleos potencialmente idóneos en SSP1-2.6, una distribución más discontinua en SSP3-7.0 y una mayor concentración hacia el sector norte y noreste en SSP5-8.5.

-Areas potenciales para *C. angustifolia* para cada modelo

Se presenta la superficie y el porcentaje del área de estudio correspondiente a las áreas potencialmente idóneas para *Cedrela angustifolia* durante el periodo actual (1981-2010) y bajo los escenarios climáticos futuros SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el periodo 2041-2070.

Tabla 12

Área potencial por modelo proyectado

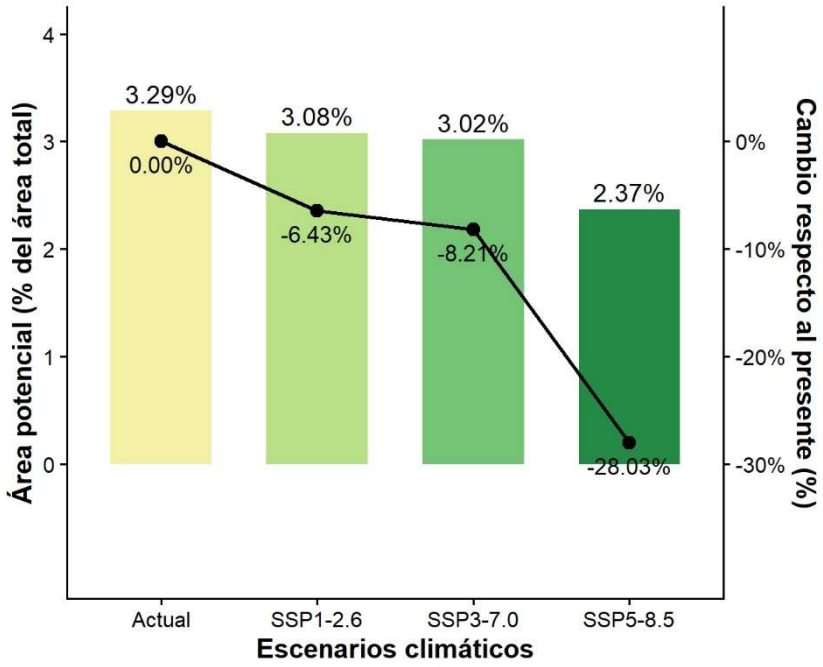
Escenario	Área Potencial (ha)	Área Potencial (%)	Cambio (ha)	Cambio neto (%)
Actual 1981-2010	665,85	3,29	0,00	0,00
SSP1-2.6-2070	623	3,08	-42,84	-6,43
SSP3-7.0-2070	611,15	3,02	-54,70	-8,21
SSP5-8.5-2070	479,19	2,37	-186,65	-28,03

La Tabla 12 muestra los valores de superficie potencial y el cambio neto, expresados en hectáreas y porcentajes, para cada escenario climático proyectado. El porcentaje de superficie potencial corresponde a la proporción que representa el área potencial respecto al área total de estudio. En cambio, el porcentaje de cambio neto se calculó tomando como referencia la superficie de la distribución potencial actual.

Para el periodo actual (1981-2010), el modelo identificó 665,85 ha como áreas potencialmente idóneas, equivalentes al 3,29 % del área de estudio. Este valor fue considerado como referencia para determinar los cambios de superficie bajo los escenarios futuros. Bajo el escenario SSP1-2.6, la superficie potencialmente idónea fue de 623,00 ha, equivalente al 3,08 % del área de estudio. En comparación con el periodo actual, se registró una reducción de 42,84 ha, correspondiente a un cambio neto de -6,43 %. Para el escenario SSP3-7.0, se obtuvo una superficie potencialmente idónea de 611,15 ha, que representa el 3,02 % del área de estudio. Respecto al periodo actual, esta superficie disminuyó en 54,70 ha, equivalente a un cambio neto de -8,21 %. En el escenario SSP5-8.5, la superficie potencialmente idónea alcanzó 479,19 ha, correspondiente al 2,37 % del área de estudio. En comparación con el periodo actual, se registró una reducción de 186,65 ha, equivalente a un cambio neto de -28,03 %.

Figura 20

Gráfico del Cambio neto del área potencial



Nota. El gráfico muestra el porcentaje de área potencial de distribución de *C. angustifolia* en el escenario actual y en los escenarios climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Las barras representan el porcentaje de área potencial respecto al área de estudio, mientras que la línea indica el cambio porcentual con respecto al escenario actual.

La Figura 20 expresa la variación porcentual del área potencial proyectada respecto a la condición actual, los resultados presentan una reducción de la superficie potencialmente idónea respecto al periodo actual en los tres escenarios futuros evaluados. La menor variación correspondió al escenario SSP1-2.6, con una reducción de 42,84 ha (-6,43 %), seguida por SSP3-7.0, con 54,70 ha (-8,21 %). La mayor reducción se registró bajo SSP5-8.5, con 186,65 ha (-28,03 %), escenario en el que la superficie potencialmente idónea representó el 2,37 % del área de estudio.

En conjunto, los resultados muestran una disminución progresiva de la superficie potencialmente idónea de *Cedrela angustifolia* respecto al periodo actual, siendo más pronunciada conforme aumenta el escenario de emisiones. La reducción fue de 6,43 % en SSP1-2.6, 8,21 % en SSP3-7.0 y 28,03 % en SSP5-8.5, evidenciando una menor superficie potencialmente idónea en los tres escenarios futuros.

4.1.4. Cambio espacial de la distribución potencial de C. angustifolia

En esta sección se presentan los resultados del cambio espacial de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* entre el periodo actual y los escenarios climáticos futuros. Se incluye el análisis del tipo de cambio entre escenarios, el desplazamiento del centroide de la distribución potencial y las curvas de densidad altitudinal, como indicadores que permiten caracterizar la configuración y el desplazamiento espacial de las áreas potencialmente idóneas.

El análisis de cambio espacial permitió identificar áreas de pérdida, ganancia y estabilidad de la idoneidad ambiental entre el periodo actual (1981-2010) y los escenarios climáticos futuros (2041-2070).

La pérdida correspondió a las áreas clasificadas como potencialmente idóneas en el periodo actual que pasaron a una condición potencialmente no idónea en el escenario futuro; la ganancia correspondió a las áreas inicialmente no idóneas que fueron clasificadas como potencialmente idóneas en el escenario futuro; mientras

que la estabilidad correspondió a las áreas que conservaron la condición de potencialmente idóneas en ambos periodos.

Para la comparación, los porcentajes de pérdida, ganancia y estabilidad se calcularon tomando como denominador el área potencialmente idónea actual (665,85 ha), esta superficie representa el 3,29 % del área total de estudio (20 202,23 ha) y constituye la superficie de referencia para expresar los cambios porcentuales.

Tabla 13

Tipo de cambio en la distribución potencial futura

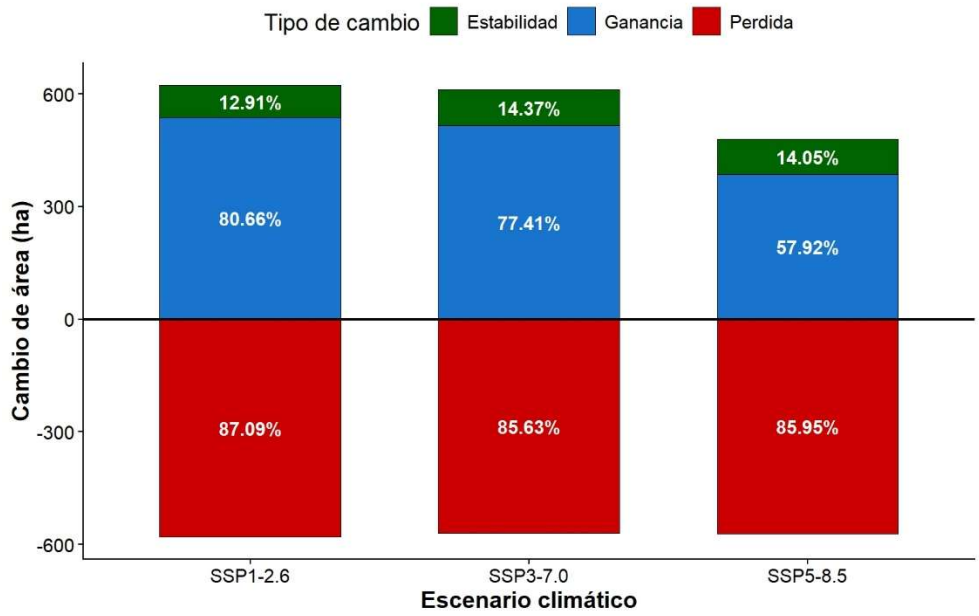
Escenarios 2070	Tipo de Cambio					
	Perdida		Ganancia		Estabilidad	
	ha	% Área actual	Ha	% Área actual	ha	%Área actual
SSP1-2.6	579,91	87,09	537,06	80,66	85,93	12,91
SSP 3-7.0	570,15	85,63	515,45	77,41	95,69	14,37
SSP 5-8.5	572,31	85,95	385,66	57,92	93,53	14,05

La Tabla 13 muestra los valores de los tres tipos de cambio espacial, expresados en hectáreas y porcentajes, obtenidos al comparar la distribución potencial actual con cada uno de los escenarios climáticos futuros. Bajo el escenario SSP1-2.6, se identificó una pérdida de 579,91 ha, equivalente al 87,09 % del área potencialmente idónea actual, mientras que 537,06 ha correspondieron a áreas de ganancia, equivalentes al 80,66 %, y 85,93 ha permanecieron estables, representando el 12,91 %. En el escenario SSP3-7.0, la pérdida alcanzó 570,15 ha (85,63 %), la ganancia 515,45 ha (77,41 %) y la estabilidad 95,69 ha (14,37 %). Para el escenario SSP5-8.5, la pérdida fue de 572,31 ha (85,95 %), la ganancia de 385,66 ha (57,92 %) y la estabilidad de 93,53 ha (14,05 %).

La suma de las áreas de pérdida y estabilidad correspondió al área potencialmente idónea del periodo actual (665,85 ha), mientras que la suma de las áreas de ganancia y estabilidad correspondió al área potencialmente idónea de cada escenario futuro, con 623 ha para SSP1-2.6; 611,15 ha para SSP3-7.0 y 479,19 ha para SSP5-8.5.

Figura 21

Gráfico del tipo de cambio en la distribución potencial

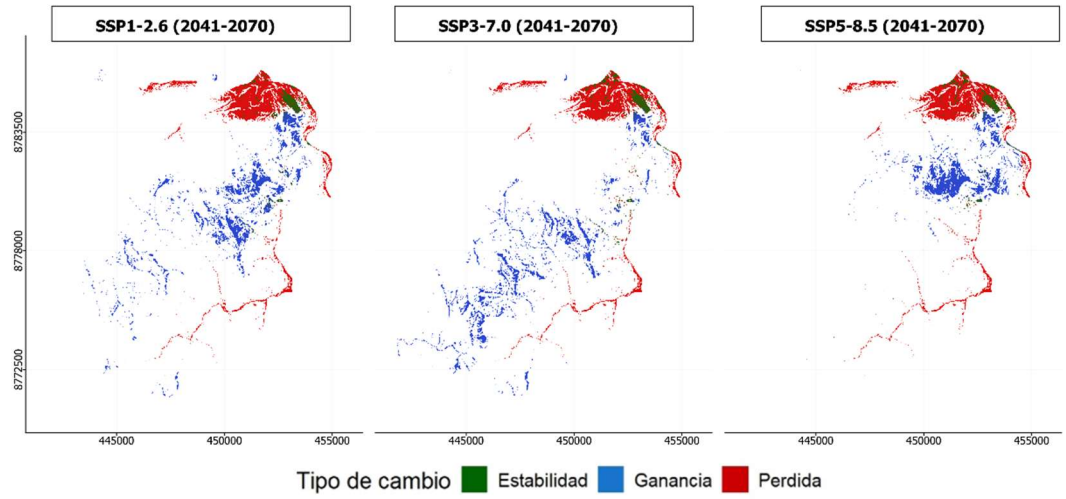


Nota. El gráfico muestra los cambios en la distribución potencial de *C. angustifolia* bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el año 2070. Las barras verdes representan las áreas de estabilidad, las azules las áreas de ganancia y las rojas las áreas de pérdida. Los porcentajes corresponden a la proporción de cada categoría de cambio respecto al área potencial actual de *C. angustifolia*.

La Figura 21 muestra una presentación grafica del tipo de cambio entre los escenarios climáticos futuros, evidencia un predominio de las áreas de pérdida de idoneidad potencial en los tres escenarios evaluados, mientras que las áreas de estabilidad representan una proporción menor del área potencial actual. Entre los escenarios, SSP1-2.6 presenta la mayor superficie de ganancia, seguida de SSP3-7.0, mientras que SSP5-8.5 registra la menor superficie de ganancia. En este último escenario también se observa la mayor diferencia entre las superficies de pérdida y ganancia, evidenciando un balance espacial menos favorable de la distribución potencial respecto al periodo actual.

Figura 22

Mapa del cambio espacial en la distribución potencial



Nota. El mapa muestra los cambios espaciales en la distribución potencial de *C. angustifolia* bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el año 2070.

La Figura 22 muestra los cambios espaciales en la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* entre el periodo actual (1981-2010) y los escenarios climáticos futuros (2041-2070), diferenciando las áreas de pérdida, ganancia y estabilidad de la idoneidad ambiental. Se observa que las áreas de pérdida se concentran principalmente en los sectores norte y noreste del área de estudio, formando superficies relativamente continuas, además de presentarse en sectores periféricos hacia el sur y sureste.

Las áreas de ganancia se distribuyen principalmente en los sectores central y sur del área de estudio, presentándose como parches de menor extensión y algunas unidades de configuración lineal. Esta distribución varía entre escenarios, observándose una menor extensión de las áreas de ganancia hacia el sector suroeste conforme se consideran escenarios de mayor forzamiento, con una concentración progresiva de estas áreas hacia el sector centro-este.

Por su parte, las áreas de estabilidad presentan una distribución espacial más restringida, conformada principalmente por pequeños parches localizados en el extremo noreste del área de estudio y próximos a las áreas clasificadas como

pérdida. La extensión y distribución de estas áreas varía entre los escenarios, siendo más reducida bajo SSP5-8.5.

En conjunto, el mapa muestra una distribución espacial diferenciada de los tipos de cambio entre escenarios, con predominio de áreas de pérdida en los sectores norte y noreste, áreas de ganancia principalmente en los sectores central y sur, y áreas de estabilidad concentradas en sectores específicos del noreste.

-Desplazamiento de la distribución potencial de *C. angustifolia*

El desplazamiento de la distribución potencial de *Cedrela angustifolia* se determinó mediante la distancia euclidiana entre el centroide de idoneidad ambiental correspondiente al periodo actual (1981-2010) y los centroides obtenidos para los escenarios climáticos futuros (2041-2070). Las coordenadas de los centroides de idoneidad ambiental se presentan en la Tabla 8.

Tabla 14

Centroides de idoneidad ambiental

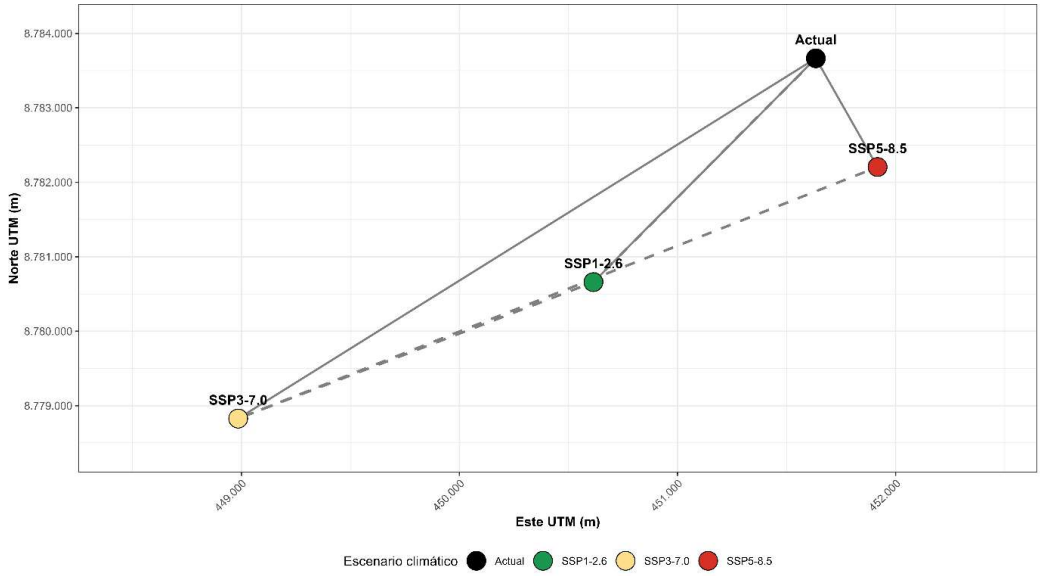
Escenario	Este (x)	Norte (y)	Desplazamiento (km)
Actual	451634.2	8783665	-
SSP1-2.6	450614.3	8780659	3,174
SSP3-7.0	448985.3	8778827	5,516
SSP5-8.5	451917.2	8782205	1,487

La Tabla 14 muestra las coordenadas del centroide de la distribución potencial para el periodo actual y los escenarios climáticos futuros, así como la distancia de desplazamiento del centroide respecto a la condición actual. El centroide correspondiente al periodo actual se ubicó en las coordenadas X = 451634.2 m e Y = 8783665 m. Para el escenario SSP1-2.6, el centroide se ubicó en X = 450614.3 m e Y = 8780659 m, lo que representa un desplazamiento de 3,174 km respecto a la posición actual. En el escenario SSP3-7.0, el centroide se localizó en X = 448 985.3 m e Y = 8778827 m, registrándose el mayor desplazamiento, con una distancia de 5,516 km. Finalmente, bajo el escenario SSP5-8.5, el centroide se ubicó en X = 451 917.2 m e Y = 8 782 205 m, con un desplazamiento de 1,487 km respecto al periodo actual.

