



Modelación de los efectos del **cambio climático** en la distribución de especies forestales relevantes para restauración en Costa Rica



Serie Red Latinoamericana de Bosque Modelo

Publicación N° 6

Modelación de los efectos del cambio climático en la distribución de especies forestales relevantes para restauración en Costa Rica

Sandy Brillith Lizana Rojas
Luis Diego Jiménez Alvarado
Róger Villalobos Soto
Christian Brenes Pérez

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Turrialba, Costa Rica
2024

This publication has been produced with the financial support of the Government of Canada through the International Model Forest Network (IMFN) Secretariat's - IMFN Climate. The primary objective of this project is to support the development of leadership within the forestry sector across Latin American and Caribbean (LAC) countries, with a particular focus on promoting the active involvement of women and youth. Additionally, it aims to foster the generation of knowledge by connecting research with field demonstrations of restoration schemes, ultimately contributing to the preservation and enhancement of forest management and biodiversity.

Esta publicación ha sido producida con el apoyo financiero del Gobierno de Canadá, a través de la Secretaría de la Red Internacional de Bosques Modelo – IMFN Climate. El objetivo principal de este proyecto es apoyar el desarrollo del liderazgo dentro del sector forestal en los países de América Latina y el Caribe (ALC), con un enfoque particular en promover la participación activa de mujeres y jóvenes. Además, pretende fomentar la generación de conocimiento al conectar la investigación con demostraciones de campo de esquemas de restauración y contribuir, en última instancia, a la preservación y mejora de la gestión forestal y la biodiversidad.

Cita sugerida:

Lizana, S.; Jiménez, L.D.; Villalobos, R.; Brenes, C. 2024. Modelación de los efectos del cambio climático en la distribución de especies forestales relevantes para restauración en Costa Rica (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE 77 p. Serie Red Latinoamericana de Bosques Modelo N° 6.

Créditos

Autores:

Sandy Brillith Lizana Rojas
Luis Diego Jiménez Alvarado
Róger Villalobos Soto
Christian Brenes Pérez

Edición técnica:

Cristina Vidal

Diseño y diagramación:

Tecnología de Información y Comunicación, CATIE

Contenido

Resumen	9
Introducción	11
Definiciones clave	13
Metodología	15
Área de estudio.....	15
Selección de especies y variables ambientales.....	16
Proceso metodológico del modelamiento	21
Modelación de distribución potencial actual	22
Modelación de distribución potencial futura	22
Análisis de cambios categóricos.....	23
Resultados	25
Distribución actual de especies priorizadas.....	26
Modelación de distribución potencial actual	37
Cambios categóricos de la distribución potencial actual y futura.....	47
Discusión y conclusiones.....	71
Referencias bibliográficas	74

Lista de acrónimos, abreviaturas y unidades

AUC	Área bajo curva
°C	Grados Celsius
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CCAFS	Climate Change, Agriculture and Food Security
CFMI	Cámara Forestal de Madera e Industria de Costa Rica
CIA	Centro de Investigaciones Agronómicas
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
Cob. Nat	Cobertura natural
CO2	Dióxido de carbono
CONACEN	Comisión Nacional de Cultivos de Especies Nativas
cv-AUC	Validación cruzada del AUC
D4R	Diversidad para la restauración
EARTH	Splines de regresión adaptativa multivariante
FDA	Análisis discriminante flexible
FONAFIFO	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
GAMSTEP	Modelos aditivos generalizados
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
GBM	Modelos de regresión potenciada generalizada
GCM	Modelo de circulación general
GEI	Gases de efecto invernadero
GLMSTEP	Modelos lineales generalizados
ha	Hectárea

INISEFOR	Instituto de Investigación y Servicios Forestales
IPBES	Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
km	Kilómetro
m	Metro
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
M_secos	Meses secos
MaxEnt	Máxima Entropía
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
MGCV	Mixed GAM Computation Vehicle
mm	Milímetros
OE	Objetivo específico
ONF	Oficina Nacional Forestal
ONU	Organización de las Naciones Unidas
Pt – media	Precipitación media
RF	Random Forests
ROC	Receiver Operating Characteristic
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
SVM	Soporte de máquinas de vectores
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica
UNED	Universidad Estatal a Distancia



Resumen

El cambio climático representa uno de los desafíos globales más críticos, especialmente por sus posibles efectos negativos sobre la biodiversidad. Este fenómeno acelera las variaciones en las condiciones abióticas, lo que –a su vez– altera significativamente la biogeografía de diversas especies. Esto puede provocar la pérdida de áreas de hábitat idóneos, situación ante la cual las especies locales son particularmente vulnerables.

Este trabajo se enfocó en modelar el efecto del cambio climático sobre la idoneidad de hábitat actual de fuentes semilleras de especies forestales priorizadas para la restauración con enfoque sostenible en Costa Rica. Se utilizó la lista de especies priorizadas por los líderes de la Comisión Nacional de Cultivos de Especies Nativas (CONACEN) de este país, ya que esas especies se consideraron como relevantes para la nación, debido a su uso multifuncional con fines de producción sostenible y conservación. Entre estas especies se encuentran: *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Dalbergia retusa*, *Samanea saman*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Vochysia guatemalensis*, *Vochysia ferruginea*, *Hieronyma alchorneoides*, *Dipteryx oleifera*.

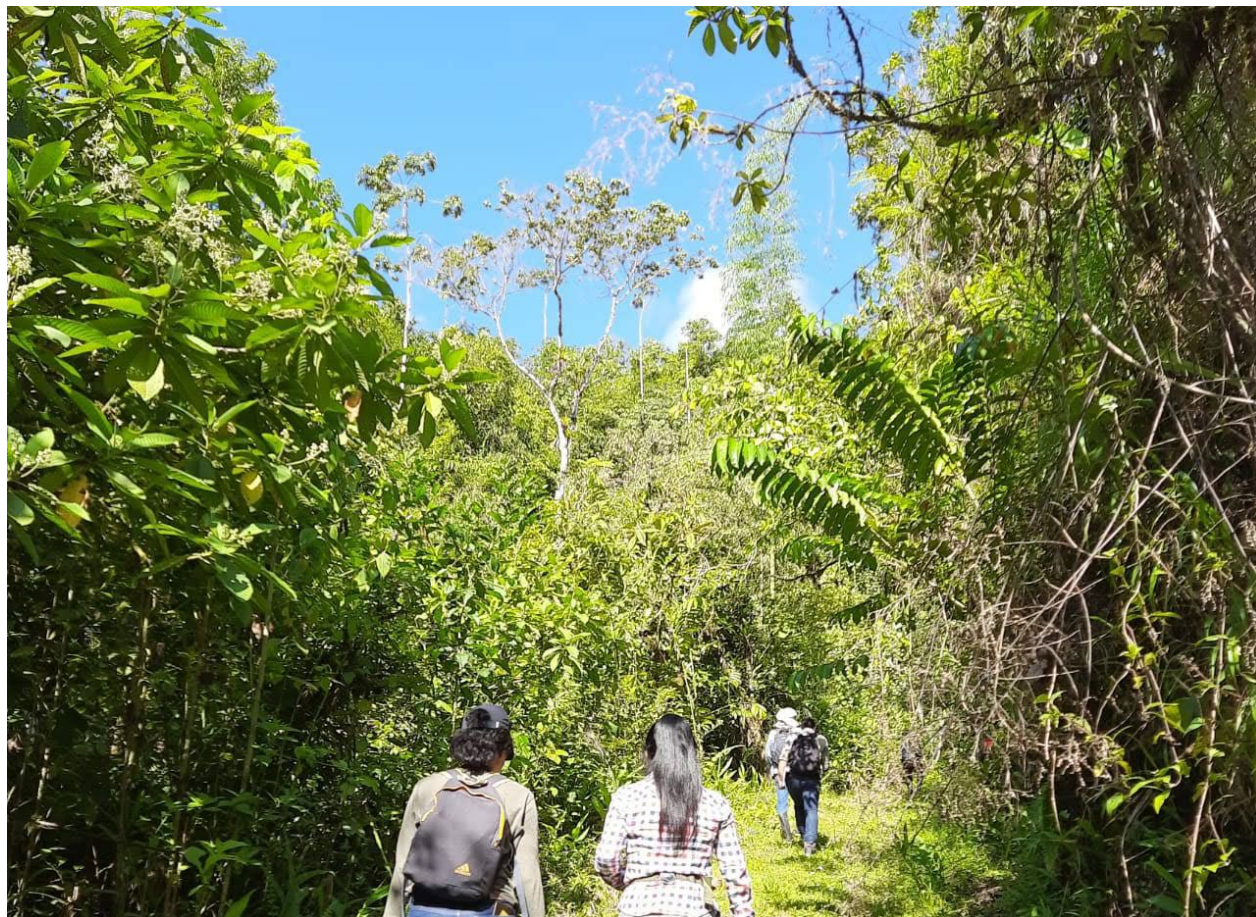
Se empleó el paquete BiodiversityR para modelar la idoneidad del hábitat al identificar la distribución actual, distribución potencial actual y distribución potencial futura bajo los escenarios de cambio climático SSP2 y SSP3 con un horizonte temporal hasta el año 2050. Los mapas resultantes se categorizaron para comparar zonas de ganancia, pérdida y permanencia.

Los resultados indican un impacto considerable del cambio climático en la distribución espacial y la pérdida de áreas de aptitud de las especies en estudio. Por ejemplo, *Vochysia ferruginea* y *Vochysia guatemalensis* con pérdidas de área de 19,84% y 14,97% en el escenario SSP2 y 18,03%, 16,60% en SSP3; mientras que las ganancias no alcanzan 1%. En contraste, especies como *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata* y *Enterolobium cyclocarpum* podrían mostrar áreas de permanencia, ya que las variables que las definirían serían principalmente las edáficas y fisiográficas, que tienden a ser más estables en comparación con las variables bioclimáticas.

La información ecológica obtenida en este estudio puede orientar prácticas adecuadas de manejo forestal frente al cambio climático y servir como herramienta de apoyo para la restauración climáticamente inteligente, mediante el establecimiento de fuentes de semillas que se adapten mejor a las condiciones futuras del sitio y los objetivos de restauración en Costa Rica. Por ejemplo, se podrían establecer fuentes semilleras y plantaciones de especies en áreas de permanencia, mientras se considera la migración asistida para aquellas especies que enfrentan pérdidas de idoneidad de hábitat.

Palabras clave

Cambio climático, modelado de distribución de especies, MaxEnt, restauración, zonas de semillas, diversidad genética.



Introducción

La ONU (Organización de las Naciones Unidas), a través de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, enfatiza la protección del planeta mediante acciones que fomenten la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático, el cual es definido por el IPCC (2014) como la variación acelerada de las condiciones abióticas que caracterizan el clima. Dicho cambio está provocando anomalías y eventos extremos que alteran la biogeografía de las especies, siendo las especies endémicas las de mayor vulnerabilidad a esto por su menor capacidad de resistencia y resiliencia (Vergara *et al.* 2014, Uribe-Botero 2015).

La distribución actual de las especies y su probabilidad de ocurrencia está determinada por factores abióticos, como el suelo, la topografía y el clima que, según Fremout *et al.* (2022), definen la idoneidad de hábitat, es decir, las condiciones ambientales favorables para el desarrollo de una especie. La distribución potencial futura de una especie se predice considerando las condiciones ambientales futuras, establecidas mediante escenarios de cambio climático y un horizonte temporal (Pearson 2008, Fremout *et al.* 2022).

Por otra parte, los escenarios de cambio climático –que responden al “qué pasaría si...”– se diseñaron en función de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con diferentes formas de desarrollo socioeconómico, lo que implica diversos desafíos de mitigación y adaptación (IPCC 2014, IPCC 2022). Asimismo, en el sexto informe del IPCC se han definido cinco escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) de optimistas a muy pesimistas: SSP1 1.9, SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 y SPP5 8.5 (IPCC 2022).

Actualmente, se observa un incremento creciente en los proyectos de restauración de ecosistemas y paisajes, con el objetivo de conservar y recuperar la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos. No obstante, estos enfrentan desafíos, como la escasez de semillas, falta de información sobre la distribución actual de las fuentes semilleras y las

variaciones que tendrán frente a los escenarios del cambio climático (Walck *et al.* 2011, Dayrell *et al.* 2016, Jalonen *et al.* 2017, Atkinson *et al.* 2021).

En el marco del proyecto RESTAURacción, desarrollado por la Red Latinoamericana de Bosques Modelo, en colaboración con el CATIE y financiado por el Gobierno de Canadá, se llevan a cabo programas e investigaciones que promueven la restauración de ecosistemas y paisajes, así como la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, y la adaptación al cambio climático.

Es crucial evaluar el impacto de los futuros escenarios climáticos en la distribución de las fuentes de semillas para proporcionar información útil a las personas y entidades encargadas de proyectos de restauración y facilitar los procesos de recolección de semillas.

En Costa Rica, se han realizado estudios, como mapeos de prioridades de conservación y las vías de conectividad bajo el cambio climático para los ecosistemas tropicales (Fung *et al.* 2016) y el atlas de aptitud de especies agroforestales para Centroamérica (de Souza *et al.* 2017). Sin embargo, no cubren la falta de información sobre las fuentes semilleras de las especies más relevantes sugeridas para los proyectos de restauración en el país.