En términos comparativos, el mayor desplazamiento del centroide correspondió al escenario SSP3-7.0 (5,516 km), seguido por SSP1-2.6 (3,174 km), mientras que SSP5-8.5 presentó el menor desplazamiento (1,487 km). Estos resultados indican que la magnitud y dirección del cambio en la localización del centroide de idoneidad ambiental varían entre los escenarios climáticos evaluados.

Figura 23

Grafica del desplazamiento espacial del centroide de idoneidad ambiental



Nota. El punto correspondiente a "Actual" representa el centroide de la distribución potencial de *C. angustifolia* para el periodo 1981-2010. Los puntos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 corresponden a los centroides proyectados para el periodo 2041-2070. Las líneas representan la distancia euclidiana entre el centroide actual y cada escenario futuro.

La Figura 23 representa espacialmente el desplazamiento del centroide de la distribución potencial de *C. angustifolia* desde el periodo actual hacia los escenarios climáticos futuros. El centroide actual constituye el punto de referencia para evaluar la modificación de su posición bajo cada escenario.

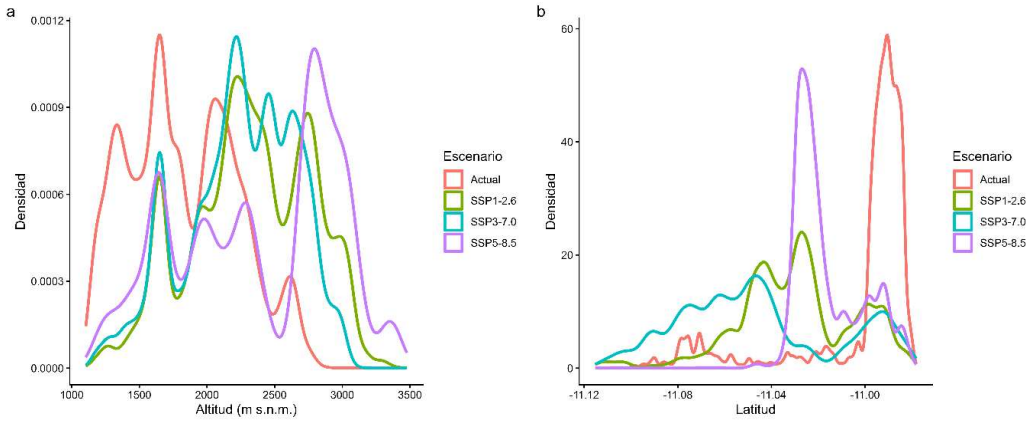
En el escenario SSP1-2.6, el centroide presentó un desplazamiento hacia el suroeste, debido a la disminución de las coordenadas X e Y respecto a la condición actual. Esta modificación alcanzó una distancia de 3,174 km. El escenario SSP3-7.0 presentó un comportamiento similar, aunque con una mayor magnitud de desplazamiento, alcanzando 5,516 km hacia el suroeste. Por su parte, en el escenario

SSP5-8.5, el centroide presentó un desplazamiento de 1,487 km hacia el sureste, caracterizado por un incremento de la coordenada X y una disminución de la coordenada Y.

En conjunto, los resultados evidencian una modificación espacial del centroide de la distribución potencial de *C. angustifolia* bajo los escenarios climáticos futuros. El escenario SSP3-7.0 mostró la mayor magnitud de desplazamiento, mientras que SSP5-8.5 presentó la menor. Por tanto, los cambios proyectados en las condiciones climáticas se asociaron con diferentes respuestas espaciales de la distribución potencial de la especie, expresadas mediante variaciones en la posición del centroide de idoneidad ambiental.

Figura 24

Gráfico de curvas de densidad de altitud y latitud



Nota. (a) Distribución de la idoneidad ambiental a lo largo del gradiente altitudinal y (b) distribución de la idoneidad ambiental a lo largo del gradiente latitudinal de *C. angustifolia*, bajo la condición actual (1981-2010) y los escenarios futuros SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (2041-2070).

La Figura 24 muestra las curvas de densidad kernel de la distribución de la idoneidad ambiental de *Cedrela angustifolia* a lo largo de los gradientes altitudinal (a) y latitudinal (b), comparando la condición actual (1981-2010) con las proyecciones climáticas para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

En el gradiente altitudinal (Figura 24a), la condición actual presentó una mayor concentración de la idoneidad ambiental en altitudes comprendidas

aproximadamente entre 1300 y 1700 m snm., observándose una disminución progresiva de la densidad hacia elevaciones mayores y valores próximos a cero por encima de los 2 700 m snm. En contraste, las proyecciones futuras mostraron una modificación de la distribución de la densidad hacia elevaciones superiores. Bajo los tres escenarios climáticos, los máximos de densidad se concentraron aproximadamente entre 2 200 y 2 800 m snm., evidenciando un desplazamiento de la idoneidad ambiental hacia mayores elevaciones. El escenario SSP5-8.5 presentó el máximo de densidad a una elevación cercana a 2 800 m snm. y una extensión de la distribución hacia valores próximos a 3 500 m snm. Los escenarios SSP1-2.6 y SSP3-7.0 también mostraron una mayor concentración de la idoneidad en elevaciones superiores respecto a la condición actual, aunque con diferencias en la forma y amplitud de las curvas.

En el gradiente latitudinal (Figura 24b), la condición actual presentó una concentración marcada de la idoneidad ambiental alrededor de la latitud -10.99°, con una disminución de la densidad hacia latitudes más negativas. En los escenarios futuros se observó una modificación de este patrón, con una reducción de la densidad alrededor de -10.99° y una mayor concentración de la idoneidad hacia latitudes más negativas, aproximadamente entre -11.02° y -11.08°. Entre los escenarios futuros, SSP5-8.5 presentó una concentración más marcada de la densidad alrededor de -11.03°, mientras que SSP3-7.0 mostró una distribución relativamente más amplia a lo largo del gradiente latitudinal. En conjunto, las curvas evidencian una modificación de la distribución de la idoneidad ambiental respecto a la condición actual, caracterizada principalmente por un desplazamiento hacia mayores elevaciones y hacia latitudes más negativas durante el periodo futuro proyectado.

4.1.5. Contribución de las variables ambientales en la distribución potencial

En esta sección se presentan los resultados del análisis de Jackknife y de la contribución porcentual y la importancia por permutación de las variables ambientales utilizadas en los cuatro modelos de distribución potencial: periodo actual y escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

Los resultados de la contribución porcentual (CP) y la importancia por permutación (IP) de las variables ambientales empleadas en los modelos de distribución

potencial de *Cedrela angustifolia* para la condición actual (1981-2010) y los escenarios climáticos futuros SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (2041-2070).

Tabla 15

Contribución de las variables ambientales

Variables	Escenarios							
	Actual		SSP1-2.6		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	CP%	IP%	CP%	IP%	CP%	IP%	CP%	IP%
BIO15	29	40,6	67,8	65,5	61,6	60,3	58,9	64,4
BIO2	65,9	41,2	1,9	0,8	0,5	0,4	11	20,4
BIO18	0,7	0,6	9,2	10,5	22,3	9,4	15	0,4
TRI	4,4	17,7	21,1	23,2	16,1	30,2	15,1	14,8

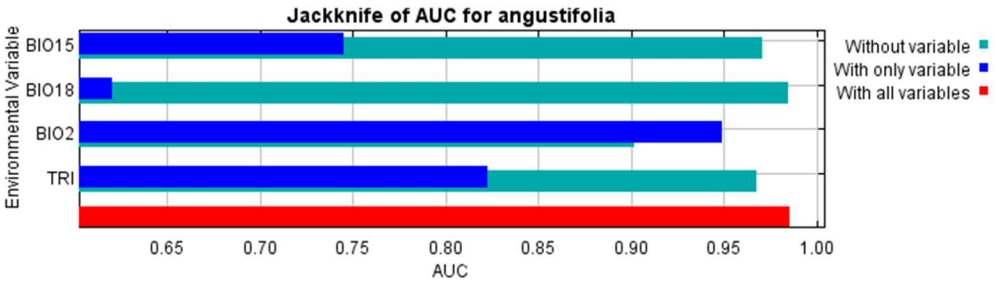
Nota. CP= contribución porcentual; IP= Importancia de permutación

La Tabla 15 contiene los valores de contribución porcentual e importancia de permutación de las variables predictoras, para la condición actual, BIO2 presentó la mayor contribución porcentual (65,9 %) y la mayor importancia por permutación (41,2 %), seguida de BIO15, con 29,0 % de contribución y 40,6 % de importancia. TRI presentó valores de 4,4 % y 17,7 %, respectivamente, mientras que BIO18 registró los valores más bajos, con 0,7 % de contribución y 0,6 % de importancia por permutación.

En los escenarios futuros, BIO15 presentó la mayor contribución porcentual e importancia por permutación, con valores de CP de 67,8 %, 61,6 % y 58,9 % en SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente. TRI se destacó especialmente en SSP3-7.0, mientras que BIO18 tuvo mayor aporte en SSP1-2.6 y SSP3-7.0. En SSP5-8.5, BIO2 incrementó su importancia, alcanzando 11,0 % de CP y 20,4 % de IP.

Figura 25

Gráfico de prueba Jackknife bajo el escenario actual

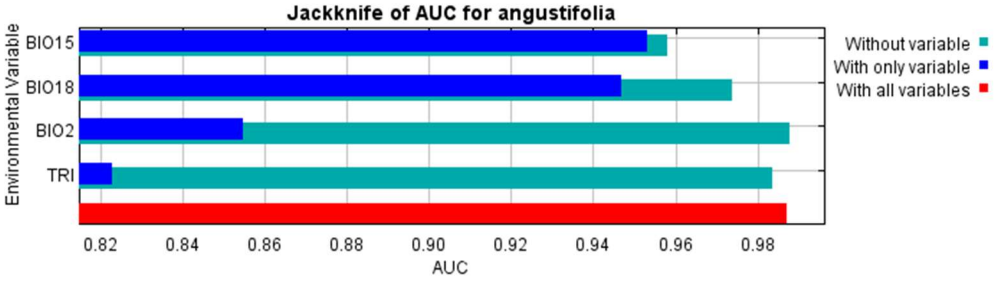


Nota. Las barras azules representan el AUC obtenido utilizando únicamente cada variable; las barras verdes, el AUC obtenido al excluir cada variable del modelo; y la barra roja, el AUC del modelo utilizando todas las variables.

La Figura 25 presenta la gráfica de prueba Jackknife para la condición actual (1981-2010), el modelo que utilizó todas las variables presentó un AUC aproximado de 0,985, respecto al BIO2 mostró el mayor AUC cuando fue utilizada individualmente, evidenciando el mayor aporte predictivo aislado, asimismo, su exclusión produjo una disminución apreciable del AUC del modelo, en el caso del TRI presentó un aporte individual intermedio y una reducción moderada al ser excluida, y por último el BIO15, aunque presentó un AUC individual elevado, su exclusión generó una disminución menor, lo que indica que parte de la información que aporta es compartida con las demás variables y el BIO18 presentó el menor aporte individual y un efecto reducido al ser excluida.

Figura 26

Gráfico de prueba Jackknife bajo escenario SSP1-2.6



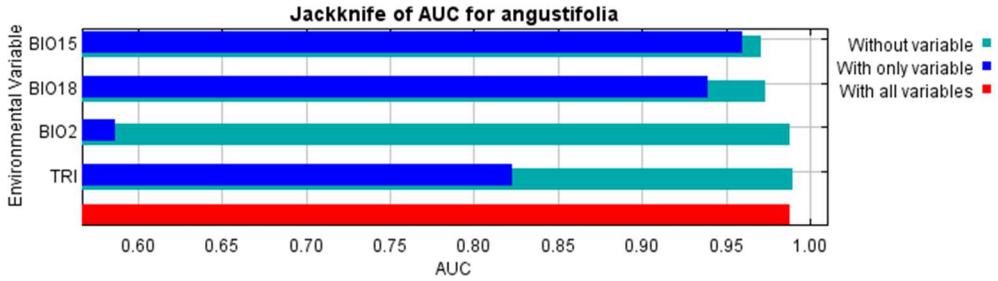
Nota. El gráfico muestra la contribución de cada variable ambiental al desempeño del modelo de distribución SSP1-2.6 (2041-2070). Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las

barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

La Figura 26 presenta la gráfica de prueba Jackknife para el escenario SSP1-2.6 (2041-2070), el modelo con todas las variables alcanzó un AUC aproximado de 0,987, el BIO15 presentó el mayor AUC individual (≈0,953), seguida de BIO18 (≈0,947), además, la exclusión de BIO15 produjo la mayor disminución del AUC, hasta aproximadamente 0,958, evidenciando que esta variable contiene una proporción importante de información exclusiva. Respecto a la exclusión de BIO18 también redujo el desempeño, aunque en menor magnitud, hasta aproximadamente 0,973, por su parte, BIO2 (≈0,855) y TRI (≈0,822) presentaron menores AUC individuales y un efecto reducido al ser excluidas.

Figura 27

Gráfico de prueba Jackknife bajo escenario SSP3-7.0



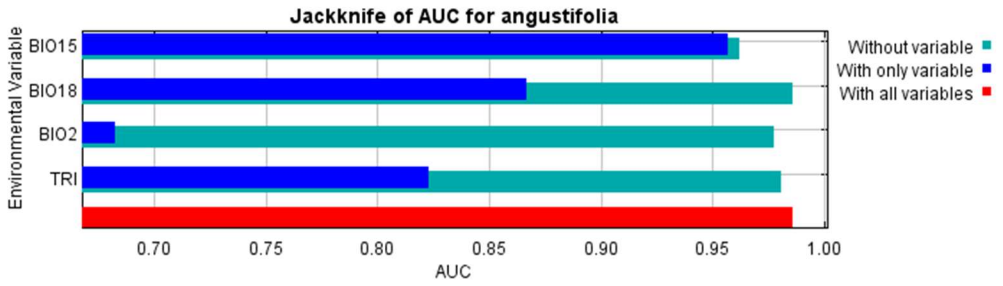
Nota. El gráfico muestra la contribución de cada variable ambiental al desempeño del modelo de distribución SSP3-7.0 (2041-2070). Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

La Figura 27 muestra la gráfica de prueba Jackknife para el escenario SSP3-7.0 (2041-2070), el modelo completo presentó un AUC aproximado de 0,988. BIO15 registró el mayor AUC individual (≈0,960), seguida de BIO18 (≈0,938), mientras que TRI presentó un AUC individual de aproximadamente 0,823. La exclusión de BIO15 produjo la mayor disminución del AUC, hasta aproximadamente 0,970, seguida por la exclusión de BIO18, que redujo el AUC hasta aproximadamente 0,973. En contraste, BIO2 presentó un AUC individual inferior a 0,60 y su exclusión

prácticamente no modificó el desempeño del modelo, evidenciando un aporte exclusivo reducido bajo este escenario.

Figura 28

Gráfico de prueba de Jackknife bajo escenario SSP5-8.5



Nota. Las barras azules indican la ganancia de entrenamiento obtenida al utilizar únicamente la variable evaluada; las barras verdes, la ganancia al eliminar dicha variable; y las barras rojas, la ganancia del modelo al utilizar todas las variables.

La Figura 28 muestra la gráfica de la prueba de Jackknife bajo el escenario SSP5-8.5 (2041-2070), el modelo completo alcanzó un AUC aproximado de 0,985 (Figura 24). BIO15 presentó nuevamente el mayor AUC individual (≈0,956) y la mayor disminución del desempeño al ser excluida, reduciendo el AUC hasta aproximadamente 0,962. BIO18 presentó un AUC individual de aproximadamente 0,867, mientras que TRI alcanzó ≈0,823, ambos con efectos relativamente menores al ser excluidos. BIO2 mostró el menor AUC individual (≈0,68) y su exclusión produjo una variación mínima en el desempeño general del modelo.

Los resultados de la prueba de Jackknife fueron, en términos generales, concordantes con la contribución porcentual y la importancia por permutación presentadas en la tabla 11. En la condición actual, BIO2 destacó tanto por su mayor contribución porcentual (65,9 %) e importancia por permutación (41,2 %) como por presentar el mayor AUC cuando fue utilizada individualmente. En los escenarios futuros, BIO15 presentó de manera consistente los mayores valores de contribución porcentual e importancia por permutación, y también mostró el mayor AUC individual y la mayor pérdida de desempeño al ser excluida en los análisis de Jackknife. Asimismo, BIO18 y TRI presentaron aportes secundarios cuya magnitud varió entre escenarios. No obstante, las métricas no mostraron exactamente el

mismo orden de importancia en todas las variables, debido a que evalúan aspectos diferentes del aporte de cada predictor.

4.2. Discusión

4.2.1. Distribución potencial actual de C. angustifolia en el SNPH

La distribución potencial actual de *Cedrela angustifolia* estimada para el periodo de referencia 1981-2010 comprendió 665,85 ha; equivalente al 3,29 % del área de estudio, concentrándose principalmente en sectores específicos del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. Este resultado evidencia que, bajo las condiciones ambientales de referencia, las áreas con mayor idoneidad ambiental para la especie se encuentran espacialmente restringidas, en lugar de presentar una distribución uniforme dentro del área evaluada. La concentración de la idoneidad en sectores del bosque montano y basimontano, principalmente entre aproximadamente 1300 y 1700 m snm., resulta además consistente con las condiciones ambientales donde se ha registrado la especie en el ámbito nacional.

El desempeño del modelo MaxEnt respaldó la capacidad del modelo para discriminar entre las condiciones ambientales asociadas a los registros de presencia y las condiciones disponibles en el área de estudio. El AUC obtenido para la condición actual fue de 0,986 ± 0,003, valor que evidencia un alto desempeño discriminativo. Este resultado es comparable con lo reportado por Ames-Martínez et al. (2025), quienes obtuvieron valores de AUC entre 0,97 y 1,00 para modelos de distribución de *C. angustifolia* en los bosques montanos, y con Lozano (2020), quien obtuvo valores superiores a 0,90 para especies del género *Cedrela*, incluyendo *C. montana*. Asimismo, Chamochumbi (2023) obtuvo valores de AUC entre 0,943 y 0,975 para *C. odorata*. En conjunto, estos resultados muestran que el algoritmo MaxEnt puede presentar un elevado desempeño discriminativo cuando se dispone de registros de ocurrencia y variables ambientales adecuadas, aunque las diferencias entre los valores obtenidos deben interpretarse considerando la especie, el número y distribución de registros, la extensión del área de estudio, la resolución espacial y el conjunto de variables empleado. La calidad del modelo no debe valorarse únicamente a partir del AUC, en la presente investigación, la variabilidad entre las réplicas fue reducida, con desviaciones estándar de 0,0005 para el AUC de entrenamiento y 0,0035 para el AUC de prueba. Asimismo, la desviación estándar

media de los valores del raster fue de 0,005027 y el 95 % del área presentó una desviación estándar igual o inferior a 0,014310. Estos resultados indican una respuesta espacial relativamente estable entre las réplicas y fortalecen la interpretación del modelo actual. Esta evaluación de estabilidad constituye un elemento metodológico adicional al AUC y permite evitar que el desempeño del modelo sea interpretado exclusivamente mediante una única medida de discriminación.

La superficie potencial obtenida en este estudio es menor que la reportada en investigaciones realizadas a escalas geográficas más amplias. Ames-Martínez et al. (2025) estimaron para *C. angustifolia* una distribución potencial actual de 13 080 km² considerando la pérdida de cobertura arbórea y de 16 148,5 km² sin dicho efecto, mediante un análisis de los bosques montanos de Ecuador, Perú, Bolivia y Argentina. A escala nacional, Cotrina et al. (2021) identificaron 86 916,2 km² (6,7 % del territorio nacional) con alta probabilidad de distribución potencial para el conjunto de especies del género *Cedrela* en el Perú, de los cuales 10 171,03 km² (4,4 %) se localizaron dentro de áreas naturales protegidas. Asimismo, SERFOR (2020b) estimó para *C. angustifolia* una distribución potencial de aproximadamente 123 230,3 km², equivalente al 9,53 % del territorio peruano. Por su parte, Lozano (2020) estimó superficies potenciales de 114 537,02 ha para *C. odorata* y 85 082,22 ha para *C. montana* en Amazonas, equivalentes al 2,92 % y 2,17 % de la superficie departamental, respectivamente. Estas diferencias no deben interpretarse como contradicciones, debido a que los estudios presentan distintas escalas geográficas, especies, extensiones de análisis, resoluciones espaciales, registros de presencia y conjuntos de variables ambientales. En el presente estudio, el análisis se restringió al SN Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento, por lo que la superficie estimada representa la idoneidad ambiental potencial dentro de un territorio mucho más reducido y ambientalmente heterogéneo.

La concentración espacial de la idoneidad ambiental coincide principalmente con zonas de cobertura vegetal correspondientes a bosques montanos y basimontanos. De acuerdo con estudios botánicos y reportes florísticos, *Cedrela angustifolia* se distribuye principalmente en bosques montanos húmedos de los andes tropicales, caracterizados por una elevada humedad ambiental y un rango altitudinal

aproximado entre 1800 y 3500 m snm. (Ames-Martínez et al., 2025; SERFOR, 2020b; Terreros-Camac et al., 2025). Los resultados obtenidos muestran una coincidencia parcial con este patrón, además, El Plan Maestro del Santuario Nacional Pampa Hermosa 2022-2027 reconoce la existencia del sector denominado "Los Cedros de Pampa Hermosa", asociado a un bosque relicto de cedro ubicado aproximadamente entre 1550 y 1700 m snm. (SERNANP, 2022). Esta coincidencia resulta relevante porque el modelo identificó una concentración de áreas potencialmente adecuadas aproximadamente dentro de ese intervalo altitudinal. Sin embargo, dicha correspondencia debe interpretarse como evidencia de consistencia ecológica y espacial, y no como una validación independiente del modelo, debido a que los registros de presencia utilizados para calibrarlo constituyen parte de la información que determina su respuesta ambiental.

Los resultados también guardan relación con la información regional reportada por Terreros-Camac et al. (2025), quienes documentaron la presencia de *C. angustifolia* en el valle de Chanchamayo y señalaron un comportamiento fenológico estacional para esta especie. La proximidad geográfica entre dicho ámbito y el Santuario Nacional Pampa Hermosa proporciona un contexto ecológico compatible con la identificación de sectores ambientalmente favorables en el área de estudio. De manera complementaria, SERFOR (2020b) resalta la importancia de profundizar el conocimiento sobre la distribución y estado situacional del género *Cedrela* en el Perú para fortalecer su gestión y conservación. En este sentido, la delimitación espacial obtenida en el presente estudio aporta información de mayor detalle para un ámbito protegido específico, que puede complementar los diagnósticos realizados a escalas nacionales.

Desde el punto de vista metodológico, el resultado actual presenta fortalezas relacionadas con la depuración de los registros de presencia, el control de la autocorrelación espacial, la selección de variables ambientales mediante diferentes criterios y la evaluación de la estabilidad del modelo. La reducción de los registros iniciales mediante adelgazamiento espacial a una distancia de 13 m permitió disminuir la dependencia espacial entre observaciones sin eliminar una proporción excesiva de los datos disponibles. Además, la selección final de las variables mediante correlación, Jackknife, relevancia ecológica y VIF permitió reducir la

redundancia entre predictores. Estas decisiones contribuyen a obtener una estimación más consistente de la idoneidad ambiental potencial; no obstante, como en todo modelo de distribución basado en presencia, la estimación representa una aproximación a la idoneidad ambiental potencial y no equivale directamente a la distribución observada de las poblaciones ni a la abundancia de individuos.

En consecuencia, los resultados obtenidos respaldan la primera hipótesis de investigación, debido a que la distribución potencial actual de *C. angustifolia* ocupó una proporción reducida del área evaluada y se concentró en sectores específicos del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. Por tanto, se responde a la primera pregunta de investigación indicando que, durante el periodo 1981-2010, las condiciones ambientales potencialmente adecuadas para la especie se localizaron de manera espacialmente restringida dentro del área analizada.

4.2.2. Cambios espaciales en la distribución potencial futura bajo escenarios climáticos en el SNPH

La proyección de la distribución potencial para el periodo 2041-2070 evidenció una reducción de la superficie ambientalmente adecuada para *Cedrela angustifolia* bajo los tres escenarios climáticos evaluados. La superficie pasó de 665,85 ha en el periodo de referencia a 623,00 ha bajo SSP1-2.6, 611,15 ha bajo SSP3-7.0 y 479,19 ha bajo SSP5-8.5, lo que representa disminuciones de 6,43 %, 8,21 % y 28,03 %, respectivamente. Por tanto, los resultados muestran una tendencia general hacia una menor superficie potencialmente adecuada, siendo la reducción más pronunciada bajo el escenario SSP5-8.5.

Esta tendencia coincide con los resultados obtenidos para *C. angustifolia* Ames-Martínez et al. (2025), quienes proyectaron para 2070 una disminución de la distribución potencial de 33,93 % bajo el escenario SSP3-7.0 y de 42,32 % bajo SSP5-8.5, considerando el efecto de la pérdida de cobertura arbórea. Sin este efecto, la reducción estimada fue de 29,91 % y 30,53 %, respectivamente. Aún más señalo que Perú y Argentina presentarían algunas de las mayores reducciones relativas del hábitat potencial. Ambos estudios identifican una reducción de las áreas potencialmente adecuadas de *C. angustifolia* bajo condiciones climáticas futuras.

Un comportamiento semejante ha sido descrito para otras especies forestales. Siqueira et al. (2019) estimaron reducciones aproximadas de 47 % bajo RCP4.5 y 63 % bajo RCP8.5 para *Cedrela fissilis* hacia 2070, acompañadas por un desplazamiento de las áreas potencialmente favorables hacia nuevas regiones. Chamochumbi (2023), para *C. odorata* reportó reducciones de 81,5 % y 91 % bajo RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Por su parte, Medina et al. (2021), al analizar la distribución de *Cedrela salvadorensis* en Mesoamérica, identificaron una reducción aproximada del 31 % de la superficie potencial al excluir las áreas deforestadas y considerar únicamente las zonas que conservaban cobertura vegetal. Asimismo, Shen et al. (2022) identificaron una disminución de las áreas adecuadas para especies de *Liriodendron*, mientras que Alberdi (2021) encontró pérdida de idoneidad climática y desplazamiento geográfico de diversas formaciones forestales de los Andes Meridionales. Estos antecedentes coinciden con la tendencia general observada en el presente estudio, aunque la magnitud de las pérdidas difiere entre investigaciones debido a las características propias de cada especie, área geográfica, escenario, periodo temporal y metodología.

Los resultados obtenidos por Rojas et al. (2020) y Ramos et al. (2018) también muestran que las especies forestales no necesariamente responden al cambio climático únicamente mediante pérdidas de superficie, sino que pueden presentar simultáneamente procesos de reducción y expansión de áreas potencialmente adecuadas. En el presente estudio, el análisis de cambio espacial permitió identificar precisamente esta dinámica, evidenciándose áreas de pérdida y ganancia de idoneidad ambiental potencial. Bajo SSP1-2.6 se estimaron 579,91 ha de pérdida y 85,93 ha de estabilidad, mientras que bajo SSP3-7.0 se identificaron 570,15 ha de pérdida y 515,45 ha de ganancia. Por ello, la modificación futura no debe interpretarse exclusivamente como una reducción de superficie, sino como una reconfiguración espacial de las áreas potencialmente adecuadas.

Esta reconfiguración también estuvo acompañada por un cambio en la ubicación de las zonas de mayor idoneidad. Mientras que la condición actual presentó una concentración aproximada entre 1300 y 1700 m snm., las proyecciones futuras mostraron una mayor concentración alrededor de 2200-2800 m snm., con una extensión hacia mayores elevaciones en el escenario SSP5-8.5. Este

comportamiento es concordante con Khanal et al., (2022), quienes identificaron un desplazamiento de las áreas adecuadas de *Pterocarpus marsupium* hacia mayores elevaciones en zonas montañosas bajo escenarios futuros.

Sin embargo, este desplazamiento debe interpretarse con precisión. El incremento de la elevación de las áreas potencialmente adecuadas no significa que las poblaciones de *C. angustifolia* migren efectivamente hacia mayores altitudes. El modelo estima cambios en la idoneidad ambiental potencial a partir de las relaciones establecidas entre los registros de presencia y las variables ambientales. La ocupación real de las nuevas áreas dependerá, entre otros factores, de la capacidad de dispersión de la especie, disponibilidad de hábitat, conectividad, establecimiento de plántulas, competencia, perturbaciones y otras condiciones ecológicas que no fueron incorporadas directamente en el modelo.

La magnitud de la reducción obtenida bajo SSP5-8.5 adquiere particular relevancia al compararla con el escenario de menor emisión. Aunque los escenarios SSP no constituyen predicciones deterministas, sino representaciones de posibles trayectorias futuras de desarrollo y emisiones (IPCC, 2021), la diferencia entre ellos permite evaluar la sensibilidad espacial del modelo frente a distintas condiciones climáticas. En la presente investigación, el menor porcentaje de reducción se obtuvo bajo SSP1-2.6, mientras que la mayor pérdida se presentó bajo SSP5-8.5. Esta gradación es coherente con la necesidad de considerar diferentes escenarios para representar la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas.

La calidad metodológica de estas proyecciones está respaldada por el desempeño obtenido en los modelos futuros: AUC de 0,987 ± 0,007 para SSP1-2.6, 0,988 ± 0,007 para SSP3-7.0 y 0,985 ± 0,006 para SSP5-8.5. Los valores muestran que el desempeño discriminativo se mantuvo elevado al proyectar el modelo hacia las condiciones futuras. No obstante, la elevada capacidad discriminativa no elimina las incertidumbres asociadas a la proyección. En particular, las variables climáticas futuras fueron sometidas previamente a un proceso de reducción de escala espacial, por lo que la incertidumbre de los datos climáticos de origen y la asociada al procedimiento de *downscaling* debe considerarse al interpretar los cambios a escala de 12,5 m.

Asimismo, las proyecciones futuras representan principalmente cambios asociados a las variables ambientales incluidas en el modelo. No se incorporaron explícitamente variables futuras relacionadas con deforestación, cambios de cobertura vegetal, presión antrópica, competencia interespecífica, dispersión, dinámica poblacional o capacidad adaptativa. Esta limitación es especialmente importante al contrastar los resultados con Ames-Martínez et al. (2025), quienes incorporaron el efecto de la pérdida de cobertura arbórea en sus modelos y demostraron que esta puede modificar sustancialmente la superficie potencial de *C. angustifolia*. Por tanto, la reducción estimada en esta investigación debe interpretarse específicamente como un cambio en la idoneidad ambiental potencial asociada a las condiciones climáticas y topográficas consideradas, y no como una estimación directa de pérdida futura de individuos o poblaciones.

En consecuencia, los resultados respaldan la segunda hipótesis de investigación, debido a que la superficie potencialmente adecuada disminuyó en los tres escenarios evaluados respecto de la condición actual, con una reducción particularmente marcada bajo SSP5-8.5. Por tanto, la segunda pregunta de investigación se responde señalando que la distribución potencial futura de *C. angustifolia* no solo presenta una reducción de superficie, sino también una reconfiguración espacial y un desplazamiento de las zonas de mayor idoneidad hacia sectores de mayor elevación.

4.2.3. Contribución de las variables ambientales en la distribución potencial

La selección final del modelo estuvo conformada por cuatro predictores ambientales: BIO2, BIO15, BIO18 y TRI, de los cuales tres correspondieron a variables bioclimáticas y uno a una variable topográfica. El análisis de multicolinealidad mostró valores de VIF inferiores a 5 para las variables seleccionadas: 4,573 para BIO15; 1,321 para BIO18; 1,534 para BIO2 y 1,135 para TRI. Estos resultados indican que, dentro del conjunto final, no se mantuvieron niveles de colinealidad que superaran el criterio establecido para la selección de predictores.