Esta investigación tiene como objetivo modelar el efecto del cambio climático sobre la idoneidad de hábitat actual de fuentes semilleras de especies forestales priorizadas para restauración y evaluar las implicaciones en cada área de conservación en Costa Rica. Para esto se generaron los mapas de disponibilidad, distribución y características ecológicas de las fuentes semilleras actuales de las especies de estudio. Seguidamente, se modeló la distribución potencial bajo escenarios de cambio climático de las fuentes semilleras. Por último, se analizaron los cambios de distribución espacial actual, potencial actual y potencial bajo escenarios de cambio climático de las fuentes semilleras en Costa Rica.

Definiciones clave

AUC

- El área bajo la curva es un indicador de cuánto de la distribución obtenida corresponde a los puntos de presencia. La valoración oscila de 0 a 1, donde los valores menores a 0.5 indican bajo desempeño del modelo y cercanos a 1, alto desempeño.

cv-AUC (cross validated-AUC)

- Es la validación cruzada de los valores de AUC que, mientras mayor sea el valor, hace referencia a un buen rendimiento de generalización. En caso contrario, los valores bajos solo indican que los datos se ajustan bien al modelo.

Distribución actual

- Espacio geográfico que reúne las características ambientales, interacciones sinérgicas y recursos que favorecen el desarrollo y aseguran la presencia de una especie. Además, están validados con datos de observación.

Distribución potencial

- Espacio geográfico de distribución de una especie generada por medio de predicciones realizadas al modelar las características ambientales, que pueden ser actuales (con datos que simulan las condiciones actuales) y futuras (con datos que surgen tras la simulación de condiciones del cambio climático).

Idoneidad de hábitat

- Consiste en la distribución espacial del hábitat adecuado de cierta especie. Dicha idoneidad es modelada a partir de la correlación de las ubicaciones de presencia de especies con las condiciones ambientales favorables para su desarrollo en un espacio determinado. La idoneidad de hábitat fluctúa de 0 a 1 y se categoriza en niveles de nula (<0.25), baja (0.25-0.50), intermedia (0.5-0.75) y alta (0.75-1).

Zonas de ganancia

- Superficie que no presenta idoneidad de hábitat en la actualidad, pero –de acuerdo con la modelación de condiciones futuras– la presentaría.

Zonas de pérdida

- Superficie que presenta idoneidad de hábitat en la actualidad, pero –luego de la modelación de condiciones futuras– no la presentaría.

Zonas de permanencia

- Superficie que presenta idoneidad de hábitat en condiciones ambientales actuales y futuras.

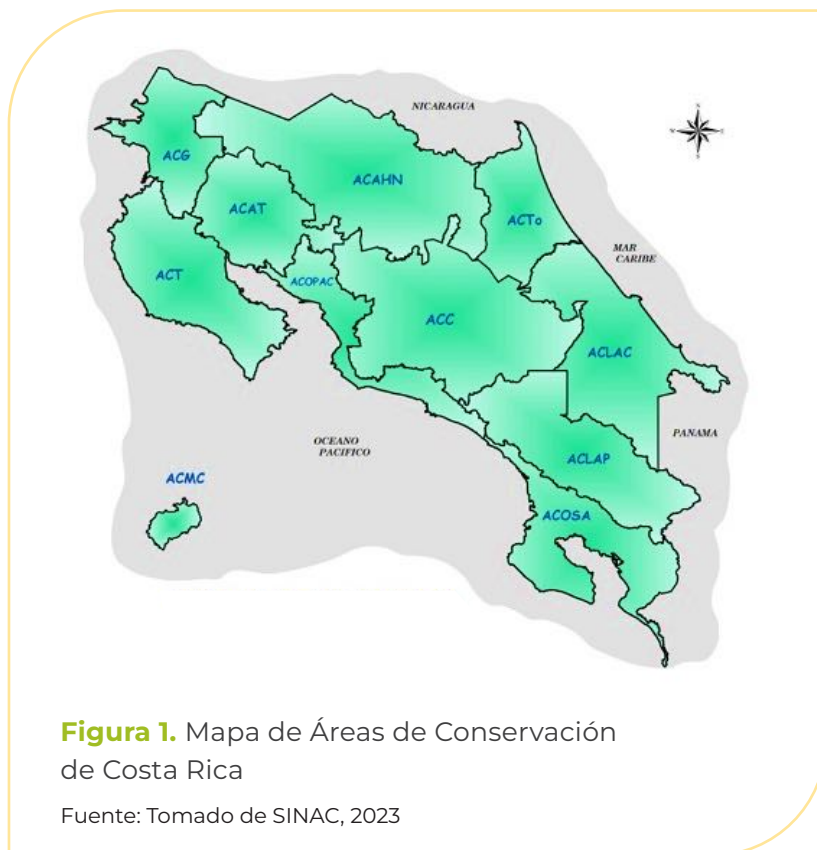
Zonas semilleras (apropiadas y dinámicas)

- Se denomina así a las zonas de transferencia de semillas o zona de procedencia de semillas, que son áreas geográficas que reúnen las condiciones y favorecen el desarrollo de semillas de las especies.

Metodología

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en Costa Rica, donde se analizó la distribución actual y los posibles cambios de distribución para cada una de las especies en todas las Áreas de Conservación, que es la terminología que aplica el MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) para las delimitaciones geográficas correspondientes a divisiones administrativas en las que divide el país para facilitar el manejo de todo el territorio. En el Cuadro 1 se muestra un listado de las Áreas de Conservación y en la Figura 1, un mapa con su delimitación.



Cuadro 1. Lista de Áreas de Conservación en Costa Rica

Abreviatura	Área de conservación	Abreviatura	Área de conservación
ACOSA	Osa	ACOPAC	Pacífico Central
ACT	Tempisque	ACC	Central
ACG	Guanacaste	ACAT	Arenal Tempisque
ACTo	Tortuguero	ACLAC	La Amistad Caribe
ACLAP	La Amistad Pacífico	ACAHN	Arenal Huetar Norte

Selección de especies y variables ambientales

Se tomó la lista de especies forestales priorizadas por los representantes de la CONACEN (Comisión Nacional de Cultivos de Especies Nativas) y sus miembros –CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación), INISEFOR (Instituto de Investigación y Servicios Forestales) de la UNA (Universidad Nacional), TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica), ONF (Oficina Nacional Forestal), CFMI (Cámara Forestal de Madera e Industria de Costa Rica), UNED (Universidad Estatal a Distancia) y FONAFIFO (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal)– para el desarrollo de iniciativas de reforestación o restauración con fines productivos.

Los criterios para la selección fueron la relevancia de la especie en proyectos de reforestación con objetivos de conservación, protección o producción de madera en Costa Rica (Mesén y Jiménez 2022). Las diez especies investigadas cumplen dichos criterios y fueron utilizadas para el modelamiento (Cuadro 2).

Los puntos de presencia de las especies priorizadas fueron determinados desde las bases de datos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y se depuraron con la ayuda de los paquetes ráster y sf en el programa R, para lo cual se eliminaron datos de coordenadas dentro de áreas urbanas, coordenadas imprecisas, datos anteriores a 1950 y aquellos con discrepancia de país, proceso recomendado por Ceccarelli *et al.* (2020), Fremout *et al.* (2021) y Fremout *et al.* (2022).

Las variables ambientales utilizadas para modelar la distribución potencial de las especies incluyeron:

- Variables bioclimáticas descargadas de la base de datos de WorldClim (Fick y Hijmans 2017) a una resolución de 1 km del periodo 2041-2060 (Fung *et al.* 2017, Adjonou *et al.* 2020, Ceccarelli *et al.* 2020, Lee *et al.* 2021). Se consiguieron 19 variables (Cuadro 3).
- Variables edáficas adquiridas de la base de datos de SoilGrids v.1 (Hengl *et al.* 2014). Se contó con 9 variables (Cuadro 4).
- Variables topográficas conseguidas mediante el paquete ráster de Global DEM en el programa R. Estas fueron 5 variables (Cuadro 5).

Cuadro 2. Especies forestales priorizadas por su importancia en restauración con diversos fines en Costa Rica

Nombre científico	Nombre común	Importancia en restauración para fines de		
		Conservación de biodiversidad	Protección / Regulación	Producción
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	<ul style="list-style-type: none"> • Abundante regeneración natural 	<ul style="list-style-type: none"> • Cercos vivos en sistemas silvopastoriles 	<ul style="list-style-type: none"> • Madera para construcción y mueblería • SAF
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	<ul style="list-style-type: none"> • Endémica (Zona del Caribe) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo intercalado y plantaciones multiestratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Madera para construcción, ebanistería y artesanías • SAF
<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba real	<ul style="list-style-type: none"> • Endémica (Centroamérica - Belice) • Especie amenazada 	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo intercalado y plantaciones multiestratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Madera de las más finas a nivel mundial • SAF
<i>Dalbergia retusa</i>	Cocobolo	<ul style="list-style-type: none"> • Endémica (Zona del Pacífico) • Especie amenazada 	<ul style="list-style-type: none"> • Fijador de nitrógeno • Cultivo intercalado y plantaciones multiestratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Madera muy fina, dura y valiosa para ebanistería, instrumentos deportivos, científicos y artesanías • SAF
<i>Samanea saman</i>	Cenízaro	<ul style="list-style-type: none"> • Endémica (Centroamérica) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fijador de nitrógeno • Árboles aislados en potreros 	<ul style="list-style-type: none"> • Madera resistente, estable y ligera para construcción, artesones, mueblería y artesanías • SAF • Vainas como suplemento de ganado • Pulpa como bebida dulce

Nombre científico	Nombre común	Importancia en restauración para fines de		
		Conservación de biodiversidad	Protección / Regulación	Producción
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Guanacaste	<ul style="list-style-type: none"> Árbol nacional de Costa Rica 	<ul style="list-style-type: none"> Fijador de nitrógeno Árboles en potreros Vainas (suplemento de ganado) 	<ul style="list-style-type: none"> Madera para construcción, artesones, carpintería y ebanistería SAF
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Cebo	<ul style="list-style-type: none"> Endémica (Centroamérica hasta Colombia) 	<ul style="list-style-type: none"> Mejora el suelo Siempreverde Protección ribereña 	<ul style="list-style-type: none"> Madera liviana para carpintería, construcciones livianas, artesanías, canoas SAF y plantaciones puras
<i>Vochysia ferruginea</i>	Botarrama	<ul style="list-style-type: none"> Endémica (Centroamérica, de Honduras hasta Brasil) 	<ul style="list-style-type: none"> Cercos Protección de suelo 	<ul style="list-style-type: none"> Madera para construcción interna, carpintería, postes de cerca y formaletas
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	Pilón	<ul style="list-style-type: none"> Endémica (México hasta Brasil) 		<ul style="list-style-type: none"> Madera de alta calidad y duración Madera para construcción pesada (puentes, carrocerías, pilones)
<i>Dipteryx oleifera</i>	Almendro	<ul style="list-style-type: none"> Endémica (Nicaragua hasta Colombia) Conservación de fauna Lapa verde (en peligro de extinción) anida en sus ramas 		<ul style="list-style-type: none"> Madera muy pesada para construcción pesada y construcción marina Semillas para bebidas Aceite de frutos para jabones

Fuente: Adaptado de Mesén y Jiménez (2022)

Cuadro 3. Variables bioclimáticas de WorldClim utilizadas para la modelación

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura promedio anual (°C)
BIO2	Rango medio diario (temp máx. – temp mín; promedio mensual) (°C)
BIO3	Isotermalidad (BIO1/BIO7) * 100 (°C)
BIO4	Estacionalidad en temperatura (SD × 100) (%)
BIO5	Temperatura máxima del período más caliente (°C)
BIO6	Temperatura mínima del período más frío (°C)
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6) (°C)
BIO8	Temperatura media en el trimestre más lluvioso (°C)
BIO9	Temperatura promedio en el trimestre más seco (°C)
BIO10	Temperatura promedio en el trimestre más caluroso (°C)
BIO11	Temperatura promedio en el trimestre más frío (°C)
BIO12	Precipitación anual (mm)
BIO13	Precipitación en el período más lluvioso (mm)
BIO14	Precipitación en el período más seco (mm)
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)(%)
BIO16	Precipitación en el trimestre más lluvioso (mm)
BIO17	Precipitación en el trimestre más seco (mm)
BIO18	Precipitación en el trimestre más caluroso (mm)
BIO19	Precipitación en el trimestre más frío (mm)

Fuente: Adaptado de Ceccarelli et al. (2020)

Cuadro 4. Variables edáficas de SoilGrids v1 utilizadas para la modelación

Variable	Descripción
EDA1	Densidad aparente del suelo (Mg m^{-3})
EDA2	Contenido de arcilla (μm)
EDA3	Contenido de arena (μm)
EDA4	Contenido de carbono orgánico (μm)
EDA5	pH del suelo
EDA6	Contenido de grava (μm)
EDA7	Contenido de limo (μm)
EDA8	Capacidad de intercambio catiónico (cmolc kg^{-1})
EDA9	Contenido de nitrógeno (μm)