La selección de variables no se sustentó únicamente en la correlación estadística. La aplicación conjunta de análisis de correlación, Jackknife, contribución porcentual, importancia por permutación, relevancia ecológica y VIF permitió

reducir progresivamente las variables redundantes y conservar aquellas que aportaban información al modelo. Este procedimiento constituye una fortaleza metodológica, debido a que la incorporación indiscriminada de variables correlacionadas puede generar información redundante y dificultar la interpretación de la contribución individual de los predictores.

En la condición actual, BIO2 presentó la mayor contribución porcentual, con 65,9 %, y una importancia por permutación de 41,2 %, mientras que BIO15 presentó 29,0 % de contribución y 40,6 % de importancia por permutación. Estos resultados indican que las variables relacionadas con las condiciones climáticas aportaron una mayor cantidad de información relativa al modelo que la variable topográfica TRI. Este patrón es consistente con Ames-Martínez et al. (2025), quienes encontraron que variables climáticas, particularmente la estacionalidad de la precipitación, presentaron elevada contribución en los modelos de distribución de *C. angustifolia*. De igual manera, Shen et al. (2022) y Khanal et al. (2022) evidenciaron que variables climáticas relacionadas con precipitación y condiciones térmicas contribuyeron significativamente a explicar la idoneidad ambiental de especies arbóreas bajo escenarios actuales y futuros.

La importancia de las condiciones térmicas para *C. angustifolia* también encuentra sustento en la evidencia regional de Acevedo (2018), quien encontró una correlación positiva entre el crecimiento radial de *C. angustifolia* y la temperatura durante junio-septiembre. Esta evidencia no permite afirmar que BIO2 determine directamente la distribución de la especie, debido a que BIO2 representa el promedio del rango diurno de temperatura y el estudio dendrocronológico analizó relaciones entre crecimiento y variables climáticas específicas. Sin embargo, ambos resultados proporcionan evidencia complementaria de que las condiciones térmicas pueden constituir un componente relevante para comprender la respuesta ambiental de *C. angustifolia*.

BIO15 también presentó una importancia considerable en el modelo actual y adquirió mayor relevancia en las proyecciones futuras. Este resultado guarda relación con Ames-Martínez et al. (2025), quienes identificaron la estacionalidad de la precipitación como una de las variables de mayor contribución en la distribución actual y futura de *C. angustifolia*. Además, Terreros-Camac et al.

(2025) documentaron que *C. angustifolia* presenta un comportamiento fenológico estacional en el valle de Chanchamayo, con procesos reproductivos relacionados con la estacionalidad de las lluvias. Esta coincidencia no implica que la estacionalidad de la precipitación sea la causa directa de la distribución modelada, pero proporciona un contexto ecológico que ayuda a interpretar la relevancia de BIO15 en las proyecciones.

BIO18 complementó la representación de las condiciones de precipitación y fue seleccionada mediante el análisis de contribución, importancia por permutación y Jackknife. Su incorporación permitió representar una dimensión climática distinta de la estacionalidad general, evitando depender de una sola variable relacionada con precipitación. En conjunto, la permanencia de BIO15 y BIO18 en el modelo final evidencia que diferentes características del régimen de precipitación aportan información complementaria para caracterizar las condiciones ambientales asociadas a la presencia potencial de la especie.

La variable topográfica TRI también aportó información al modelo, aunque su comportamiento fue diferente al de las variables bioclimáticas. Durante la selección del tercer grupo de variables, TRI presentó 17,0 % de contribución y 20,9 % de importancia por permutación, mientras que la pendiente presentó una contribución superior; sin embargo, la exclusión de TRI produjo una disminución considerable del AUC, por lo que fue conservada en el modelo final. En el escenario SSP3-7.0, TRI alcanzó una importancia por permutación aproximada de 30,2 %, demostrando que la influencia relativa de una variable puede cambiar entre condiciones climáticas. Por ello, la topografía no debe considerarse irrelevante, sino complementaria a las condiciones climáticas en la representación espacial de la idoneidad ambiental.

Los resultados obtenidos también permiten contrastar la importancia de las variables con Cotrina et al. (2021), quienes modelaron la distribución potencial del género *Cedrela* en el Perú utilizando variables bioclimáticas, topográficas, edáficas, radiación solar y humedad relativa. Aunque el conjunto de predictores utilizado en dicho estudio fue más amplio, ambos trabajos evidencian la utilidad de integrar variables climáticas y topográficas para representar la distribución potencial de especies del género *Cedrela*. La diferencia fundamental radica en que la presente

investigación realizó una selección más restrictiva de predictores, orientada a disminuir la redundancia y conservar variables con aporte al desempeño del modelo.

Los antecedentes de Grignola et al., (2014) también proporcionan un marco ecológico complementario para interpretar la sensibilidad de especies del género *Cedrela* frente a condiciones térmicas, mientras que Khanal et al., (2022) evidenciaron modificaciones en la elevación de la distribución potencial de *C. odorata* bajo escenarios futuros. Estas investigaciones apoyan la importancia de considerar conjuntamente los componentes climáticos y espaciales al interpretar la distribución futura, aunque las respuestas específicas pueden variar entre especies.

En términos de calidad metodológica, la selección final presenta como fortaleza la combinación de criterios estadísticos y ecológicos, así como la comprobación de la multicolinealidad mediante VIF. La exclusión de altitud, por ejemplo, estuvo sustentada en su elevada colinealidad inicial con otras variables, mientras que TRI fue retenida porque su exclusión produjo una disminución importante del desempeño del modelo. Este procedimiento permite justificar que la selección final no respondió únicamente a los valores más altos de contribución, sino a la capacidad de cada predictor para aportar información complementaria dentro de un conjunto ambiental reducido.

En consecuencia, los resultados respaldan la tercera hipótesis de investigación, debido a que las variables bioclimáticas seleccionadas (BIO2, BIO15 y BIO18) presentaron, en conjunto, una mayor contribución relativa al modelo que la variable topográfica TRI, aunque esta última también aportó información relevante y fue necesaria para mantener el desempeño del modelo. Por tanto, la tercera pregunta de investigación se responde indicando que la distribución potencial de *C. angustifolia* estuvo representada principalmente por variables bioclimáticas, complementadas por la información topográfica proporcionada por TRI.

V. CONCLUSIONES

1. La distribución potencial actual de *Cedrela angustifolia* presentó un alto desempeño discriminativo, con un AUC promedio de 0,986. Las áreas potencialmente idóneas comprendieron 665,85 ha; equivalentes al 3,29 % del área evaluada, y se concentraron principalmente asociados a bosques basimontanos, la idoneidad ambiental potencial de la especie se encontró espacialmente restringida dentro del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.
2. La distribución potencial proyectada para 2041-2070 evidenció una reducción de la superficie potencialmente idónea respecto a la condición actual. La disminución fue de 6,43 % en SSP1-2.6; 8,21 % en SSP3-7.0 y 28,03 % en SSP5-8.5, siendo este último escenario el que presentó la mayor reducción. El análisis espacial identificó áreas de pérdida, ganancia y estabilidad en los tres escenarios, con predominio de la pérdida, mientras que el centroide de idoneidad presentó desplazamientos de 3,17 km; 5,52 km y 1,49 km, respectivamente. Asimismo, se evidenció una redistribución de la idoneidad potencial hacia mayores elevaciones durante el periodo futuro.
3. Las variables bioclimáticas presentaron mayor contribución relativa que la variable topográfica en el modelamiento de la distribución potencial de *C. angustifolia*. En la condición actual, BIO2 fue el predictor de mayor contribución, mientras que en los escenarios futuros BIO15 presentó la mayor contribución e importancia por permutación, acompañado por aportes de BIO18 y TRI. Esto evidencia variaciones en la importancia relativa de los predictores entre la condición actual y las proyecciones futuras, manteniéndose el predominio de las variables bioclimáticas.
4. El modelamiento permitió caracterizar la distribución potencial actual y futura de *C. angustifolia*, evidenciando reducción de la superficie idónea, cambios espaciales y desplazamientos del centroide y gradiente altitudinal. Estos resultados constituyen una base para orientar acciones de monitoreo, conservación, restauración ecológica y mantenimiento de la conectividad del hábitat potencial en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.

VI. RECOMENDACIONES

1. Implementar acciones de conservación y restauración ecológica en las áreas identificadas con alta idoneidad ambiental para *Cedrela angustifolia*, con especial atención en los sectores de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Pampa Hermosa. Estas acciones pueden comprender la recuperación de la cobertura vegetal, el enriquecimiento forestal con especies nativas y la restauración de corredores ecológicos, con el propósito de mejorar la conectividad del paisaje, favorecer la regeneración natural y contribuir a la conservación de las poblaciones de la especie.
2. Desarrollar investigaciones complementarias que incorporen variables ambientales y ecológicas adicionales, tales como características edáficas, dinámica de la cobertura vegetal, dinámica poblacional, fragmentación del hábitat, disponibilidad de recursos y presión antrópica. La integración de estos factores permitiría mejorar la capacidad explicativa de los modelos de distribución y obtener una representación más integral de las condiciones que influyen en la distribución de *C. angustifolia*.
3. Integrar los mapas de distribución potencial obtenidos en esta investigación al programa de monitoreo de *Cedrela angustifolia* del Santuario Nacional Pampa Hermosa, utilizándolos como herramienta complementaria para priorizar áreas de seguimiento de la regeneración natural, establecer nuevas parcelas en sectores con alta idoneidad ambiental y realizar un monitoreo específico de las zonas que presentan pérdida potencial de hábitat bajo escenarios climáticos futuros.
4. Actualizar periódicamente los registros de presencia de *C. angustifolia* mediante inventarios botánicos y registros georreferenciados, principalmente en sectores donde el modelo identifica alta idoneidad ambiental y no se dispone actualmente de registros confirmados. Esta información permitirá contrastar las predicciones del modelo, fortalecer su validación y generar una base de datos actualizada para futuras evaluaciones de la distribución potencial de la especie en el Santuario Nacional Pampa Hermosa.

VII. REFERENCIAS

Abdulwahab, U. A., Hammill, E., & Hawkins, C. P. (2022). Choice of climate data affects the performance and interpretation of species distribution models. *Ecological Modelling*, *471*, 110042. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110042

Acevedo Vega, I.M. Ferrero, M. E., & Requena Rojas, E. J. (2017). *Libro de resúmenes - Dendrocronología en los bosques montanos del Perú: potencialidad de Cedrela spp. para estudios climáticos.* CONICET. https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/en/6814621

Acevedo Vega, I. M. (2018). *Identificación de la variable climática que controla el crecimiento de Cedrela sp., Cedrela nebulosa T. D. y Cedrela angustifolia C. DC. en los bosques montanos del Perú* [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Institucional de la Universidad Alas Peruanas. https://hdl.handle.net/20.500.12990/6224

Aguirre-Gutiérrez, J., Díaz, S., Rifai, S. W., Corral-Rivas, J. J., Nava-Miranda, M. G., Gonzálezm, R., Hurtadom, A. B., Revilla, N. S., Vilanova, E., Almeida, E., de Oliveira, E. A., Alvarez-Davila, E., Alves, L. F., de Andrade, A. C. S., da Costa, A. C. L., Vieira, S. A., Aragão, L., Arets, E., Aymard, G. A. C., … Malhi, Y. (2025). Tropical forests in the Americas are changing too slowly to track climate change. *Science*, *387*(6738). https://doi.org/10.1126/science.adl5414

Ahmad, A., & Gopi, G. V. (2025). Understanding Multi-Scale and Multi-Species Habitat Selection by Mammals in the Eastern Himalayan Biodiversity Hotspot. *Ecology and Evolution*, *15*(4), e71247. https://doi.org/10.1002/ece3.71247

Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, *38*(5), 541–545. https://doi.org/10.1111/ecog.01132

Alberdi Nieves, V. (2021). Modelado de distribución de especies en los bosques de los andes meridionales. *Papeles de Geografía*, *66*(66), 195–207. https://doi.org/10.6018/geografia.409051

Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M. N., Parmentier, B., Ranipeta, A., Malczyk,

J., & Jetz, W. (2018). Data Descriptor: A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific Data*, *5*(1), 180040. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.40

Ames-Martínez, F. N., Romero, I. C., Guerra, A., Guillen, J. G. I., Quispe-Melgar, H. R., Galeano, E., & Rodríguez-Ramírez, E. C. (2025). Climate change and tree cover loss affect the habitat suitability of Cedrela angustifolia: Evaluating climate vulnerability and conservation in Andean montane forests. *PeerJ*, *13*(2). https://doi.org/10.7717/peerj.18799

Andina. (2025, 17 de octubre). *Día de las áreas naturales protegidas: ¿Cuántas hay en Perú y cuál es su importancia?*. https://andina.pe/agencia/noticia-dia-las-areas-naturales-protegidas-cuantas-hay-peru-y-cual-es-su-importancia-1048436.aspx

Antão, L. H., Weigel, B., Strona, G., Hällfors, M., Kaarlejärvi, E., Dallas, T., Opedal, Ø. H., Heliölä, J., Henttonen, H., Huitu, O., Korpimäki, E., Kuussaari, M., Lehikoinen, A., Leinonen, R., Lindén, A., Merilä, P., Pietiäinen, H., Pöyry, J., Salemaa, M., … Laine, A. L. (2022). Climate change reshuffles northern species within their niches. *Nature Climate Change*, *12*(6), 587–592. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01381-x

Araujo Llumiquinga, E. E. (2024). *Modelamiento de la distribución espacial de nueve especies de la familia Accipitridae basado en el cambio del uso del suelo en la región andina, Ecuador.* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional de la Universidad Central del Ecuador. https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/33259

Avaligbé, Y. J. F., Chabi, F. O., Gnanglè, C. P., Bello, O. D., Yabi, I., Ahoton, L., & Saïdou, A. (2021). Modelling the Current and Future Spatial Distribution Area of Shea Tree (<i>Vittelaria paradoxa</i> C. F. Gaertn) in the Context of Climate Change in Benin. *American Journal of Climate Change*, *10*(03), 263–281. https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.103012

Baker, D. J., Maclean, I. M. D., & Gaston, K. J. (2024). Effective strategies for correcting spatial sampling bias in species distribution models without independent test data. *Diversity and Distributions*, *30*(3), e13802. https://doi.org/10.1111/ddi.13802

Bartholomew, D. C., Bittencourt, P. R. L., Galiano Cabrera, D., Sacatuma Cruz, R., Chambi Paucar, J. R., Corrales Alvarez, D., Cosio, E., Espinoza Otazu, B.,

Mamani, D. M., Meir, P., Muñoz Hermoza, G. A., Oliveira, R. S., Puma Vilca, B. L., Rosalai, A., Salas Yupayccana, C., Salinas, N., Sanchez Tintaya, J., Yuca Palomino, J. A., & Metcalfe, D. B. (2026). Tropical Montane Cloud Forests Have High Resilience to Five Years of Severe Soil Drought. *Global Change Biology*, *32*(1). https://doi.org/10.1111/gcb.70670

Bax, V., Castro-Nunez, A., & Francesconi, W. (2021). Assessment of Potential Climate Change Impacts on Montane Forests in the Peruvian Andes: Implications for Conservation Prioritization. *Forests 2021, Vol. 12, Page 375*, *12*(3), 375. https://doi.org/10.3390/f12030375

Benavides Rios, E., Sadler, J., Graham, L., & Matthews, T. J. (2024). Species distribution models and island biogeography: Challenges and prospects. *Global Ecology and Conservation*, *51*(March), e02943. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02943

Benavidez Silva, C., Salazar, E., Paulen Espinoza, A., Chuncho Moricho, G., Juela Sivisca, O., & Anibal, G. (2025). Uso de suelo, cambio climático y biodiversidad: Un acercamiento desde el metaanálisis (2001–2022). *Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research, 62,* 37–61. https://doi.org/10.38191/iirr-jorr.24.036

Bendix, J., Aguire, N., Beck, E., Bräuning, A., Brandl, R., Breuer, L., Böhning-Gaese, K., de Paula, M. D., Hickler, T., Homeier, J., Inclan, D., Leuschner, C., Neuschulz, E. L., Schleuning, M., Suarez, J. P., Trachte, K., Wilcke, W., Windhorst, D., & Farwig, N. (2021). A research framework for projecting ecosystem change in highly diverse tropical mountain ecosystems. *Oecologia 2021 195:3*, *195*(3), 589–600. https://doi.org/10.1007/s00442-021-04852-8

Bonifácio-Anacleto, F., Barrios-Leal, D. Y., Sobral-Souza, T., & Alzate-Marin, A. L. (2024). Climate change impacts the distribution and suitability of two wild species of the genus Stylosanthes. *Journal of Arid Environments*, *221*, 105124. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105124

Bradley, B. A., Beaury, E. M., Gallardo, B., Ibáñez, I., Jarnevich, C., Morelli, T. L., Sofaer, H. R., Sorte, C. J. B., & Vilà, M. (2024). Observed and Potential Range Shifts of Native and Nonnative Species with Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *55*(1), 23–40. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102722-013135

Brambilla, M., Bazzi, G., & Ilahiane, L. (2024). The effectiveness of species

distribution models in predicting local abundance depends on model grain size. *Ecology*, *105*(2), e4224. https://doi.org/10.1002/ecy.4224

Briceño, N. B. R., Castillo, E. B., Torres, O. A. G., Oliva, M., Tafur, D. L., Gurbillón, M. Á. B., Corroto, F., López, R. S., & Rascón, J. (2020). Morphometric prioritization, fluvial classification, and hydrogeomorphological quality in high Andean livestock micro-watersheds in northern Peru. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(5), 305. https://doi.org/10.3390/ijgi9050305

Brunialti, G., & Frati, L. (2021). Modeling of species distribution and biodiversity in forests. *Forests*, *12*(3), 1–3. https://doi.org/10.3390/f12030319

Cardoso Villacorta, S., & Cuellar Bautista, J. E. (2016). *Recuperación, ecología y silvicultura del cedro de altura (Cedrela angustifolia) en la región de Cusco* [Ponencia]. XII Congreso Nacional Forestal (CONAFOR), Lima, Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria. https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/377

Chamochumbi Chvedine, D. E. (2023). *La distribución espacial del cedro (Cedrela odorata L.) dentro del Bosque de Protección San Matías-San Carlos y su Zona de Amortiguamiento: proyecciones para el periodo 2041 - 2060*. [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP. https://hdl.handle.net/20.500.12404/25373

Christmann, T., & Menor, I. O. (2021). A synthesis and future research directions for tropical mountain ecosystem restoration. *Scientific Reports, 11*(1), 23948. https://doi.org/10.1038/s41598-021-03205-y

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. (2019). *Consideration of proposals for amendment of Appendices I and II: Inclusion of all species of the genus Cedrela in Appendix II of CITES (CoP18 Prop. 57).* https://cites.org/sites/default/files/esp/cop/18/prop/19032019/S-CoP18-Prop-57.pdf

Coelho, M. T. P., Barreto, E., Rangel, T. F., Diniz-Filho, J. A. F., Wüest, R. O., Bach, W., Skeels, A., McFadden, I. R., Roberts, D. W., Pellissier, L., Zimmermann, N. E., & Graham, C. H. (2023). The geography of climate and the global patterns of species diversity. *Nature*, *622*(7983), 537–544. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06577-5

Cotrina Sánchez, A., Rojas Briceño, N. B., Bandopadhyay, S., Ghosh, S., Torres

Guzmán, C., Oliva, M., Guzman, B. K., & Salas López, R. (2021). Biogeographic distribution of Cedrela spp. Genus in Peru using maxent modeling: A conservation and restoration approach. *Diversity*, *13*(6), 261. https://doi.org/10.3390/d13060261

Cotrina Sánchez, D. A., Barboza Castillo, E. B., Rojas Briceño, N. B., Oliva, M., Guzman, C. T., Amasifuen Guerra, C. A., & Bandopadhyay, S. (2020). Distribution models of timber species for forest conservation and restoration in the Andean-Amazonian landscape, North of Peru. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(19), 7945. https://doi.org/10.3390/SU12197945

De Marco, P., & Nóbrega, C. C. (2018). Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. *PLOS ONE*, *13*(9), e0202403. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, *17*(1), 43–57. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x

Fadrique, B., Costa, F., Cuesta, F., Arellano, G., Cayuela, L., Baker, T. R., Draper, F. C., Esquivel-Muelbert, A., ter Steege, H., Bauters, M., Aguirre-Gutiérrez, J., Aguirre-Mendoza, Z., Alexiades, M. N., Alvarez-Davila, E., Arets, E., Ayala, E., Aymard, C. G. A., Baccaro, F., Báez, S., Phillips, O. L. (2026). Tree diversity is changing across tropical Andean and Amazonian forests in response to global change. *Nature Ecology & Evolution 2026*, 1–14. https://doi.org/10.1038/s41559-025-02956-5

FAO. (2025, 21 de octubre). *La deforestación mundial se desacelera, pero los bosques siguen bajo presión, según informe de la FAO*. https://www.fao.org/americas/news/news-detail/deforestacion-mundial-informe/es

Feeley, K., Martinez-Villa, J., Perez, T., Silva Duque, A., Triviño Gonzalez, D., & Duque, A. (2020). The Thermal Tolerances, Distributions, and Performances of Tropical Montane Tree Species. *Frontiers in Forests and Global Change*, *3*, 497514. https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00025/text

Frans, V. F., & Liu, J. (2024). Gaps and opportunities in modelling human influence on species distributions in the Anthropocene. *Nature Ecology and Evolution*, *8*(7), 1365–1377. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02435-3

Gardner, A. S., Maclean, I. M. D., & Gaston, K. J. (2019). Climatic predictors of

species distributions neglect biophysiologically meaningful variables. *Diversity and Distributions*, *25*(8), 1318–1333. https://doi.org/10.1111/ddi.12939

GEOBOSQUES. (2025). *Bosque y Perdida de bosque*. https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php

Gotelli, N. J., & Ellison, A. M. (2013). *A primer of ecological statistics* (2nd ed.). Sinauer Associates.

Grignola, J., Acreche, M., Di Rienzo, J., Gatto, M., & Fornes, L. (2014). Potencialidad de especies y procedencias de Cedrela para el establecimiento de plantaciones sustentables en diferentes ambientes del Noroeste Argentino. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *40*(3), 260–268. http://www.scielo.org.ar/pdf/ria/v40n3/v40n3a08.pdf

Guillaume, A. S., Leempoel, K., Rogivue, A., Gugerli, F., Parisod, C., & Joost, S. (2024). Integrating very high resolution environmental proxies in genotype–environment association studies. *Evolutionary Applications*, *17*(7), e13737. https://doi.org/10.1111/eva.13737

Guisan, A., Chevalier, M., Adde, A., Zarzo-Arias, A., Goicolea, T., Broennimann, O., Petitpierre, B., Scherrer, D., Rey, P. L., Collart, F., Riva, F., Steen, B., & Mateo, R. G. (2025). Spatially nested species distribution models (N-SDM): An effective tool to overcome niche truncation for more robust inference and projections. *Journal of Ecology*, *113*(7), 1588–1605. https://doi.org/10.1111/1365-2745.70063

Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). Modeling Approaches and Model Calibration. *Habitat Suitability and Distribution Models*, 151–236. https://doi.org/10.1017/9781139028271.014

Harris, J., Pirtle, J. L., Laman, E. A., Siple, M. C., & Thorson, J. T. (2024). An ensemble approach to species distribution modelling reconciles systematic differences in estimates of habitat utilization and range area. *Journal of Applied Ecology*, *61*(2), 351–364. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14559

Heinicke, S., Zantout, K., Kühl, H. S., Reyer, C. P. O., Zimmermann, S., Billing, M., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hantson, S., Ito, A., Kou-Giesbrecht, S., Koutroulis, A., Mester, B., Müller Schmied, H., Ostberg, S., Otta, K., Pokhrel, Y., & Frieler, K. (2026). Land vertebrates increasingly exposed to multiple extreme events by 2085. *Nature Ecology and Evolution*, *10*(5), 854–863.

https://doi.org/10.1038/s41559-026-03050-0

Hernández, O. G., Artigas, R. C., González, J. M. S., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, *0*(78), 88–126. https://doi.org/10.21138/bage.2395

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodologia de la Investigacion* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

International Union for Conservation of Nature. (2021). *The IUCN Red List of Threatened Species*. https://www.iucnredlist.org/

IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.* E. S. Brondízio, J. Settele, S. Díaz, & H. T. Ngo (Eds.). IPBES Secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC. (2021). *Cambio climático 2021: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Irem, A., & Orhan, M. K. (2024). Prediction of the potential spatial distribution of the Vitis vinifera (Narince cv) species under current and future climate change scenarios using the MaxENT model. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University, 41(3),* 157–165. https://doi.org/10.55507/gopzfd.1554325

Janaki, A., J.Alig, R., Pankai, L., Evan, M., Anita, T. M., Edward, A. S., & Eric, M. W. (2011). *Effects of climate change on natural resources and communities: A compendium of briefing papers* (General Technical Report PNW-GTR-837). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. https://doi.org/10.2737/pnw-gtr-837

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4,* 170122.

https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Khanal, S., Timilsina, R., Behroozian, M., Peterson, A. T., Poudel, M., Alwar, M. S. S., Wijewickrama, T., & Osorio-Olvera, L. (2022). Potential impact of climate change on the distribution and conservation status of Pterocarpus marsupium, a Near Threatened South Asian medicinal tree species. *Ecological Informatics*, *70*, 101722. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101722

Kübler, D., Hildebrandt, P., Günter, S., Stimm, B., Weber, M., Mosandl, R., Muñoz, J., Cabrera, O., Aguirre, N., Zeilinger, J., & Silva, B. (2016). Assessing the importance of topographic variables for the spatial distribution of tree species in a tropical mountain forest. *Erdkunde*, *70*(1), 19–47. https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.03

Laos Ayala, A. D. C. (2022). *Análisis de la diversidad genética de las poblaciones silvestres del "cedro de altura" Cedrela angustifolia utilizando marcadores moleculares* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. https://hdl.handle.net/20.500.14138/5252

Lawlor, J. A., Comte, L., Grenouillet, G., Lenoir, J., Baecher, J. A., Bandara, R. M. W. J., Bertrand, R., Chen, I. C., Diamond, S. E., Lancaster, L. T., Moore, N., Murienne, J., Oliveira, B. F., Pecl, G. T., Pinsky, M. L., Rolland, J., Rubenstein, M., Scheffers, B. R., Thompson, L. M., Sunday, J. (2024). Mechanisms, detection and impacts of species redistributions under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment 2024 5:5*, *5*(5), 351–368. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00527-z

Liao, D., Zhou, B., Xiao, H., Zhang, Y., Zhang, S., & Su, Q. (2025). MaxEnt modeling of the impacts of human activities and climate change on the potential distribution of Plantago in China. *Biology, 14(5),* 564. https://doi.org/10.3390/biology14050564

Lindenmayer, D. B., & Laurance, W. F. (2017). The ecology, distribution, conservation and management of large old trees. *Biological Reviews*, *92*(3), 1434–1458. https://doi.org/10.1111/brv.12290

Liu, J., Zhang, W., & Nie, N. (2018). Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Data Using an Optimal Subset Regression Model with NDVI and Terrain Factors in the Yarlung Zangbo River Basin, China. *Advances in Meteorology*, *2018, 3491960*. https://doi.org/10.1155/2018/3491960

Llerena Pinto, C. A., Yalle Paredes, S. R., & Silvestre Espinoza, E. (2014). *Los bosques y el cambio climático en el Perú: Situación y perspectivas.* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://sinia.minam.gob.pe/documentos/bosques-cambio-climatico-peru-situacion-perspectivas

Lozano Delgado, M. E. (2020). *Modelamiento espacial de nichos ecológicos para evaluación de presencia de Cedrela odorata, Cedrela montana y Cedrelinga cateniformis - Amazonas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. https://hdl.handle.net/20.500.14074/3766

Maciel Mata, C. A., Manriquez Moran, N., Octavio Aguilar, P., & Sanchez Rojas, G. (2015). El area de distribucion de las especies: revision del concepto. *Acta Universitaria*, *25*(1), 3–11. https://doi.org/10.15174/au.2015.646

Mahatara, D., Acharya, A. K., Dhakal, B. P., Sharma, D. K., Ulak, S., & Paudel, P. (2021). Maxent modelling for habitat suitability of vulnerable tree Dalbergia latifolia in Nepal. *Silva Fennica, 55(4),* 10441. https://doi.org/10.14214/sf.10441

Marcon, A. K., Longhi-Santos, T., Galvão, F., Martins, K. G., Botosso, P. C., Blum, C. T., Marcon, A. K., Longhi-Santos, T., Galvão, F., Martins, K. G., Botosso, P. C., & Blum, C. T. (2019). Climatic Response of Cedrela fissilis Radial Growth in the Ombrophilous Mixed Forest, Paraná, Brazil. *Floresta e Ambiente*, *26*(3), 0–0. https://doi.org/10.1590/2179-8087.036118

Mata-Guel, E. O., Soh, M. C. K., Butler, C. W., Morris, R. J., Razgour, O., & Peh, K. S. H. (2023). Impacts of anthropogenic climate change on tropical montane forests: an appraisal of the evidence. *Biological Reviews*, *98*(4), 1200–1224. https://doi.org/10.1111/brv.12950

Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, *84*(2), 217–240. https://doi.org/10.4067/s0716-078x2011000200008

Medina, M., Ruiz, M., & Gómez, J. (2021). Análisis de la distribución de Cedrela salvadorensis Standl. (Meliaceae) e implicaciones para su conservación. *Gayana. Botánica.*, *78*(2), 172–183. https://doi.org/10.4067/s0717-66432021000200172

Mengistu, A. G., Tesfuhuney, W. A., Woyessa, Y. E., & Steyn, A. S. (2023).

Potential distribution of selected invasive alien plants under current and future climate change scenarios in South Africa. *Heliyon*, *9*(9), e19867. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19867

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, *36*(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Miller, R. H., Masuoka, P., Klein, T. A., Kim, H., Somer, T., & Grieco, J. (2012). Ecological niche modeling to estimate the distribution of Japanese encephalitis virus in Asia. *PLoS Neglected Tropical Diseases, 6(6),* e1678. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001678

Naranjo, M., Moreno, A. C., & Martín, S. (2014). ¿Dónde buscar troglobiontes? Ensayo de una cartografía predictiva con MaxEnt en Gran Canaria (islas Canarias). *Arxius de Miscel·lània Zoològica*, *12*, 83–92. https://doi.org/10.32800/amz.2014.12.0083

Negi, P. S., Paul, S., & Lata, S. (2025). MaxEnt distribution modelling of Betula utilis D.Don under changing climatic conditions in North Western Himalaya, India. *Discover Geoscience 2025 3:1*, *3*(1), 214. https://doi.org/10.1007/s44288-025-00324-1

Novoseltseva, Y. (2024). Species distribution modelling using MaxEnt: Overview and prospects. *Theriologia Ukrainica, 28,* 102–112. https://doi.org/10.53452/tu2809

OECD. (2018). *Manual de Frascati 2015: Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264310681-es

Organización Meteorológica Mundial. (2024, 28 de octubre). *Las concentraciones de gases de efecto invernadero vuelven a aumentar y alcanzan un nuevo récord en 2023*. https://public.wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-surge-again-new-record-2023

Ometto, J. P., Kalaba, K., Anshari, G. Z., Chacón, N., Farrell, A., Halim, S. A., Neufeldt, H., & Sukumar, R. (2022). Tropical forests. En H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 2369–2410). Cambridge University

Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.024

ONU. (2020). *¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas*. https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change

Ortega Rodriguez, D. R., Sánchez-Salguero, R., Hevia, A., Bovi, R. C., Ferreira, M. J., Speer, J. H., Roig, F. A., & Tomazello-Filho, M. (2023). Does climate change alter the nutrient trends of Cedrela fissilis Vell. trees in the southern Brazilian Amazon? *Ecological Processes*, *12*, 58. https://doi.org/10.1186/s13717-023-00472-7

Özkan Tümer, Y., Caglayan, İ., Yeşil, A., & Iverson, L. (2026). Two decades of species distribution modeling: A systematic review of methods and applications. *Ecological Modelling, 513*, 111441. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111441

Patiño, J., Collart, F., Vanderpoorten, A., Martin-Esquivel, J. L., Naranjo-Cigala, A., Mirolo, S., & Karger, D. N. (2023). Spatial resolution impacts projected plant responses to climate change on topographically complex islands. *Diversity and Distributions*, *29*(10), 1245–1262. https://doi.org/10.1111/ddi.13757

Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, *355*(6332). https://doi.org/10.1126/science.aai9214

Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, *48*, 61–79. https://doi.org/10.4067/s0718-34022011000100005

Ramírez-Barahona, S., Cuervo-Robayo, Á. P., Feeley, K. J., Ortiz-Rodríguez, A. E., Vásquez-Aguilar, A. A., Ornelas, J. F., & Rodríguez-Correa, H. (2025). Upslope plant species shifts in Mesoamerican cloud forests driven by climate and land use change. *Science*, *387*(6738), 1058–1063. https://doi.org/10.1126/science.adn2559

Ramos, J. H., Santos, R. R., Ramos, A. H., Cuevas, X. G., Hernández-Máximo, E., Uicab, J. V. C., & López, D. S. (2018). Distribución histórica, actual y futura

de Cedrela odorata en México. *Acta Botánica Mexicana*, *2018*(124), 00–00. https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305