Fuente: Adaptado de Ceccarelli *et al.* (2020)

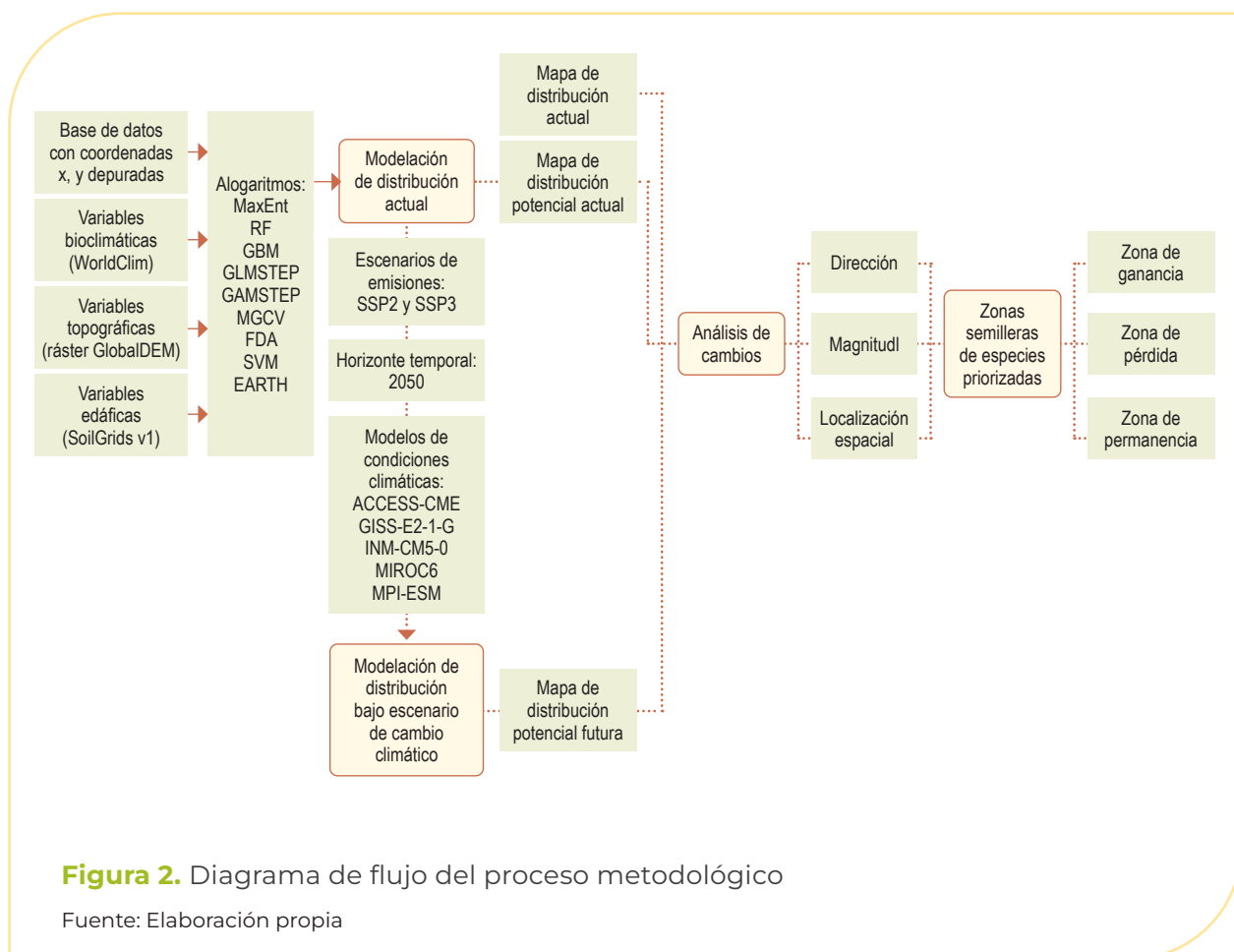
Cuadro 5. Variables topográficas del paquete ráster en R utilizadas para la modelación

Variable	Descripción
TOP1	Aspecto terreno o fisiografía ($^{\circ}$)
TOP2	Dirección del flujo de agua
TOP3	Pendiente ($^{\circ}$)
TOP4	TPI: Índice de posición topográfica
TOP5	TRI: Índice de rugosidad del terreno

Fuente: Adaptado de Ceccarelli *et al.* (2020)

Proceso metodológico del modelamiento

El modelamiento del impacto del cambio climático en las especies forestales elegidas se llevó a cabo siguiendo las etapas que se diagraman en el siguiente flujograma (Figura 2).



Modelación de distribución potencial actual

La modelación de distribución potencial actual se llevó a cabo con el paquete BiodiversityR para R (Kindt 2018, Ceccarelli *et al.* 2020), el cual comprende nueve algoritmos diferentes: máxima entropía (MaxEnt), *random forests* (RF), modelos de regresión potenciada generalizada (GBM), modelos lineales generalizados (GLMSTEP), modelos aditivos generalizados (GAMSTEP, MGCV), análisis discriminante flexible (FDA), soporte de máquinas de vectores (SVM) y *spline* de regresión adaptativa multi-variante (EARTH). Estos algoritmos tienen el mismo propósito de la máxima entropía (MaxEnt), que utiliza mínimos datos de presencia, a fin de inferir áreas potenciales para distribución y establecimiento de especies (Cotrina 2020).

Se usaron las funciones del paquete *ENMeval* disponible en R, con el propósito de evaluar los modelos y elegir el mejor modelo de predicción de presencia-ausencia de cada especie; es decir, aquel con mayor valor de AUC, cv-AUC y demás métricas.

Modelación de distribución potencial futura

Se consideró un horizonte temporal hasta el año 2050 (2040-2060) para las proyecciones, con el fin de abarcar un periodo de corto plazo. Además, se tomaron en cuenta dos escenarios de emisiones: SPP2 4.5 (intermedio) y SSP3 7.0 (pesimista), que son los más probables de ocurrir (IPCC 2022). Las características de los escenarios elegidos son las siguientes:

- **Escenario SSP2 4.5:** Corresponde al escenario intermedio. Los factores socioeconómicos siguen las tendencias históricas, sin cambios significativos. El progreso hacia la sostenibilidad es lento y el desarrollo e ingresos crecen de manera desigual. La fuerza radiactiva es de 4.5 W/m² y las emisiones de CO₂ se reducirían a cero para el 2100. El calentamiento global se estabiliza en un incremento de 2.7 °C para fin de siglo.

- **Escenario SSP3 7.0:** Conocido como escenario pesimista, supone un resurgimiento del nacionalismo y conflictos regionales, la desigualdad aumenta y los temas globales son desplazados a un segundo plano. Como resultado, algunas regiones sufren daños ambientales de manera drástica, el forzamiento radiativo es de 7.0 W/m^2 y las emisiones de CO_2 se reducirían a cero para años posteriores al 2050. El calentamiento global se estabiliza a $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ más para finales del siglo.

La caracterización de las condiciones climáticas futuras implicó el uso de modelos de circulación general – MCG. Según de Souza *et al.* 2017, estos son modelos numéricos que representan procesos físicos en la atmósfera, océano, criósfera y superficies terrestres, lo que los convierte en una herramienta avanzada para simular la respuesta de un sistema global en los aumentos de las concentraciones de los GEI.

Estos MCG se obtuvieron a partir de la información del portal de cambio de la CCAFS (Climate Change, Agriculture and Food Security): ACCESS-CME, GISS-E2-1-G, INM-CM5-0, MIROC6 y MPI-ESM1-2-HR. Además, se consideraron las variables edáficas y topográficas, las cuales se mantuvieron estables. Las salidas de esta modelación son mapas de distribución potencial futura, en formato “tif” con valores binarios de 0 y 1, de lo que resultan 10 mapas por especie.

Análisis de cambios categóricos

El objetivo de esta fase fue evaluar los cambios entre los mapas de distribución potencial actual y bajo escenarios climáticos futuros. Dado que había varios mapas de distribución potencial futura por MCG para cada especie, los mapas se sometieron a un análisis ráster booleano AND, algoritmo que hace la comparación de pixel por pixel de un conjunto de rásteres de entrada. La lógica detrás de esto permite la creación de una nueva capa que contenga los pixeles que se superponen en ambas capas. Después de esta operación, se resumió a un solo mapa, en formato “tif” con valores binarios de 0 y 1, de distribución potencial futura SSP2 y otro de SSP3, ambos con la información de los 5 MCG.

Se instaló el complemento Semi-Automatic Classification Plugin para Qgis y las capas fueron analizadas mediante la función cross classification, a fin de analizar las características de los cambios entre el mapa de distribución potencial actual y cada mapa de distribución futura por escenario (resultados de la fase anterior). Las salidas de esta fase fueron mapas, en formato “tif”, cuyos valores fueron recategorizados en áreas donde no hubo variación (0-0, no hubo idoneidad ni habrá en el futuro) y representó “idoneidad nula”. El cambio tipo 1 (1-0, hubo idoneidad, pero en el futuro ya no) equivalía a “pérdidas”. El cambio tipo 2 (0-1, no hubo idoneidad, pero en el futuro sí) reflejó “ganancias” y el último caso, donde tampoco hubo variación (1-1, hubo idoneidad y en el futuro también tendrá idoneidad) representó la “permanencia”.

De esta manera, se logró elaborar mapas de los cambios mencionados, con un color diferente para cada caso. Posteriormente, se utilizó la función de “histograma zonal” de Qgis. Este algoritmo añade campos que representan el número de cada valor único de una capa ráster contenida dentro de zonas definidas como polígonos. Las entradas para este ejercicio fueron los mapas de cambios (resultado anterior) y la capa vectorial de Áreas de Conservación. Así, se obtuvieron los cambios con respecto a ellas.



Resultados

Distribución actual de especies priorizadas

Se identificaron 1026 registros de datos de ocurrencia a partir de la base de datos de GBIF (Global Biodiversity Information Facility), los cuales fueron sometidos a un proceso de depuración. Los criterios de depuración incluyeron la eliminación de aquellas coordenadas dentro de áreas urbanas, datos imprecisos, registros anteriores a 1950 y con discrepancia de país. Como resultado de este proceso, el total de registros se redujo a 895 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Número de puntos de presencia por especies forestales priorizadas en Costa Rica

Especies priorizadas	Número de registros
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	144
<i>Cordia alliodora</i>	110
<i>Vochysia ferruginea</i>	109
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	97
<i>Dalbergia retusa</i>	87
<i>Samanea saman</i>	86
<i>Vochysia guatemalensis</i>	81
<i>Cedrela odorata</i>	76
<i>Swietenia macrophylla</i>	58
<i>Dipteryx oleífera</i>	47

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras de la 3 a la 12, se muestran mapas de ubicación de los puntos de registro de cada especie en relación con las Áreas de Conservación, lo cual permite identificar el tipo de distribución (amplia, moderada o limitada).



Figura 3. Mapa de los registros de presencia de *Enterolobium cyclocarpum* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia

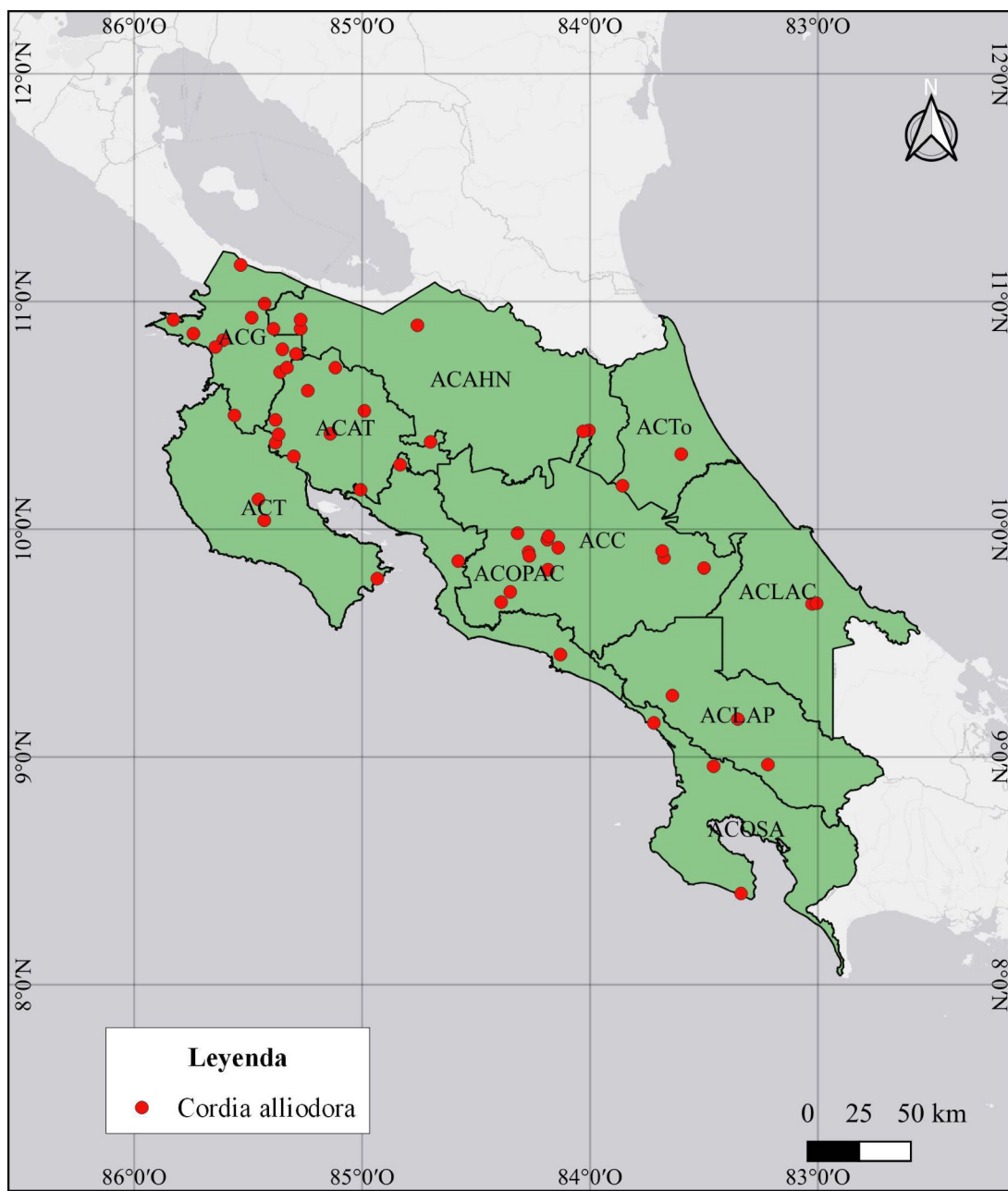


Figura 4. Mapa de los registros de presencia de *Cordia alliodora* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia



Figura 5. Mapa de los registros de presencia de *Vochysia ferruginea* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia



Figura 6. Mapa de los registros de presencia de *Hieronyma alchorneoides* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia



Figura 7. Mapa de los registros de presencia de *Dalbergia retusa* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia

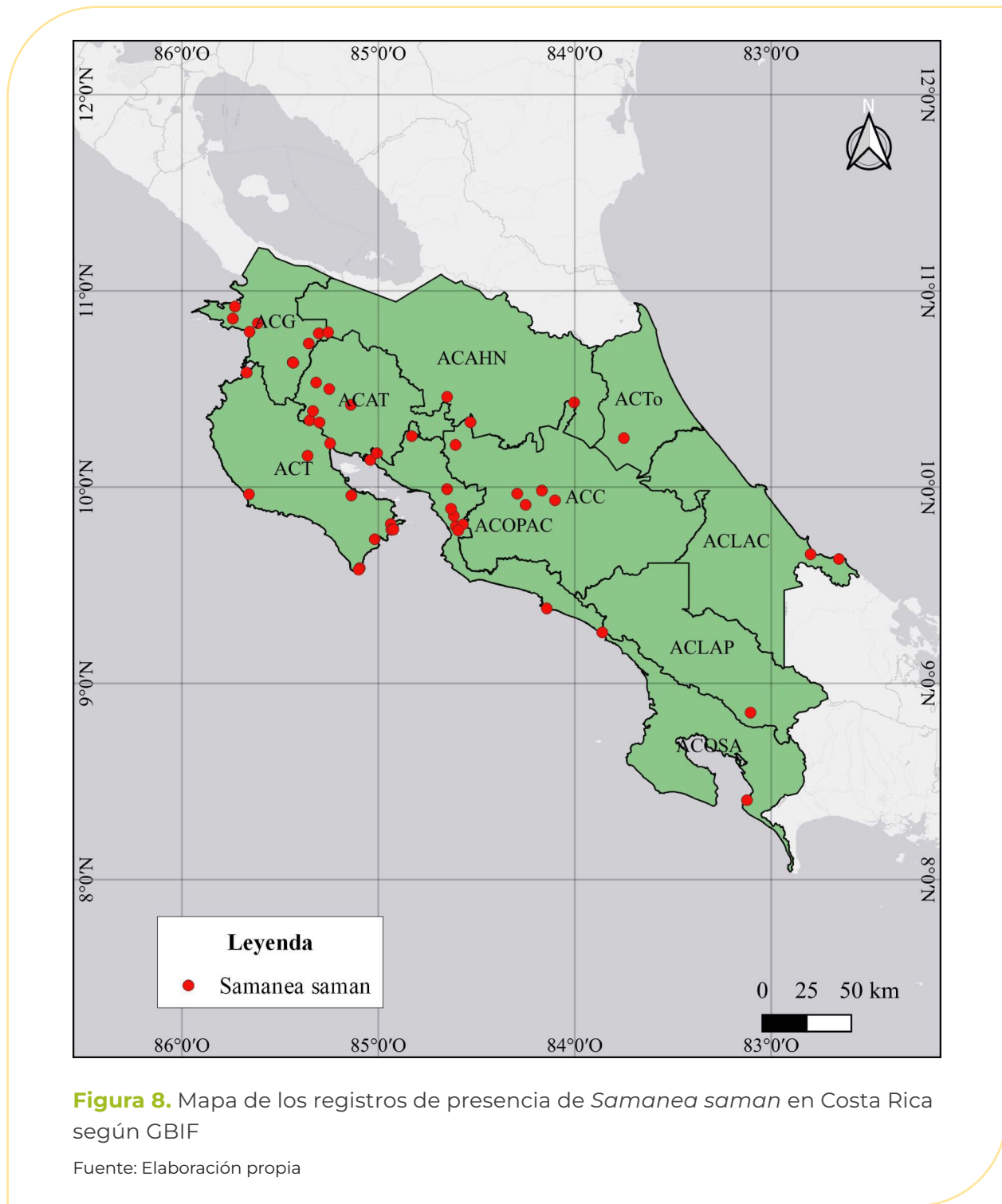


Figura 8. Mapa de los registros de presencia de *Samanea saman* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Mapa de los registros de presencia de *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia

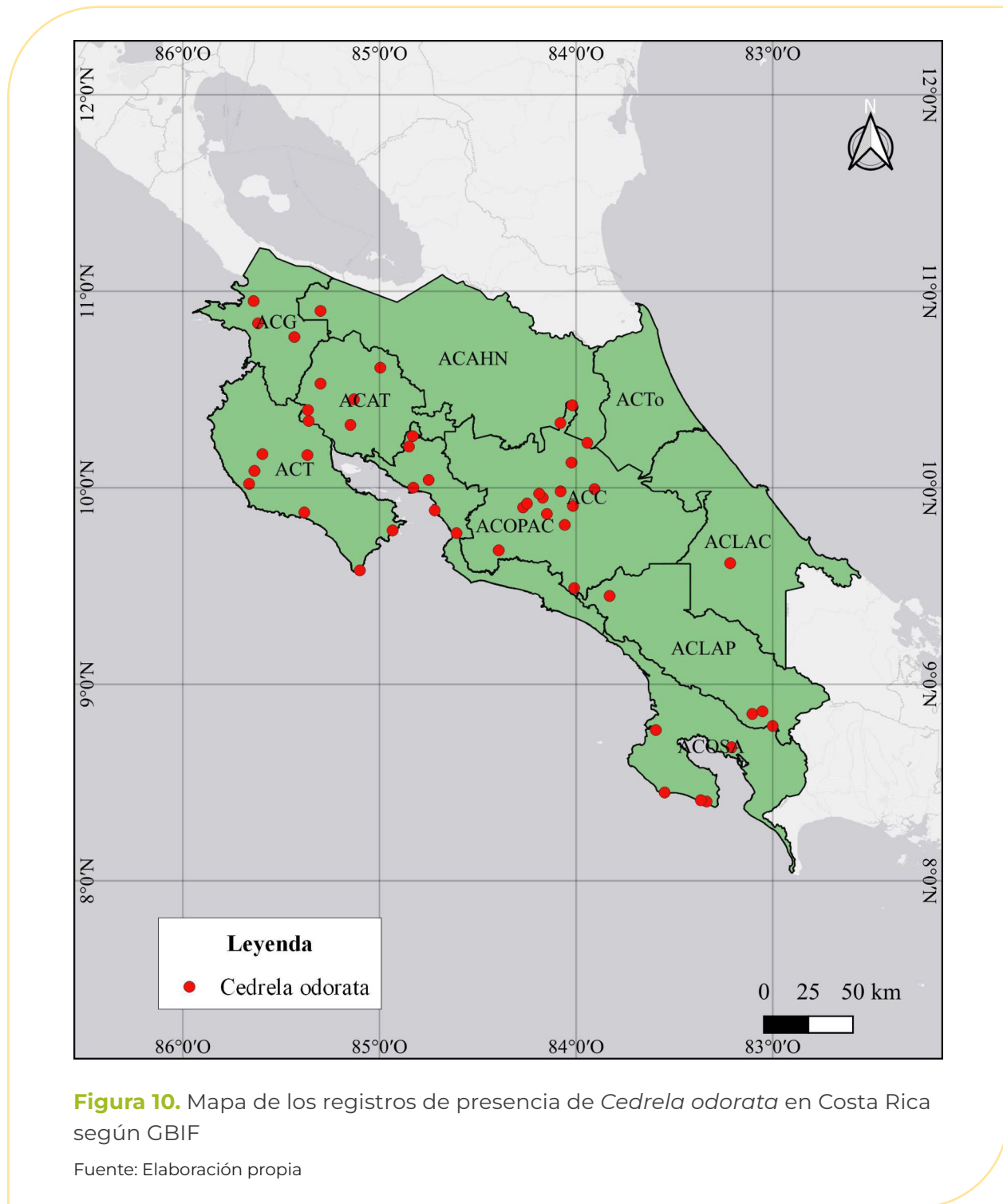


Figura 10. Mapa de los registros de presencia de *Cedrela odorata* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Mapa de los registros de presencia de *Swietenia macrophylla* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia

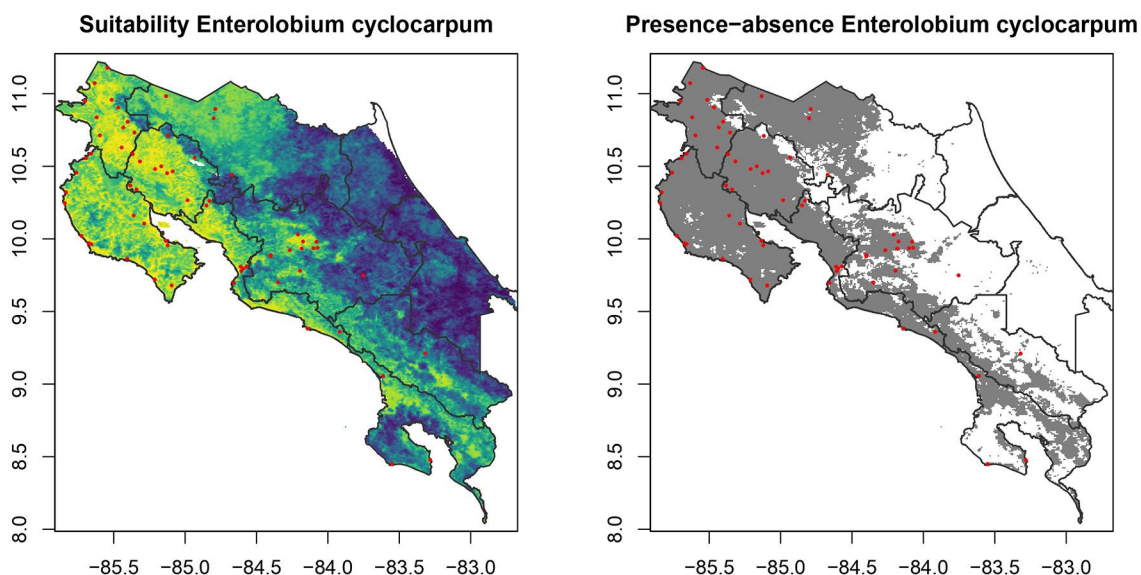


Figura 12. Mapa de los registros de presencia de *Dipteryx oleifera* en Costa Rica según GBIF

Fuente: Elaboración propia

Modelación de distribución potencial actual

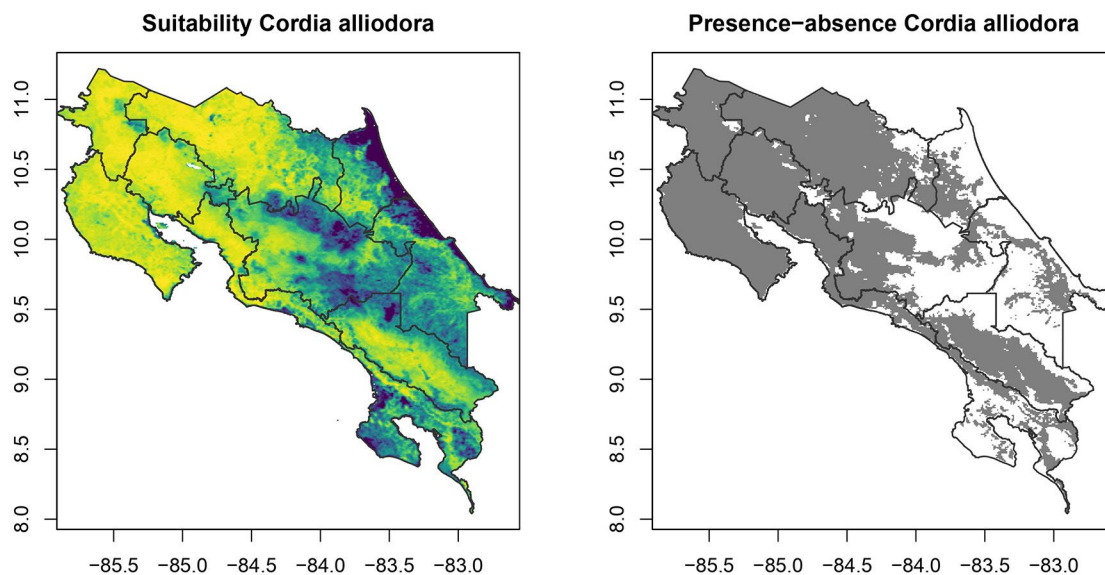
En las Figuras de la 13 a la 22, se presentan mapas de distribución potencial, donde los pixeles de color amarillo representan “idoneidad alta”, verde significan “idoneidad media” y azul, “idoneidad baja”. De la misma manera, los pixeles de color gris hacen referencia a “presencia” y blanco a “ausencia”. En la parte inferior de los mapas se visualiza un cuadro con datos de AUC, cv-AUC y variables de mayor contribución, para el modelo seleccionado.