Reichmuth, A., Kühn, I., Schmidt, A., & Doktor, D. (2025). Forested Natura 2000 sites under climate change: Effects of tree species distribution shifts. *Web Ecology*, *25*(1), 59–89. https://doi.org/10.5194/we-25-59-2025

Restrepo, Z., González-Caro, S., Hartley, I. P., Villegas, J. C., Meir, P., Sanchez, A., Ruiz Carrascal, D., & Mercado, L. M. (2025a). Heterogeneous thermal tolerance of dominant Andean montane tree species. *Communications Earth & Environment 2025 6:1*, *6*(1), 117. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02083-w

Restrepo, Z., González-Caro, S., Hartley, I. P., Villegas, J. C., Meir, P., Sanchez, A., Ruiz Carrascal, D., & Mercado, L. M. (2025b). Heterogeneous thermal tolerance of dominant Andean montane tree species. *Communications Earth & Environment 2025 6:1*, *6*(1), 117. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02083-w

Rivero Lazo, M. S., Meneses Jara, P. W., García Céspedes, J., Anibal Rivero, R. A., & Zevallos Choy, E. L. (2021). *Metodología De La Investigación*. Editorial Universitaria, Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

Rodríguez-Ramírez, E. C., Ferrero, M. E., Acevedo-Vega, I., Crispin-DelaCruz, D. B., Ticse-Otarola, G., & Requena-Rojas, E. J. (2022). Plastic adjustments in xylem vessel traits to drought events in three Cedrela species from Peruvian Tropical Andean forests. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25645-w

Rojas Briceño, N. B., Cotrina Sánchez, D. A., Barboza Castillo, E., Barrena Gurbillón, M. ángel, Sarmiento, F. O., Sotomayor, D. A., Oliva, M., & Salas López, R. (2020). Current and future distribution of five timber forest species in amazonas, northeast peru: Contributions towards a restoration strategy. *Diversity*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/d12080305

Rubenstein, M. A., Weiskopf, S. R., Bertrand, R., Carter, S. L., Comte, L., Eaton, M. J., Johnson, C. G., Lenoir, J., Lynch, A. J., Miller, B. W., Morelli, T. L., Rodriguez, M. A., Terando, A., & Thompson, L. M. (2023). Climate change and the global redistribution of biodiversity: substantial variation in empirical support for expected range shifts. *Environmental Evidence*, *12*(1), 1–21. https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0

Santos, M. J., Smith, A. B., Dekker, S. C., Eppinga, M. B., Leitão, P. J., Moreno-Mateos, D., Morueta-Holme, N., & Ruggeri, M. (2021). The role of land use and land cover change in climate change vulnerability assessments of biodiversity: a systematic review. *Landscape Ecology*, *36*(12), 3367–3382. https://doi.org/10.1007/s10980-021-01276-w

Scafetta, N. (2024). Impacts and risks of "realistic" global warming projections for the 21st century. *Geoscience Frontiers*, *15*(2), 101774. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101774

Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, *126*(5), 1763–1768. https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2026). *reas naturales protegidas.* Biodiversidad en Áreas Naturales Protegidas del Perú. https://biodiversidadanp.sernanp.gob.pe/areas-naturales-protegidas/

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2022). *Plan maestro del Santuario Nacional Pampa Hermosa, periodo 2022–2027*. https://www.gob.pe/institucion/sernanp/normas-legales/3300827-184-2022-sernanp

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2019). *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2017*. https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/serfor/520

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2020a). *Efectos del cambio climático en la distribución de 20 especies forestales maderables de la región amazónica del Perú*. https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/serfor/902

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2020b). *Estado situacional del género Cedrela en el Perú*. https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/serfor/899

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2021, 7 de diciembre). *Comunicado: Requisitos para solicitar permisos de exportación de productos forestales de todas las especies del género Cedrela*. https://www.gob.pe/institucion/serfor/noticias/568181-comunicado-requisitos-para-solicitar-permisos-de-exportacion-de-productos-forestales-de-todas-las-especies-del-genero-cedrela

Shen, Y., Tu, Z., Zhang, Y., Zhong, W., Xia, H., Hao, Z., Zhang, C., & Li, H. (2022). Predicting the impact of climate change on the distribution of two relict Liriodendron species by coupling the MaxEnt model and actual physiological

indicators in relation to stress tolerance. *Journal of Environmental Management*, *322*, 116024. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116024

Siqueira, S. de F., Higuchi, P., & da Silva, A. C. (2019). Contemporary and future potential geographic distribution of *Cedrela fissilis* Vell. under climate change scenarios. *Revista Árvore, 43*(3), e430306. https://doi.org/10.1590/1806-90882019000300006

Soley-Guardia, M., Alvarado-Serrano, D. F., & Anderson, R. P. (2024). Top ten hazards to avoid when modeling species distributions: a didactic guide of assumptions, problems, and recommendations. *Ecography*, *2024*(4), e06852. https://doi.org/10.1111/ecog.06852

Soto, N. G., & Koelle, M. (2025). *Deforestation in Peru: Key facts and main drivers* (OECD Economics Department Working Papers No. 1846). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/e7786877-en

Souza, B. I. De, Farias, R., Lucena, P. De, Souza, R. S., Lima, C., & Gaia, B. (2020). Modeling and potential distribution of tree species relevant to the sociocultural and ecological dynamics of the Sete Cidades National Park, Piauí, Brazil. *Sociedade & Natureza, 32,* 832–846. https://doi.org/10.14393/sn-v32-2020-51103

Sun, X., Wang, J., Zhang, L., Ji, C., Zhang, W., & Li, W. (2022). Spatial Downscaling Model Combined with the Geographically Weighted Regression and Multifractal Models for Monthly GPM/IMERG Precipitation in Hubei Province, China. *Atmosphere*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/atmos13030476

Ten Caten, C., & Dallas, T. (2023). Thinning occurrence points does not improve species distribution model performance. *Ecosphere*, *14*(12), e4703. https://doi.org/10.1002/ecs2.4703

Terreros-Camac, S., Reynel, C., Palacios-Ramos, S., & Reyes-Grande, C. (2025). Fenología de cinco especies coexistentes de Cedrela (Meliaceae) en el valle de Chanchamayo, Junín - Perú. *Revista Forestal Del Perú*, *40*(1), 60–74. https://doi.org/10.21704/rfp.v40i1.1480

Thuiller, W. (2024). Ecological niche modelling. *Current Biology*, *34*(6), R225–R229. https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.02.018

Timaná de la Flor, M., & Cuentas Romero, M. A. (2015). Biogeografía predictiva: técnicas de modelamiento de distribución de especies y su aplicación en el impacto del cambio climático. *Espacio y Desarrollo*, *179*(27), 159–179.

https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201501.008

Torres Silva, R. O. (2023). *Modelamiento de la distribución espacial de tres especies forestales como herramienta para recuperación de áreas degradadas en Amazonas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3579

Tu, L., & Duan, L. (2024). Spatial downscaling analysis of GPM IMERG precipitation dataset based on multiscale geographically weighted regression model: a case study of the Inner Mongolia Reach of the Yellow River basin. *Frontiers in Environmental Science*, *12*(4), 1–12. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1389587

Van der, H. P. (2015). *Resource assessment and forest management plan for the CITES-listed species Cedrela odorata (red cedar) in Guyana*. Guyana Forestry Commission. https://www.itto.int/files/user/thematic/TP_Report_2016_English.pdf

Wang, S., Luo, Y., Li, X., Yang, K., Liu, Q., Luo, X., & Li, X. (2021). Downscaling land surface temperature based on non-linear geographically weighted regressive model over urban areas. *Remote Sensing*, *13*(8), 1–20. https://doi.org/10.3390/rs13081580

Washaya, D. D., Manyangadze, T., & Washaya, S. (2025). Modelling the current and future spatial distribution of suitable areas for *Vernonanthura polyanthes* using MaxEnt in Zimbabwe. *Discover Agriculture, 3*, 193. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00331-3

Wernberg, T., Thomsen, M. S., Burrows, M. T., Filbee-Dexter, K., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Montie, S., Moore, P. J., Oliver, E. C. J., Sen Gupta, A., Smale, D. A., & Smith, K. (2025). Marine heatwaves as hot spots of climate change and impacts on biodiversity and ecosystem services. *Nature Reviews Biodiversity 2025 1:7*, *1*(7), 461–479. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00058-5

Xiang, Y., Li, S., Yang, Q., Liu, J., Liu, Y., Zhao, L., Lin, H., Luo, Y., Ren, J., Luo, X., & Wang, H. (2025). Modeling the Habitat Suitability and Range Shift of Daphniphyllum macropodum in China Under Climate Change Using an Optimized MaxEnt Model. *Biology*, *14*(10), 1–25.

https://doi.org/10.3390/biology14101360

Xu, S., Wu, C., Wang, L., Gonsamo, A., Shen, Y., & Niu, Z. (2015). A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics. *Remote Sensing of Environment*, *162*, 119–140. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.024

Yu, B., Dai, W., Li, S., Wu, Z., & Wang, J. (2024). A new threshold selection method for species distribution models with presence-only data: Extracting the mutation point of the P/E curve by threshold regression. *Ecology and Evolution*, *14*(4), e11208. https://doi.org/10.1002/ece3.11208

Zhang, M. G., Zhou, Z. K., Chen, W. Y., Slik, J. W. F., Cannon, C. H., & Raes, N. (2012). Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. *Biological Conservation*, *153*, 257–264. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.04.023

Zuidema, P. A., Babst, F., Groenendijk, P., Trouet, V., Abiyu, A., Acuña-Soto, R., Adenesky-Filho, E., Alfaro-Sánchez, R., Aragão, J. R. V., Assis-Pereira, G., Bai, X., Barbosa, A. C., Battipaglia, G., Beeckman, H., Botosso, P. C., Bradley, T., Bräuning, A., Brienen, R., Buckley, B. M., Zhou, Z. K. (2022). Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience 2022 15:4*, *15*(4), 269–276. https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8

VIII. ANEXOS

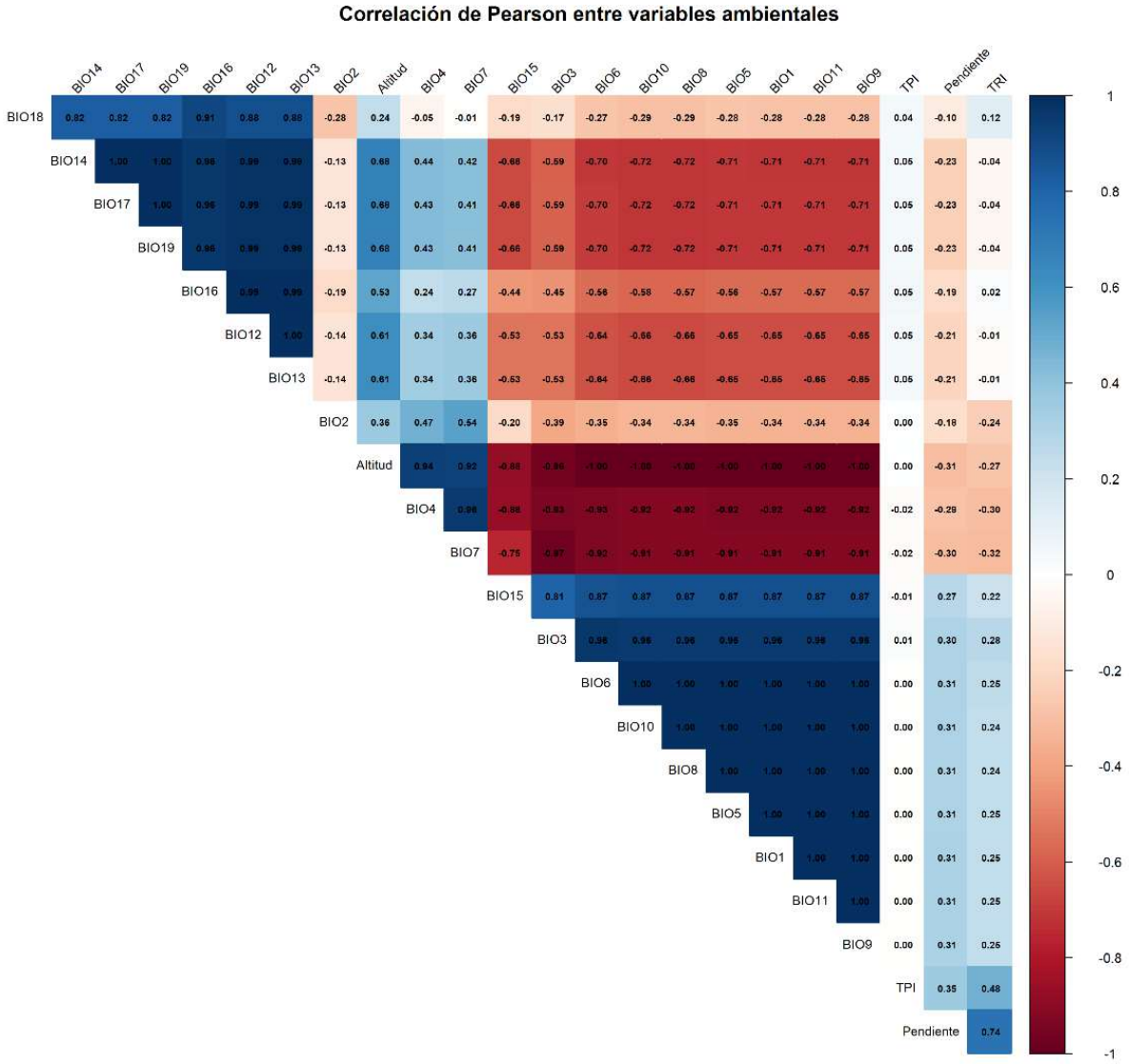
ANEXO 1

Coordenadas de Presencia de *C. angustifolia.*

Nº	Especie	Este	Norte	Fuente
1	*Cedrela angustifolia*	452935	8784828	SERNANP
2	*Cedrela angustifolia*	452914	8784848	SERNANP
3	*Cedrela angustifolia*	452914	8784893	SERNANP
4	*Cedrela angustifolia*	452903	8784860	SERNANP
5	*Cedrela angustifolia*	452910	8784862	SERNANP
6	*Cedrela angustifolia*	452933	8784845	SERNANP
7	*Cedrela angustifolia*	452902	8785180	SERNANP
8	*Cedrela angustifolia*	452909	8785087	SERNANP
9	*Cedrela angustifolia*	452890	8785077	SERNANP
10	*Cedrela angustifolia*	452918	8785023	SERNANP
11	*Cedrela angustifolia*	452960	8784971	SERNANP
12	*Cedrela angustifolia*	453077	8784865	SERNANP
13	*Cedrela angustifolia*	453116	8784730	SERNANP
14	*Cedrela angustifolia*	453134	8784718	SERNANP
15	*Cedrela angustifolia*	453338	8784465	SERNANP
16	*Cedrela angustifolia*	453047	8784870	SERNANP
17	*Cedrela angustifolia*	453092	8784677	SERNANP
18	*Cedrela angustifolia*	453373	8784417	SERNANP
19	*Cedrela angustifolia*	453323	8784394	SERNANP
20	*Cedrela angustifolia*	453299	8784483	SERNANP
21	*Cedrela angustifolia*	453281	8784489	SERNANP
22	*Cedrela angustifolia*	453319	8784519	SERNANP
23	*Cedrela angustifolia*	453113	8784626	SERNANP
24	*Cedrela angustifolia*	452901	8784865	SERNANP
25	*Cedrela angustifolia*	452809	8785155	SERNANP
26	*Cedrela angustifolia*	452818	8785114	SERNANP
27	*Cedrela angustifolia*	452794	8785093	SERNANP
28	*Cedrela angustifolia*	452772	8785103	SERNANP
29	*Cedrela angustifolia*	452733	8785101	SERNANP
30	*Cedrela angustifolia*	452711	8785104	SERNANP
31	*Cedrela angustifolia*	452611	8785128	SERNANP
32	*Cedrela angustifolia*	452847	8785107	SERNANP
33	*Cedrela angustifolia*	452863	8785077	SERNANP
34	*Cedrela angustifolia*	452653	8785164	SERNANP
35	*Cedrela angustifolia*	452651	8785156	SERNANP
36	*Cedrela angustifolia*	453335	8784447	SERNANP
37	*Cedrela angustifolia*	452713	8785154	SERNANP
38	*Cedrela angustifolia*	452648	8785152	SERNANP
39	*Cedrela angustifolia*	453054	8784873	GBIF
40	*Cedrela angustifolia*	453054	8784880	iDigBio

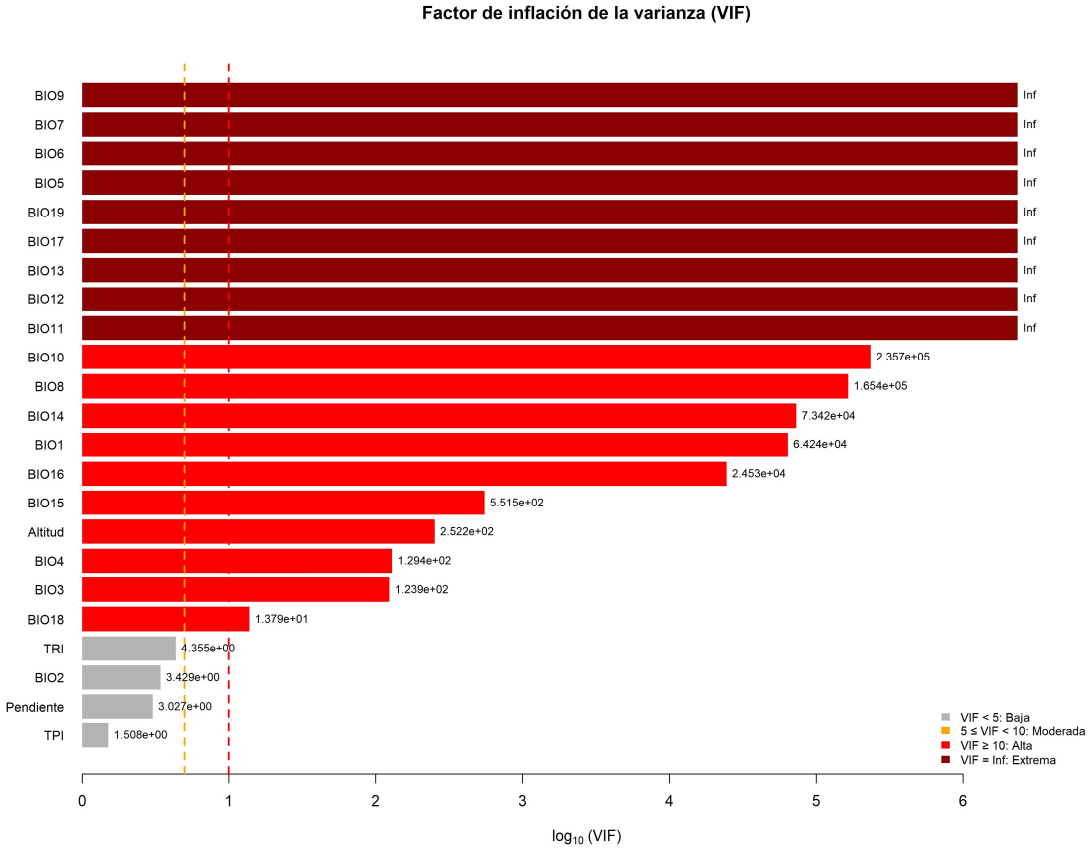
ANEXO 2

Matriz de Pearson aplicada en las 23 variables ambientales (bioclimáticas y topográficas)



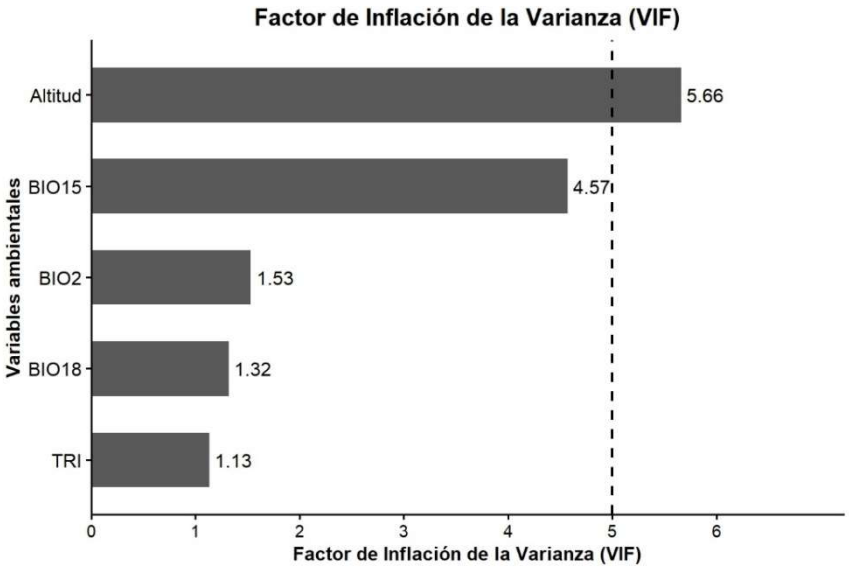
ANEXO 3

Gráfico del factor de inflación de la varianza (VIF) aplicada para las 23 variables ambientales



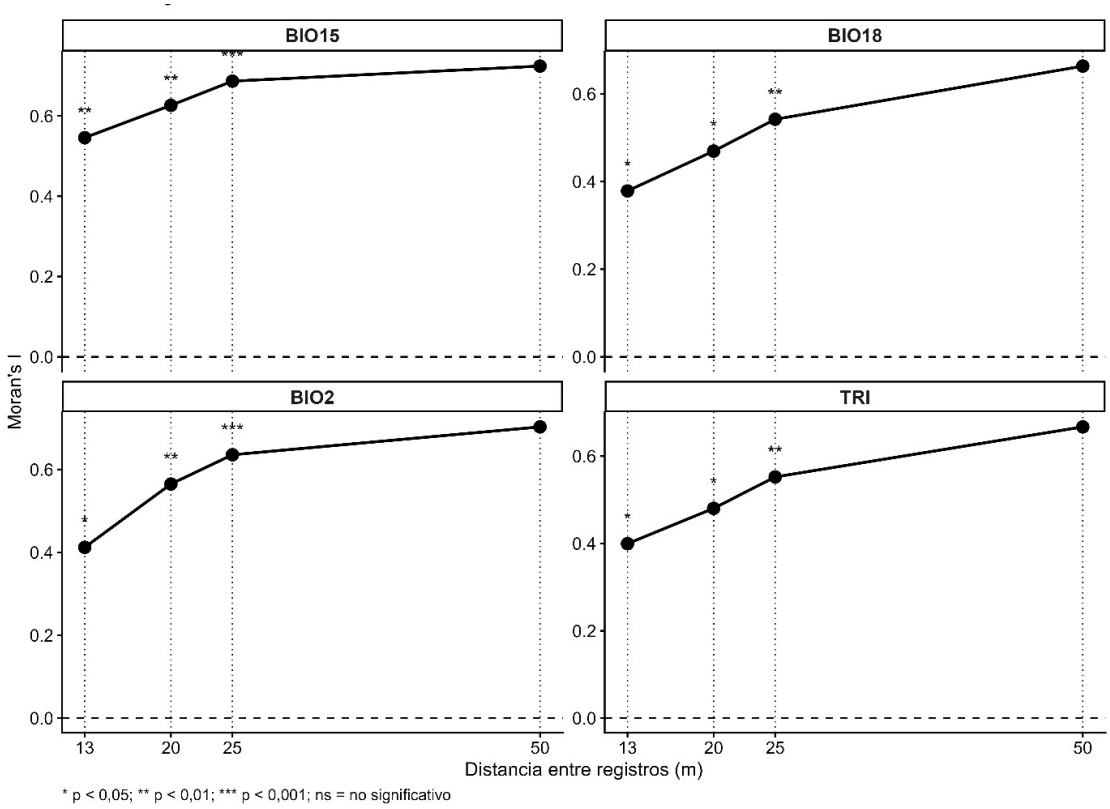
ANEXO 4

Gráfico de factor de inflación de la Varianza (VIF) incluyendo Altitud



ANEXO 5

Gráfico de la autocorrelación espacial de los predictores con Moran's I



ANEXO 6

Resultados de la estabilidad de AUC y área potencial por replicas

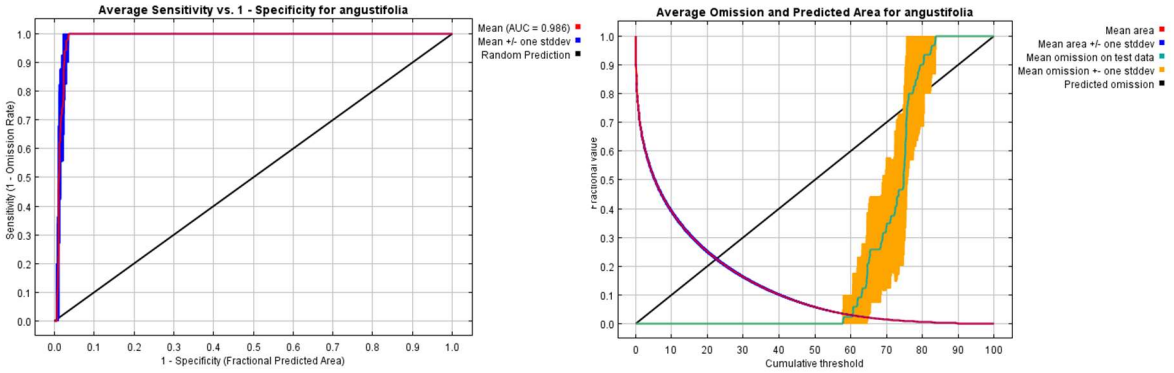
Modelo actual	Training AUC	Test AUC	Test Gain	AUC standard deviation	Área potencial
1	0,9865	0,9807	21,256	0,0051	653,01
2	0,9857	0,9883	24,531	0,0012	673,07
3	0,9855	0,9843	22,728	0,0035	667,96
4	0,9861	0,9869	23,951	0,0028	675,42
5	0,9851	0,9879	24,359	0,0021	692,92
6	0,9852	0,9853	23,077	0,0041	663,23
7	0,9862	0,9826	21,833	0,0049	659,65
8	0,9861	0,9853	23,384	0,0039	652,17
9	0,9853	0,9822	21,213	0,0034	643,26
10	0,9848	0,9918	26,979	0,0016	686,87

ANEXO 7

Curvas de evaluación del modelo MaxEnt: ROC(AUC) para *C. angustifolia*

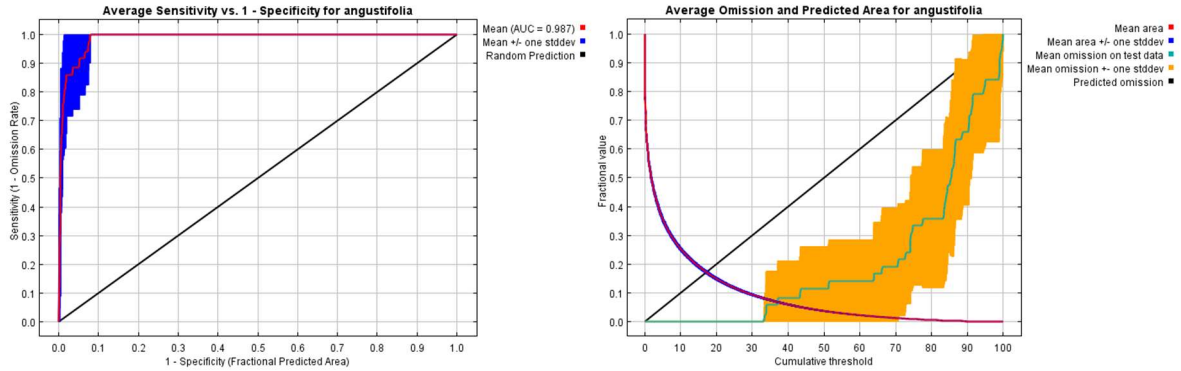
Anexo 7A

Curvas de modelamiento de distribución potencial actual de *C. angustifolia*



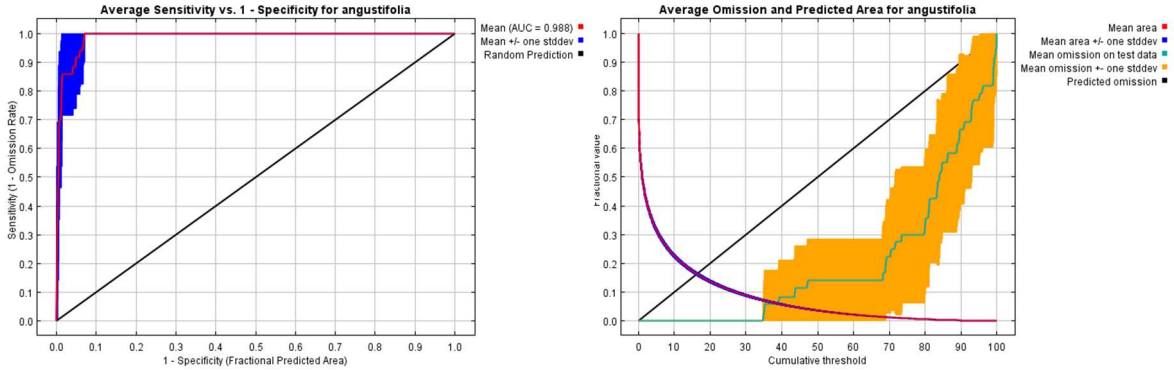
Anexo 7B

Curvas de evaluación modelamiento de distribución potencial SSP1-2.6



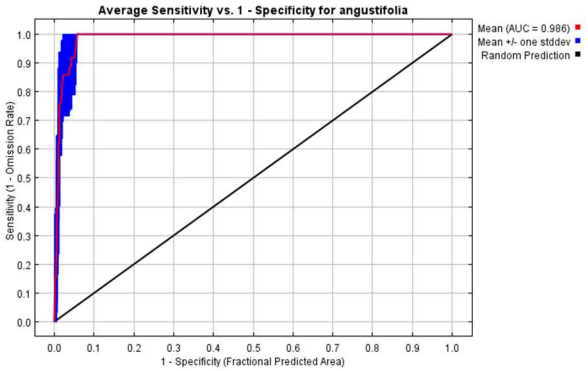
Anexo 7C

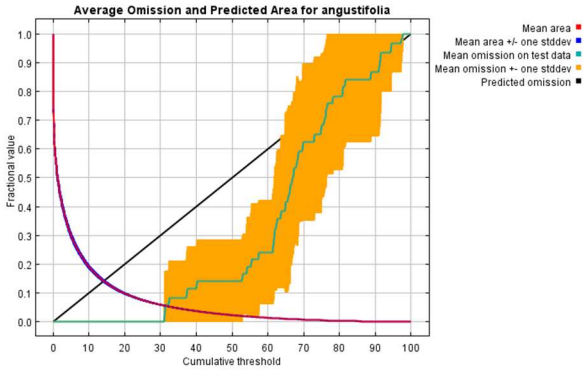
Curvas de evaluación modelamiento de distribución potencial SSP3-7.0



Anexo 7D

Curvas de evaluación modelamiento de distribución potencial SSP5-8.5



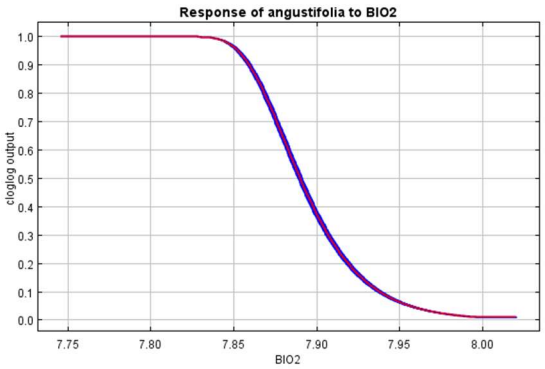


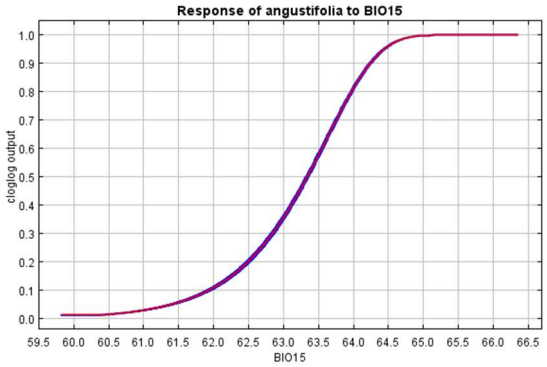
ANEXO 8

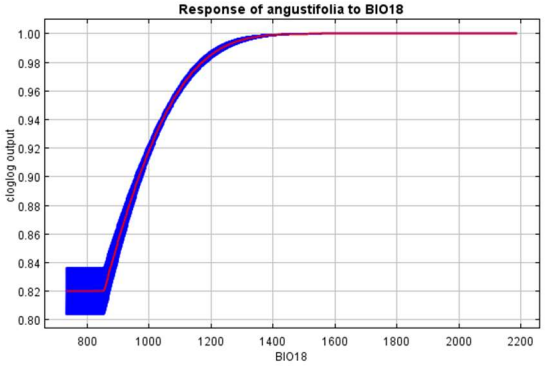
Curvas de respuesta de las variables ambientales del modelo MaxEnt para *C. angustifolia*

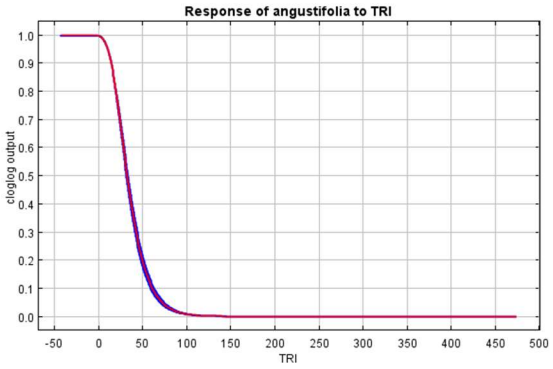
Anexo 8A

Curvas de respuestas de las variables ambientales de distribución potencial Actual.