AUC	0.73
cv-AUC	0.64
Variables de mayor contribución	pH del suelo (54,88%), Bio-17 (30,50%) y la profundidad del nivel freático (7,83%)

Figura 13. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Enterolobium cyclocarpum*

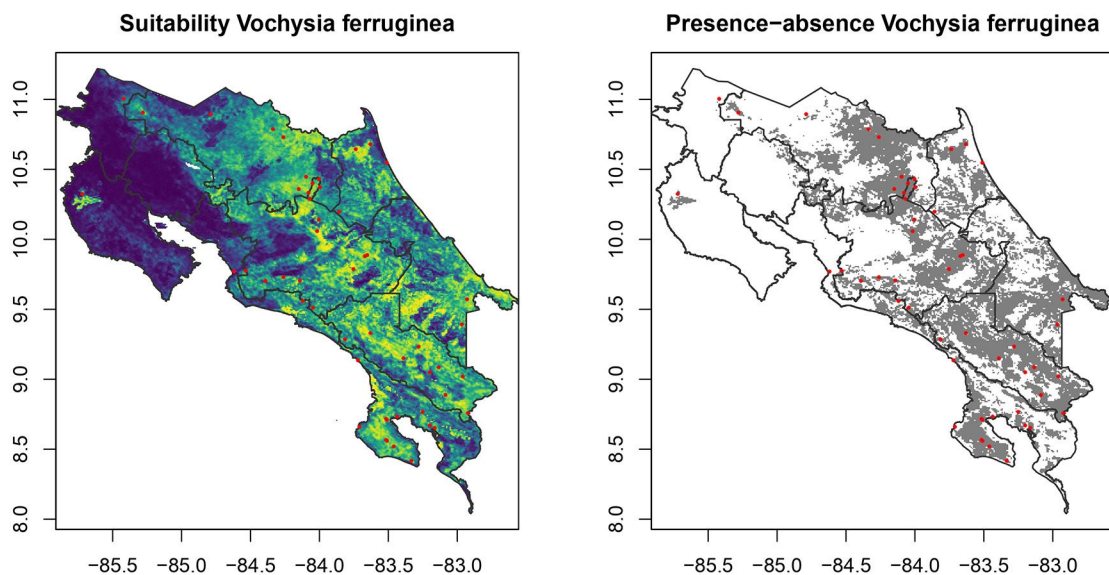
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.58
cv-AUC	0.53
Variables de mayor contribución	Contenido de carbono orgánico del suelo

Figura 14. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Cordia alliodora*

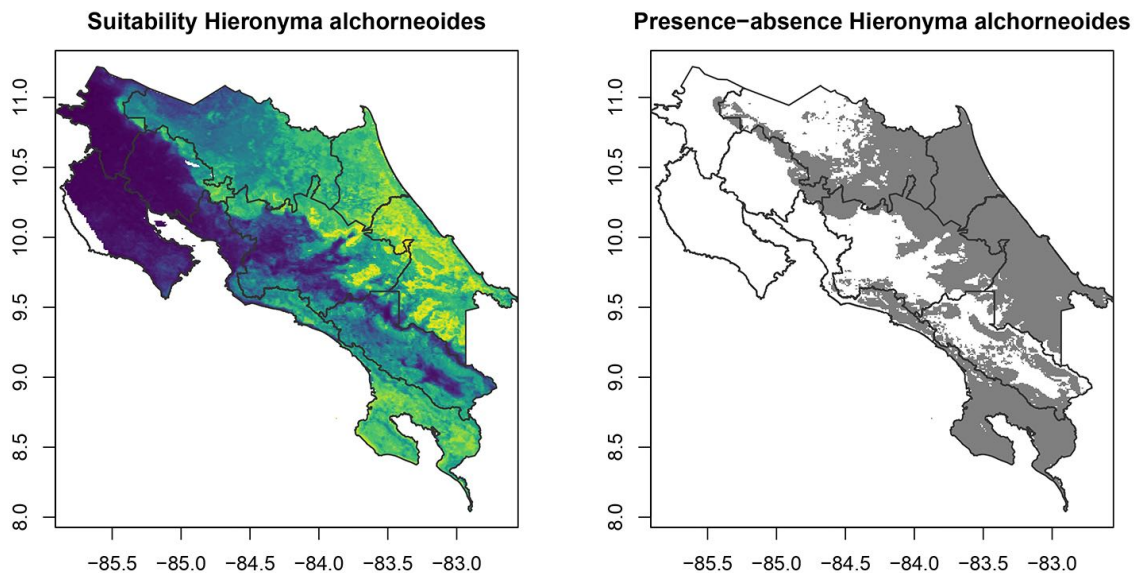
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.88
cv-AUC	0.70
Variables de mayor contribución	Bio-17 (41,64%), Bio-12 (16,22%) y la profundidad del suelo (9,42%)

Figura 15. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Vochysia ferruginea*

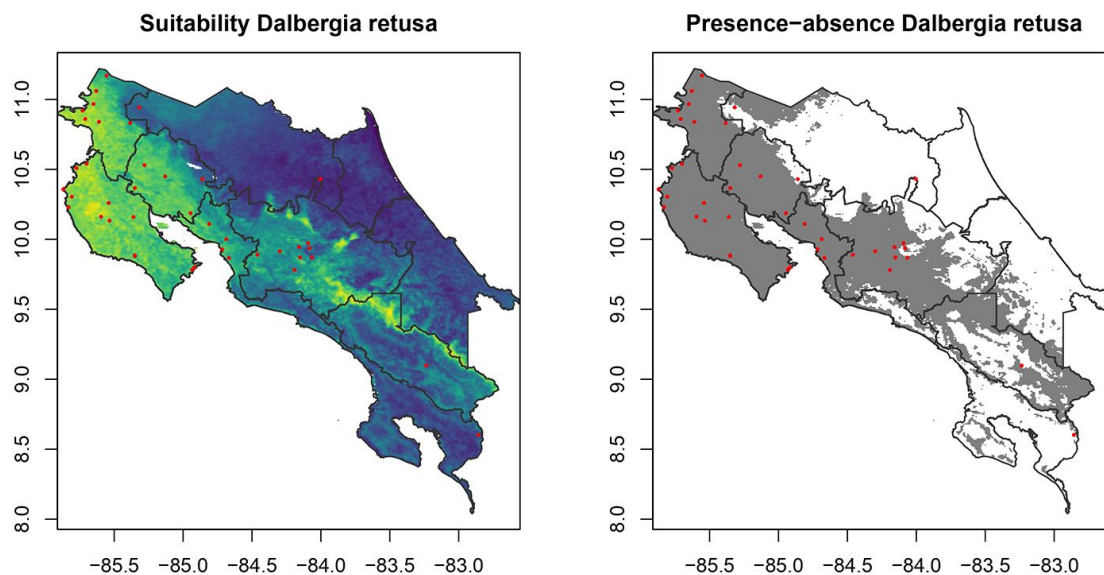
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.82
cv-AUC	0.76
Variables de mayor contribución	Bio-12 (61,46%), Bio-17 (25,24%) y el contenido de carbono orgánico en el suelo (10,46%)

Figura 16. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Hieronyma alchorneoides*

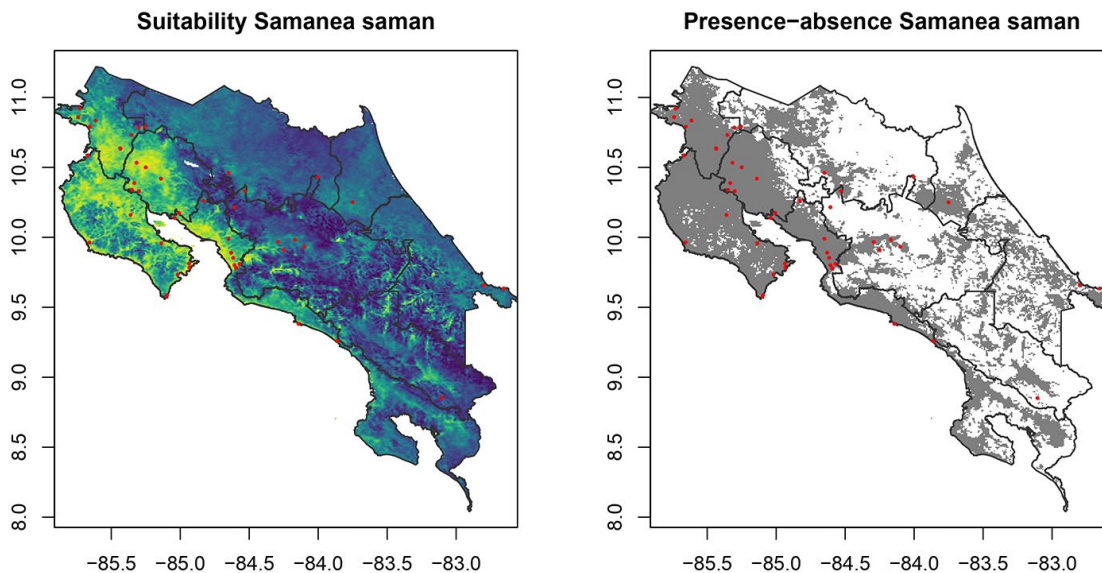
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.73
cv-AUC	0.67
Variables de mayor contribución	Bio-12 (65,40%), Bio-17 (27,60%) y el contenido de limo en el suelo (4,21%)

Figura 17. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Dalbergia retusa*

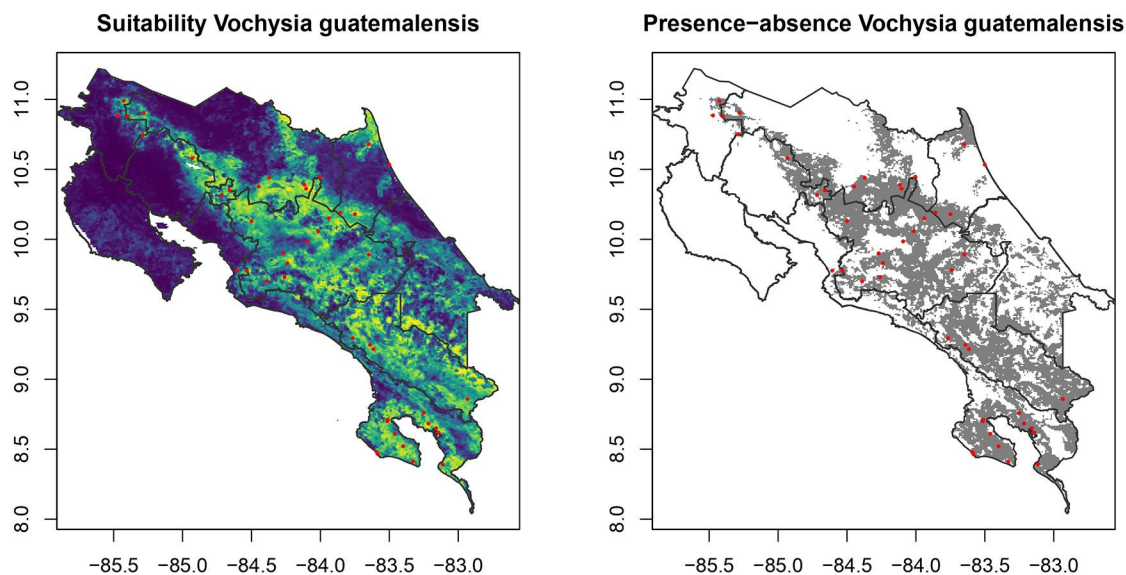
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.73
cv-AUC	0.64
VARIABLES DE MAYOR CONTRIBUCIÓN	Bio-12 (20,03%), Bio-4 (16,04%) y el pH del suelo (12,07%)