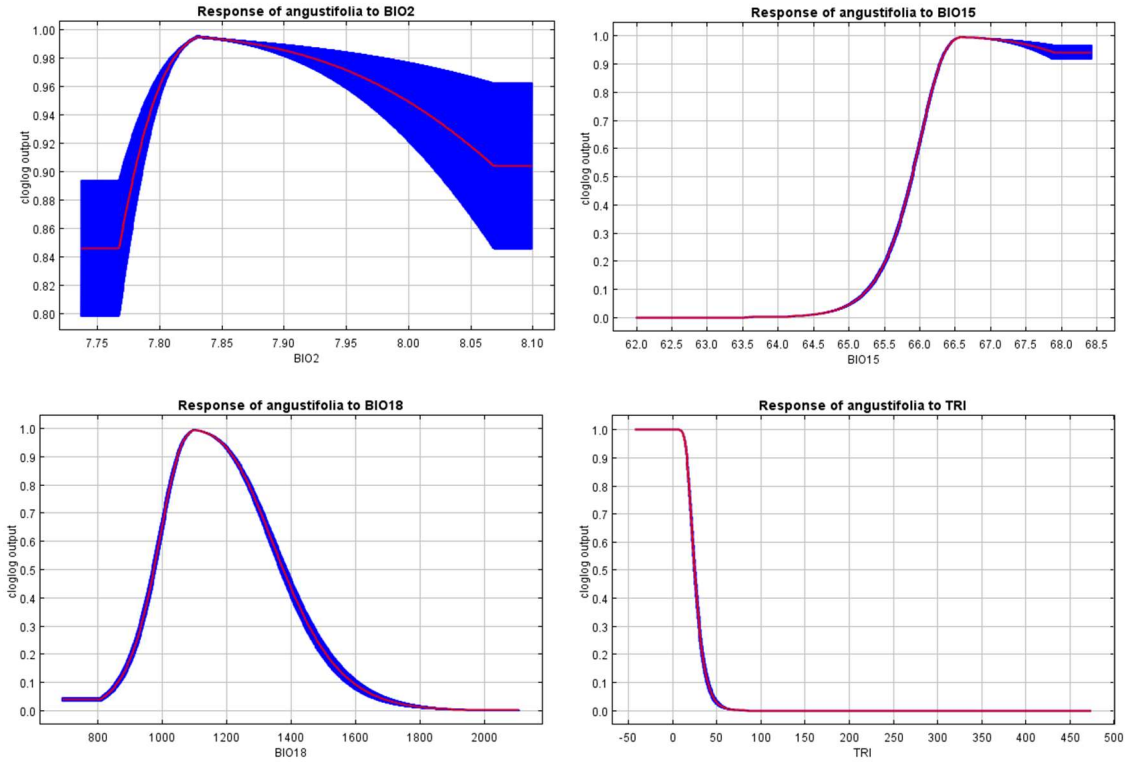






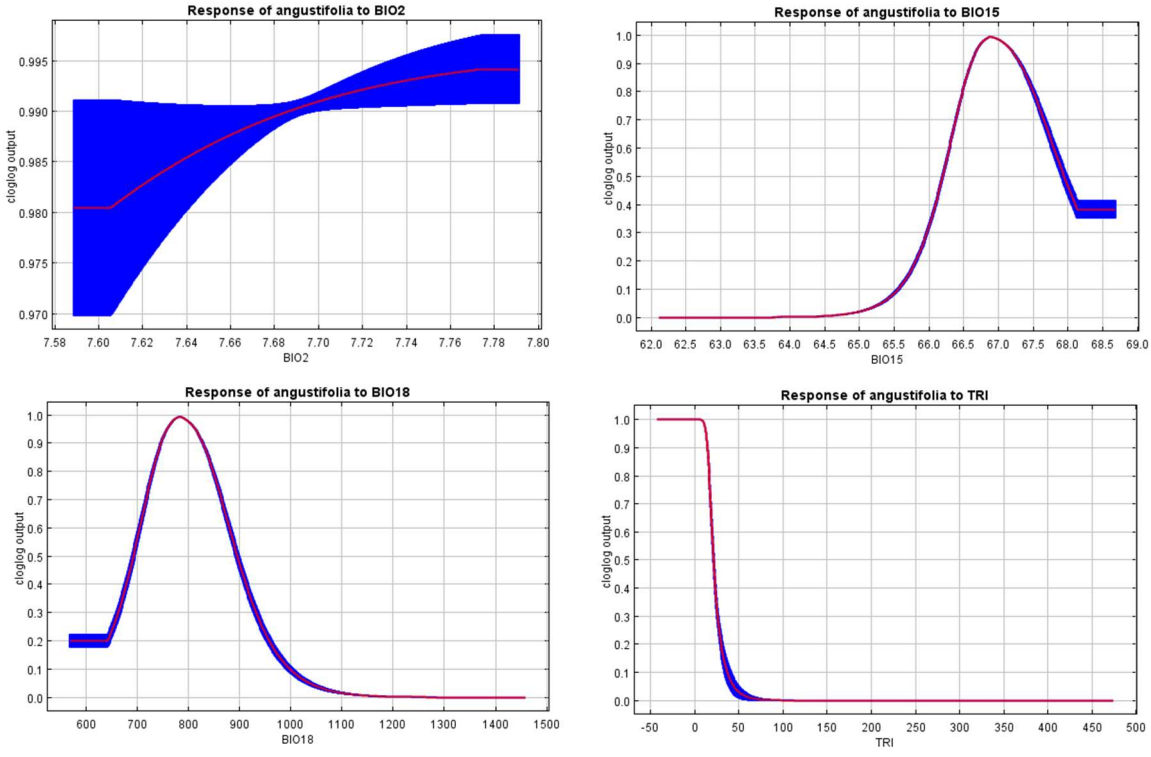
Anexo 8B

Curvas de respuestas de las variables ambientales modelo de distribución potencial SSP1-2.6

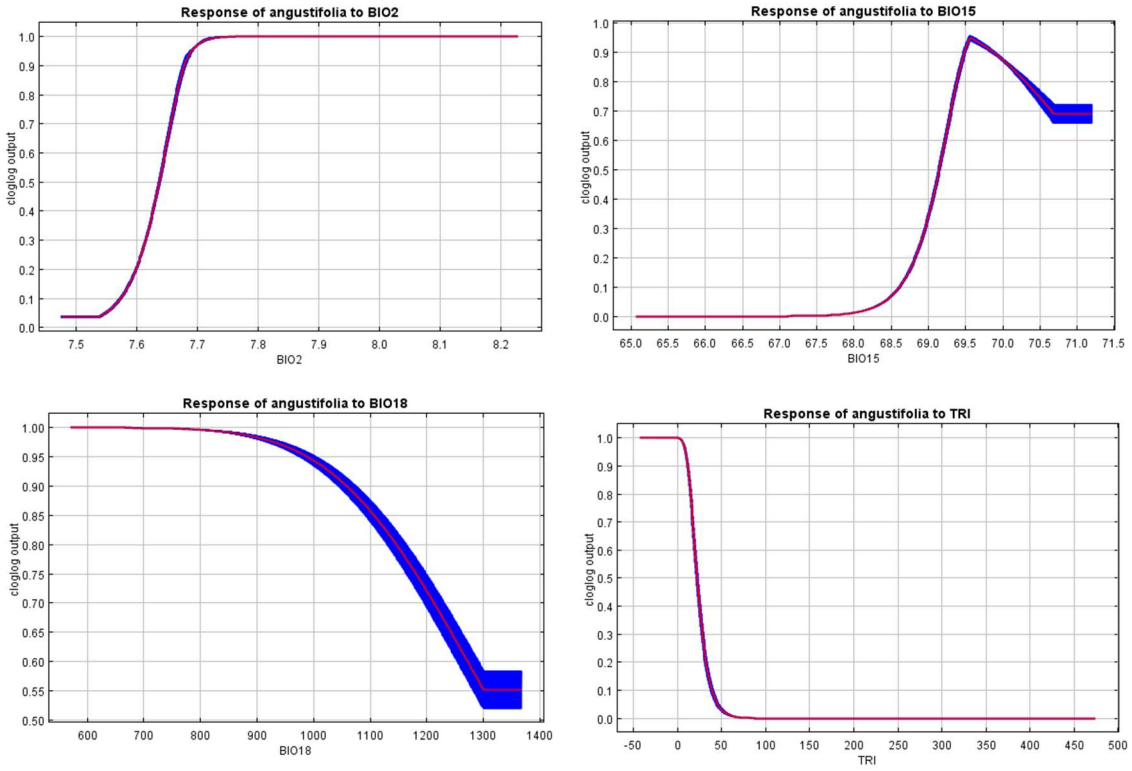


Anexo 8C

Curvas de respuestas de las variables ambientales modelo de distribución potencial SSP3-7.0



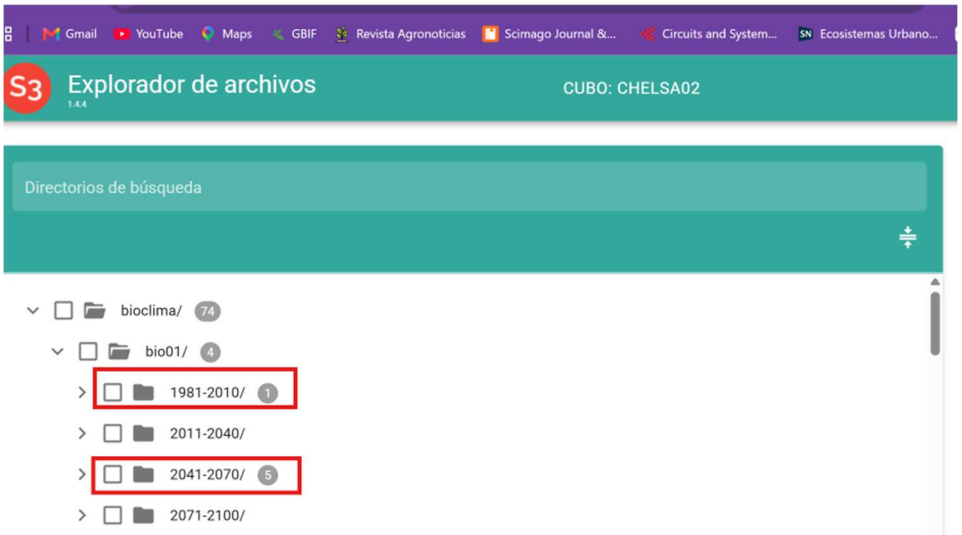
Anexo 8D
Curvas de respuestas de las variables ambientales modelo de distribución potencial SSP5-8.5.



ANEXO 9

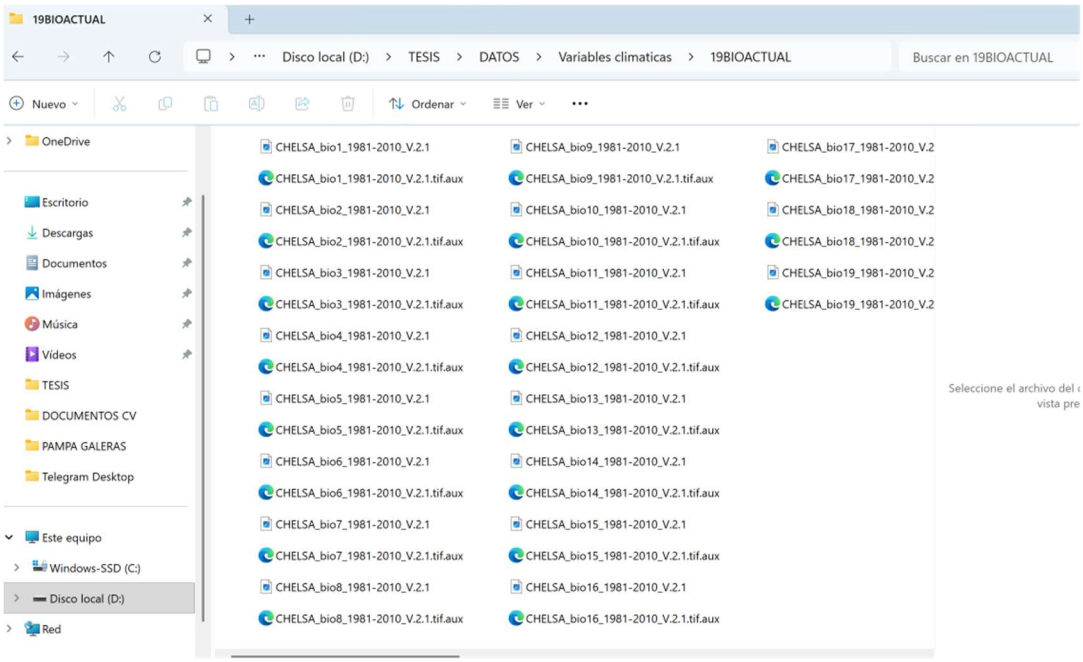
Metadatos de las variables bioclimáticas CHELSA v2.1 empleadas en el estudio.

Anexo 9A
Captura de pantalla de la página de CHELSA v2.1



Anexo 9B

Captura de pantalla de los datos descargados de la página de CHELSA v2



ANEXO 10

Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
General	***General***	***General***	***Variable 1***	**Tipo:** Básica **Nivel:** Predictivo **Diseño:** No experimental **Población**: El bosque de *Cedrela angustifolia* dentro del ámbito del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento **Muestra:** 35 individuos de *Cedrela angustifolia*, cada uno con su registro de coordenadas geográficas, obtenidos después del proceso de depuración y reducción de la autocorrelación espacial mediante un umbral de distancia de 13 m. **Técnicas:** Modelamiento de distribución de especies mediante el algoritmo MaxEnt (Maximun Entropy). Análisis espacial mediante Sistemas de
¿Cuál es la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) y su proyección futura bajo diferentes escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?	Analizar la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) y su proyección futura bajo diferentes escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.	La distribución potencial de *Cedrela angustifolia* disminuye y cambia bajo los escenarios climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), con predominio de las variables bioclimáticas en su modelamiento en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.	Variables Ambientales predictoras	
Específicos	***Específicos***	***Específicos***	***Variable 2***	
-¿Cuál es la distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia 1981-2010 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento? -¿Cuáles son los cambios proyectados en la distribución potencial futura del cedro (*Cedrela angustifolia*) para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en el Santuario Nacional Pampa	-Determinar distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) bajo las condiciones climáticas del periodo de referencia 1981-2010 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. -Evaluar los cambios proyectados en la distribución potencial futura de cedro (*Cedrela angustifolia*) para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. -Determinar las variables bioclimáticas y topográficas que	-La distribución potencial actual del cedro (*Cedrela angustifolia*) durante el periodo de referencia 1981-2010 es restringida con sectores específicos del Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. -La distribución potencial futura del cedro (*Cedrela angustifolia*) disminuirá durante el periodo 2041-2070 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, en comparación con la distribución potencial actual en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento. -Las variables bioclimáticas presentaran una mayor contribución	Distribución potencial de *Cedrela angustifolia*	

Hermosa y su zona de amortiguamiento? -¿Cuáles son las variables bioclimáticas y topográficas que presentan mayor contribución en la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento?	presentan mayor contribución a la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*) en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento	que las variables topográficas en la distribución potencial del cedro (*Cedrela angustifolia*), en el Santuario Nacional Pampa Hermosa y su zona de amortiguamiento.		Información Geográfica (SIG). **Instrumentos:** Capas bioclimáticas (CHELSA v2.1) Digital de Elevación ALOS PALSAR 12.5m. Capas ambientales derivadas (pendiente, TRI y TPI). Software MaxEnt versión 3.4.4 Software Qgis versión 3.40 Software Rstudio versión 4.2.2