Figura 18. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Samanea saman*

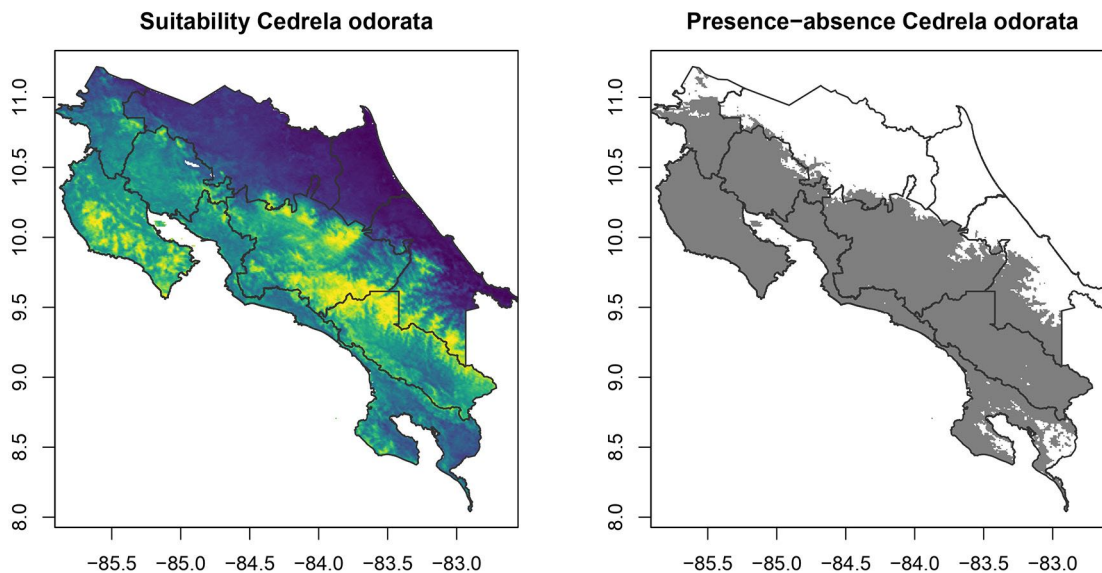
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.87
cv-AUC	0.69
Variables de mayor contribución	Bio-17 (33,48%), pH del suelo (26,12%) y la pendiente (7,44%)

Figura 19. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Vochysia guatemalensis*

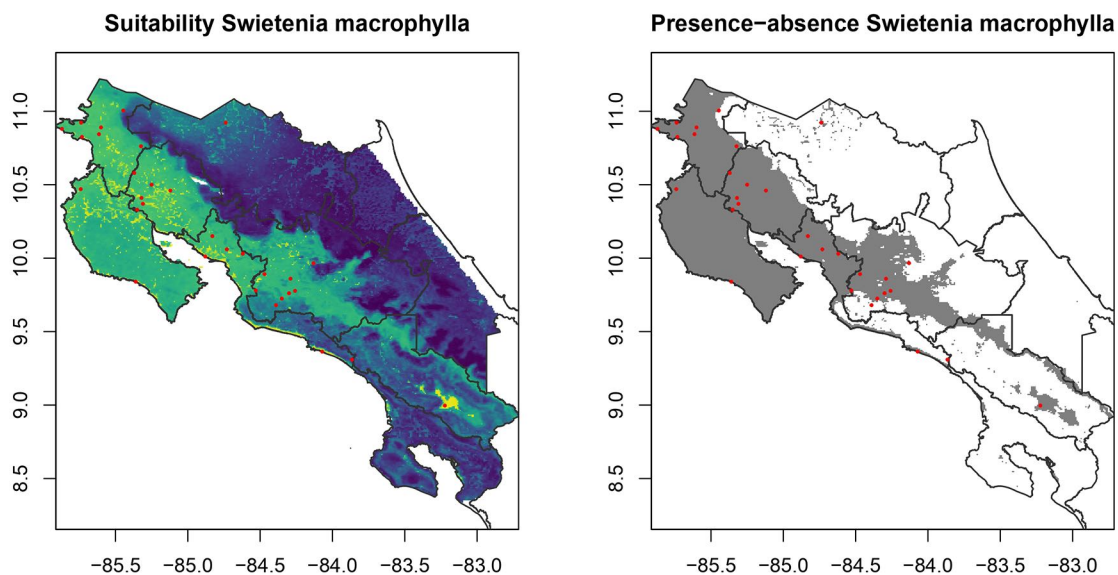
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.68
cv-AUC	0.60
Variables de mayor contribución	Bio-6 (29,22%), contenido de grava (17,02%) y Bio-17 (15,37%)

Figura 20. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Cedrela odorata*

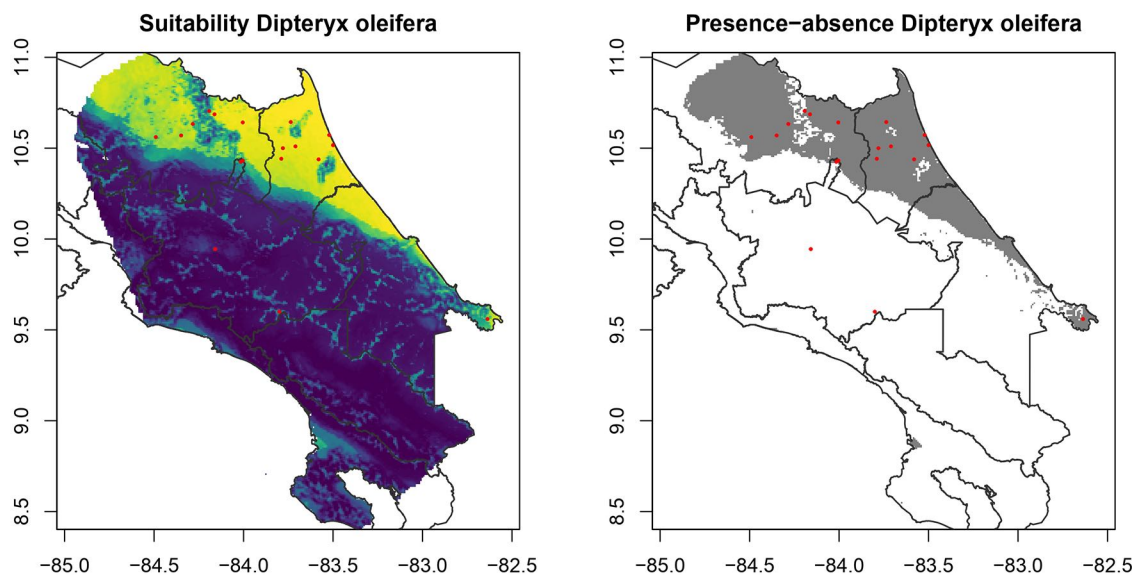
Fuente: Elaboración propia



AUC	0.80
cv-AUC	0.76
Variables de mayor contribución	Bio-12 (59,11%), Bio-17 (26,29%) y la profundidad del nivel freático (14,10%)

Figura 21. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Swietenia macrophylla*

Fuente: Elaboración propia



AUC	0.92
cv-AUC	0.86
Variables de mayor contribución	TRI: Índice de rugosidad del terreno (45,33%), Aspecto (positive topographic openness) (44,88%) y Bio-7 (9,62%)

Figura 22. Mapas de distribución potencial actual (idoneidad de hábitat) (imagen izquierda) y distribución potencial actual (presencia-ausencia) (imagen derecha) de *Dipteryx oleifera*

Fuente: Elaboración propia

Cambios categóricos de la distribución potencial actual y futura

En una proyección futura con el escenario SSP2, las especies más perjudicadas serían *Vochysia ferruginea*, *Vochysia guatemalensis* y *Dalbergia retusa*, pues son las que más pérdida de área van a sufrir, con una reducción de 19,84%, 14,97% y 12,70%, respectivamente (Cuadro 7). Dichos cambios se van a dar para *Vochysia ferruginea* –mayoritariamente– en el Área de Conservación Arenal Huetar Norte, para *Vochysia guatemalensis* en el Área de Conservación Osa y para *Dalbergia retusa* en el Área de Conservación La Amistad Pacífico.

Ante la proyección futura con el escenario SSP3, se estima que las especies más afectadas serían *Vochysia ferruginea*, *Vochysia guatemalensis* y *Samanea saman*, ya que su probable pérdida de área de 18,03%, 16,60% y 16,40%, respectivamente, es la mayor (Cuadro 8). Para *Vochysia ferruginea* estos cambios se darían en gran medida en el Área de Conservación La Amistad Pacífico, para *Vochysia guatemalensis* en el Área de Conservación Osa y para *Samanea saman* en el Área de Conservación Arenal Huetar Norte. Las ganancias de áreas idóneas son mínimas en ambos escenarios.

En el SPP2, *Vochysia guatemalensis* presenta 0,13% de área ganada, equivalente a 6517 ha. Estos cambios se identifican dentro del Área de Conservación Central, Área de Conservación La Amistad Caribe y Área de Conservación La Amistad Pacífico.

En el escenario SSP3, las especies que ganarían área son *Vochysia guatemalensis* y *Vochysia ferrugínea*, con ganancias de 254 ha y 85 ha, respectivamente. Estos cambios se darían en el Área de Conservación La Amistad Caribe.

Las especies que muestran mayor porcentaje de zonas de permanencia en condiciones ambientales del escenario SSP2 serían *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata* y *Enterolobium cyclocarpum* con 65,54%, 56,21% y 48,36%, y para el escenario de SSP3, son las mismas especies que encabezan la lista.

En las Figuras de la 22 a la 41, se presentan los mapas de cambios por cada especie y los respectivos escenarios de cambio climático, donde se muestran pixeles de color blanco a la “zona de idoneidad nula”, celeste a la “zona de permanencia”, azul “ganancia” y rojo “pérdida” de idoneidad de hábitat.

Cuadro 7. Cambios de áreas idóneas de las especies priorizadas en el escenario de SPP2 4.5 al 2050

Especie priorizada	SSP2 4.5 al 2050							
	Actual (ha)	Futuro (ha)	Pérdida (ha)	%	Ganancia (ha)	%	Permanencia (ha)	%
<i>Vochysia ferrugínea</i>	1 863 096	850 886	1 012 125	19,84			850 886	16,68
<i>Vochysia guatemalensis</i>	1 835 249	1 079 245	762 437	14,97	6517	0,13	1 072 727	21,06
<i>Dalbergia retusa</i>	2 568 909	1 921 074	647 665	12,70			1 921 074	37,66
<i>Cedrela odorata</i>	3 365 710	2 866 926	498 530	9,77			2 866 926	56,21
<i>Samanea saman</i>	2 420 704	1 955 438	465 097	9,12			1 955 438	38,34
<i>Swietenia macrophylla</i>	1 724 540	1 307 942	416 429	8,44			1 307 942	26,51
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	2 639 414	2 333 017	306 228	6,06			2 333 017	46,18
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	2 511 777	2 444 996	66 612	1,32			2 444 996	48,36
<i>Dipteryx oleifera</i>	826 425	1 046 828	24 969	0,69			801 372	22,12
<i>Cordia alliodora</i>	3 343 195	3 343 195					3 343 195	65,54

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8. Cambios de áreas idóneas de las especies priorizadas en el escenario de SPP3 7.0 al 2050

Especie priorizada	SSP3 7.0 al 2050							
	Actual (ha)	Futuro (ha)	Pérdida (ha)	%	Ganancia (ha)	%	Permanencia (ha)	%
<i>Vochysia ferruginea</i>	1 863 096	943 567	919 529	18,03	85	0,00	943 482	18,50
<i>Vochysia guatemalensis</i>	1 835 249	989 865	845 554	16,60	254	0,00	989 611	19,43
<i>Samanea saman</i>	2 420 704	1 584 038	836 497	16,40			1 584 038	31,05
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	2 639 414	1 856 155	783 089	15,50			1 856 155	36,74
<i>Dalbergia retusa</i>	2 568 909	1 977 614	591 126	11,59			1 977 614	38,77
<i>Cedrela odorata</i>	3 365 710	2 804 123	561 332	11,00			2 804 123	54,97
<i>Swietenia macrophylla</i>	1 724 540	1 397 660	326 795	6,62			1 397 576	28,33
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	2 511 777	2 468 610	42 997	0,85			2 468 610	48,83
<i>Dipteryx oleifera</i>	826 425	1 051 060	20 398	0,56			805 942	22,25
<i>Cordia alliodora</i>	3 343 195	3 343 195					3 343 195	65,54

Fuente: Elaboración propia

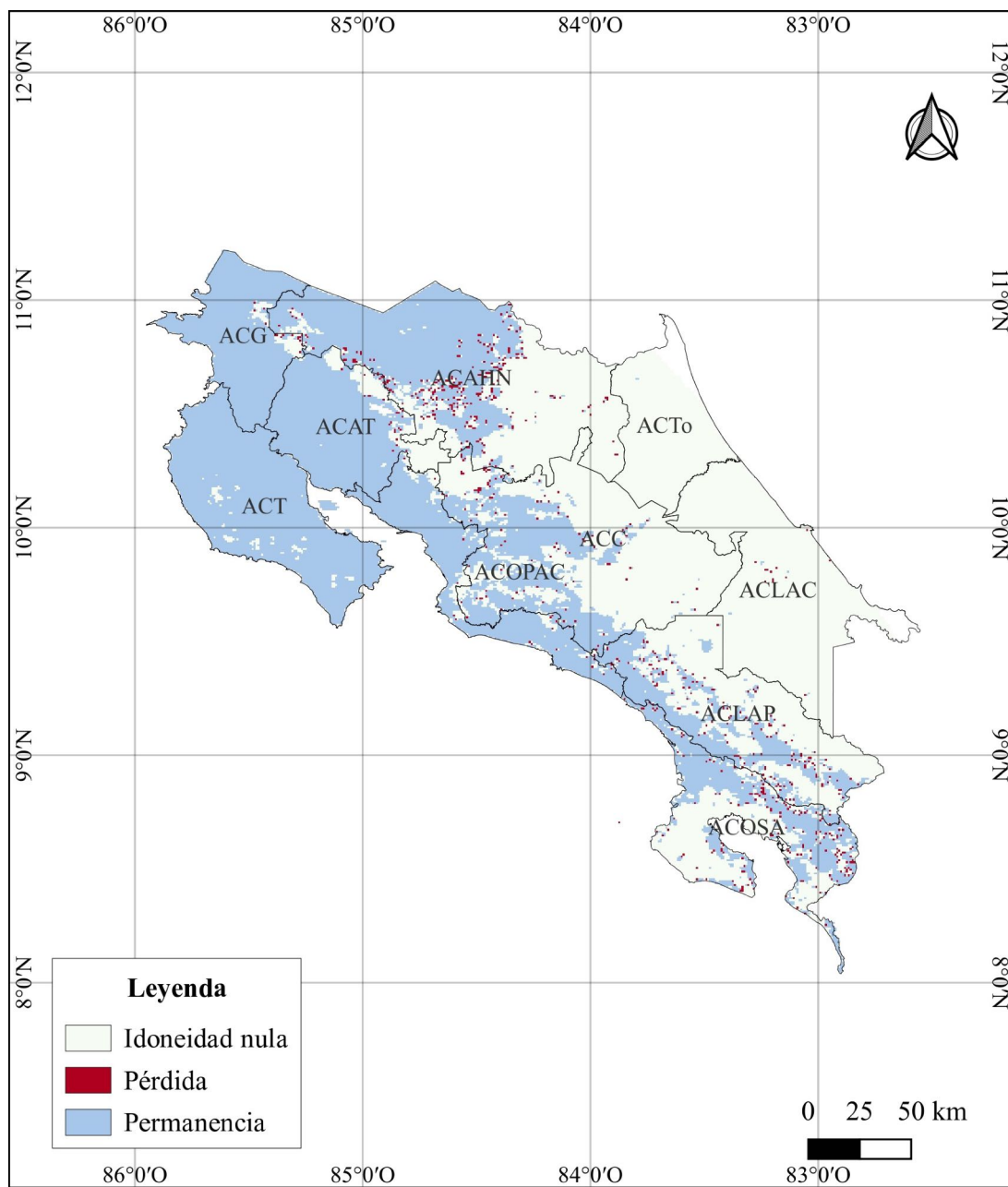


Figura 23. Mapa de cambios de área de idoneidad de hábitat para *Enterolobium cyclocarpum* ante el escenario climático SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

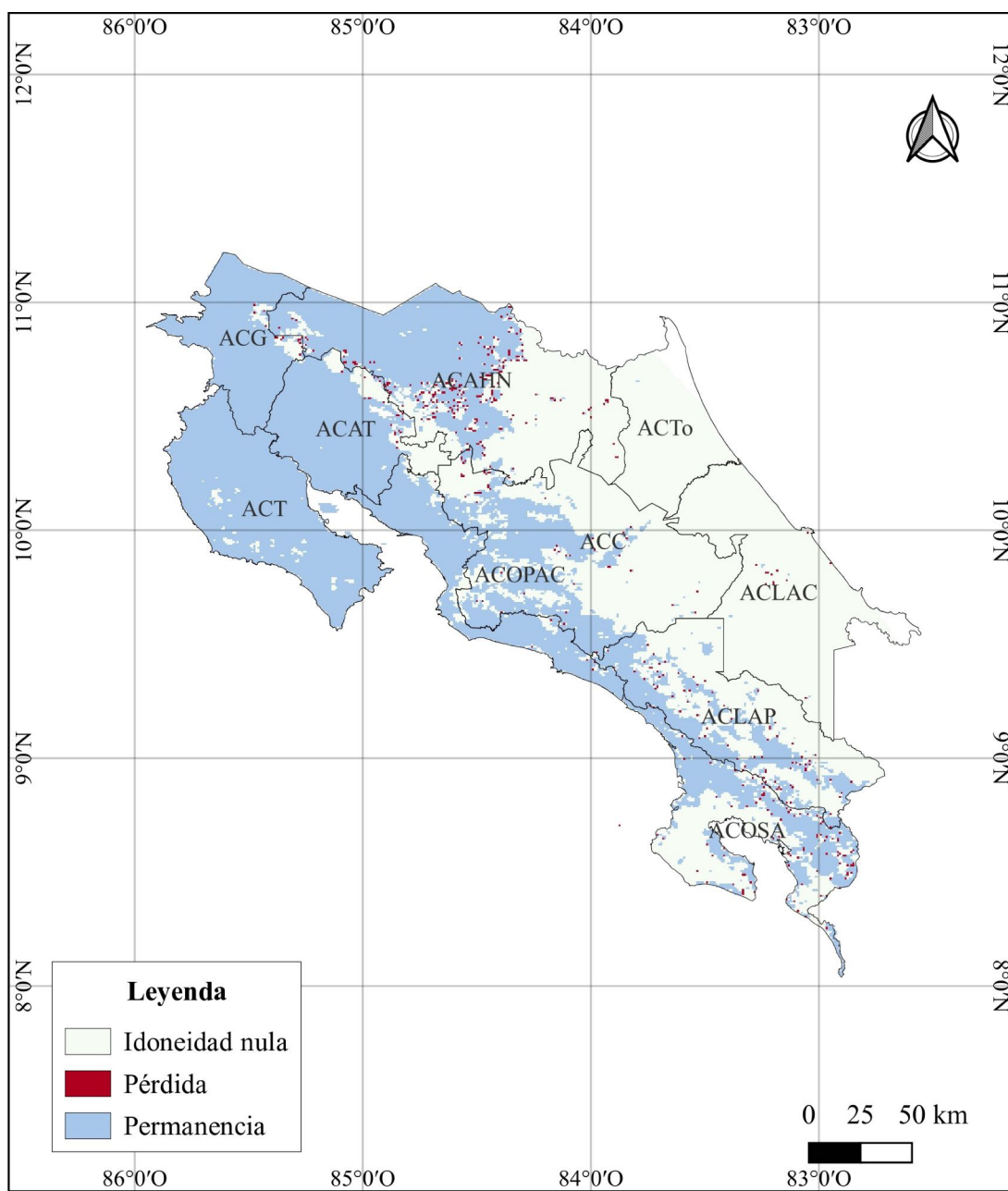


Figura 24. Anexo 2. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Enterolobium cyclocarpum* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

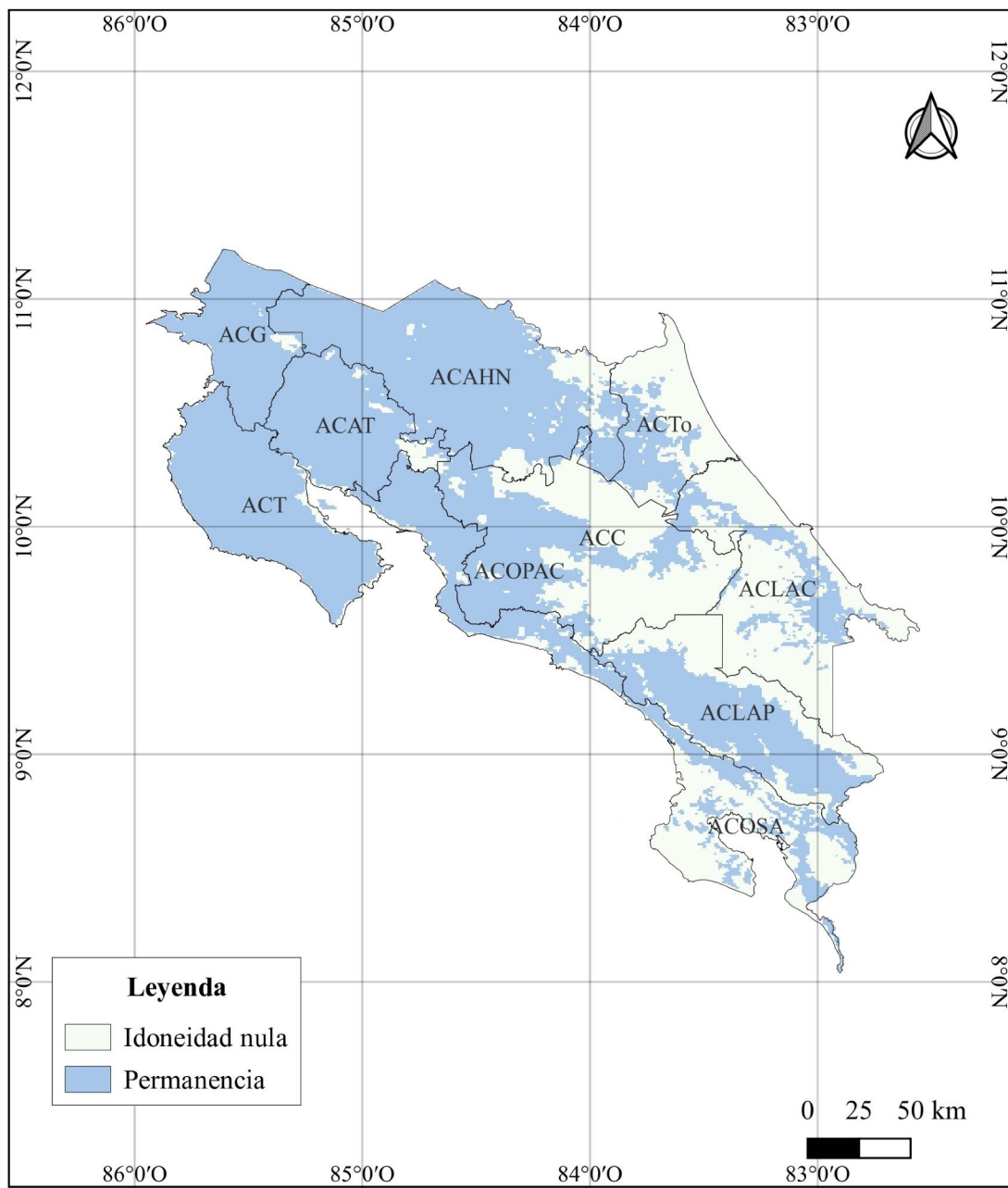


Figura 25. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Cordia alliodora* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

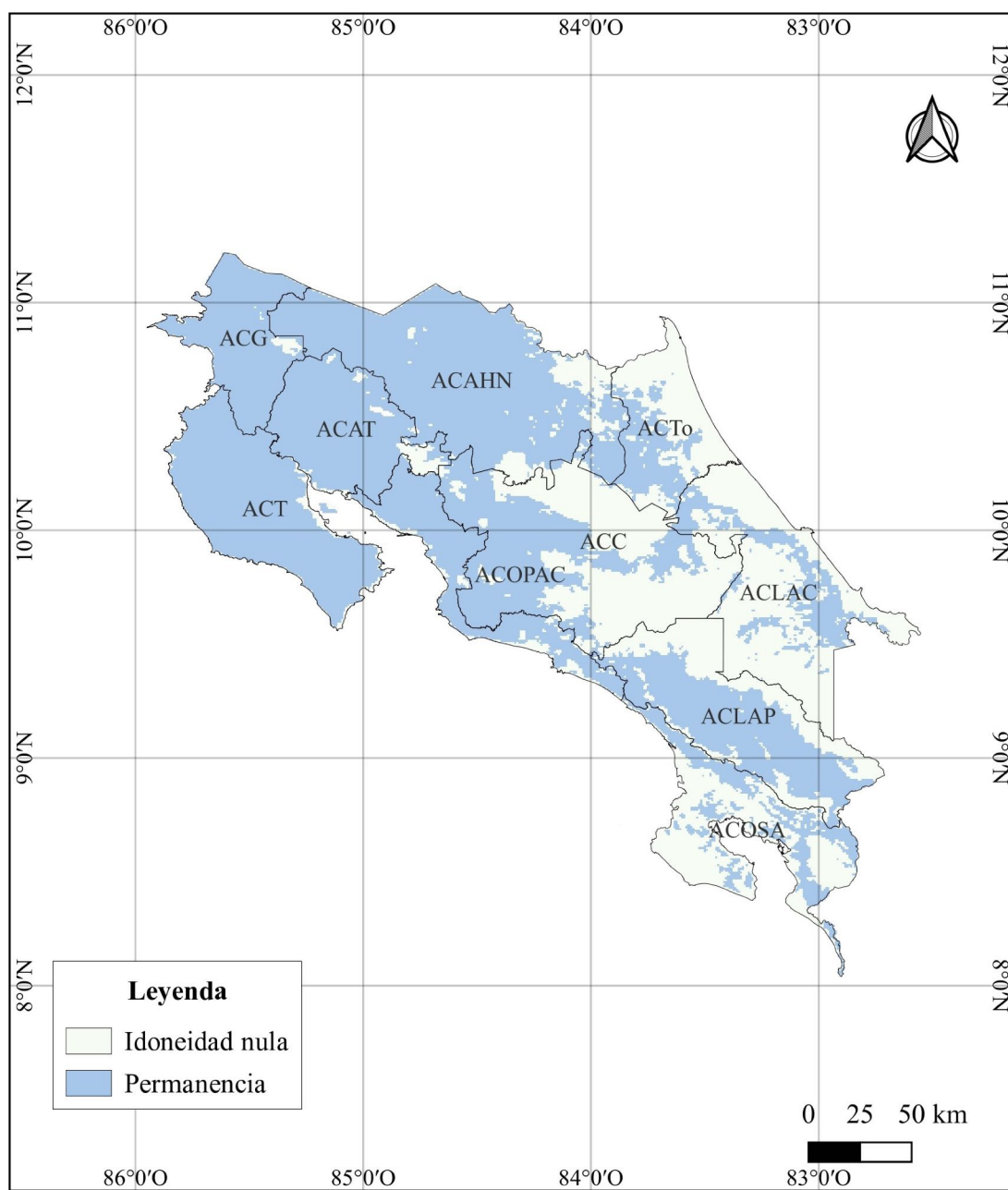


Figura 26. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Cordia alliodora* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

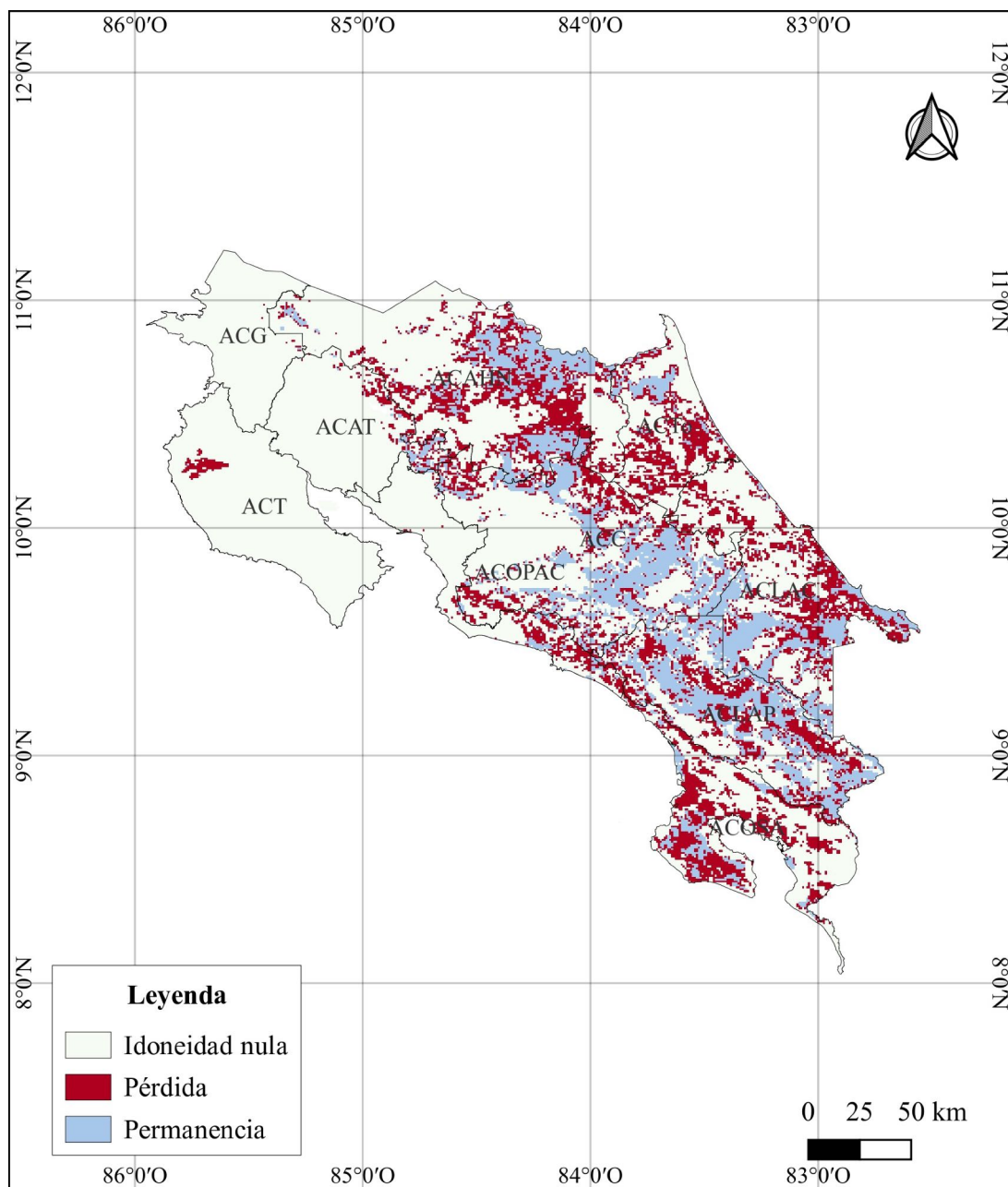


Figura 27. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Vochysia ferruginea* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

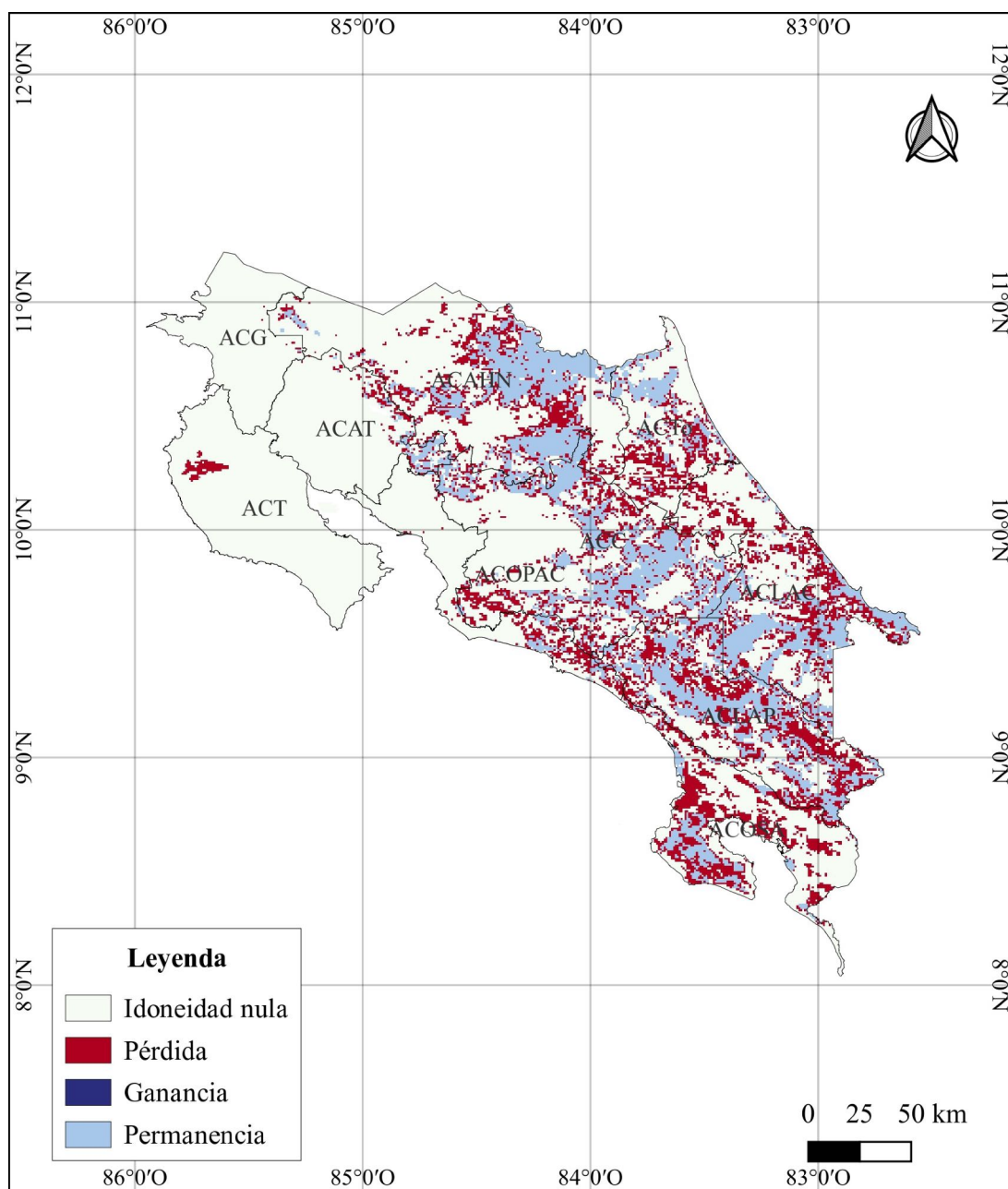


Figura 28. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Vochysia ferruginea* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

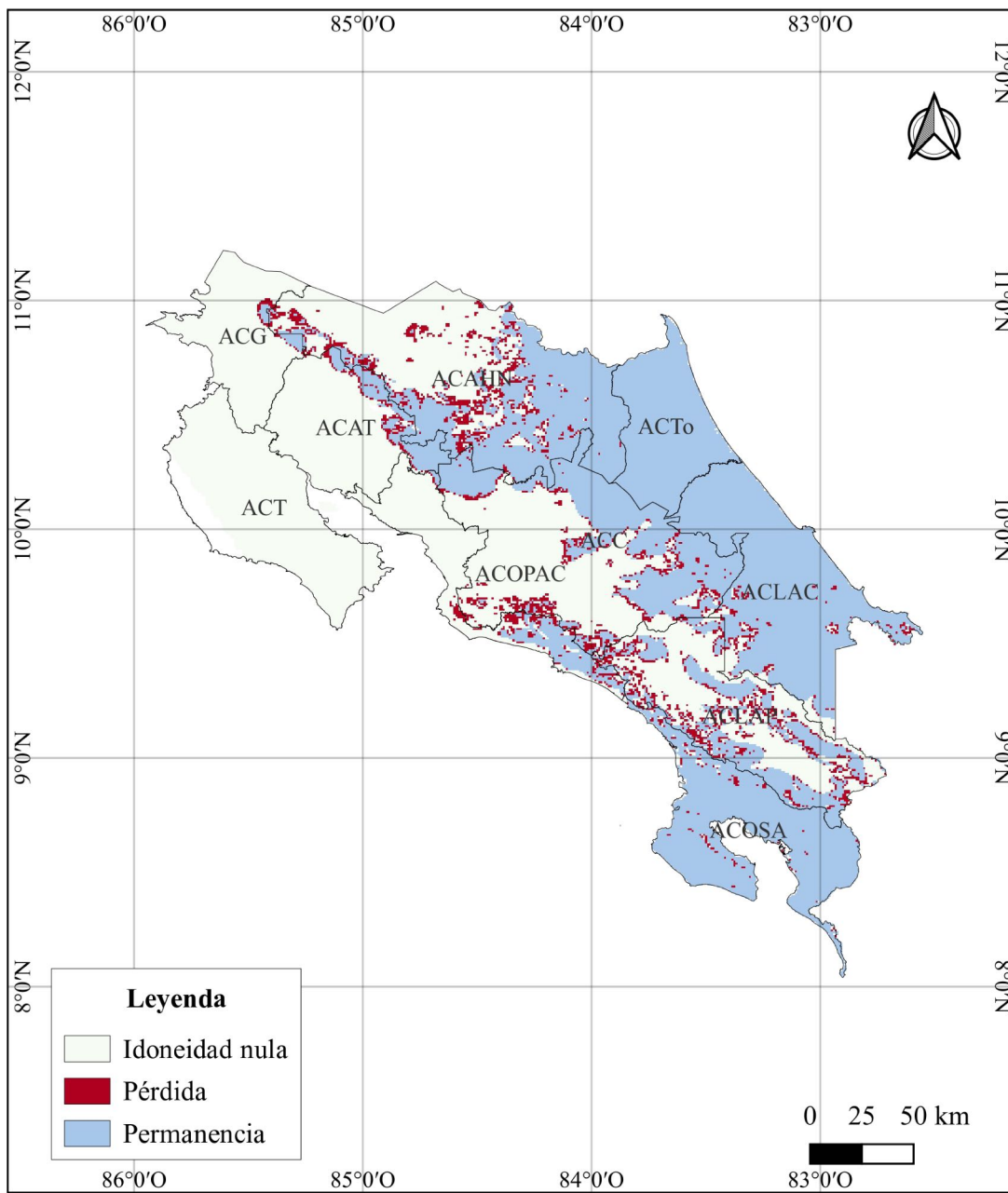


Figura 29. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Hieronyma alchorneoides* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

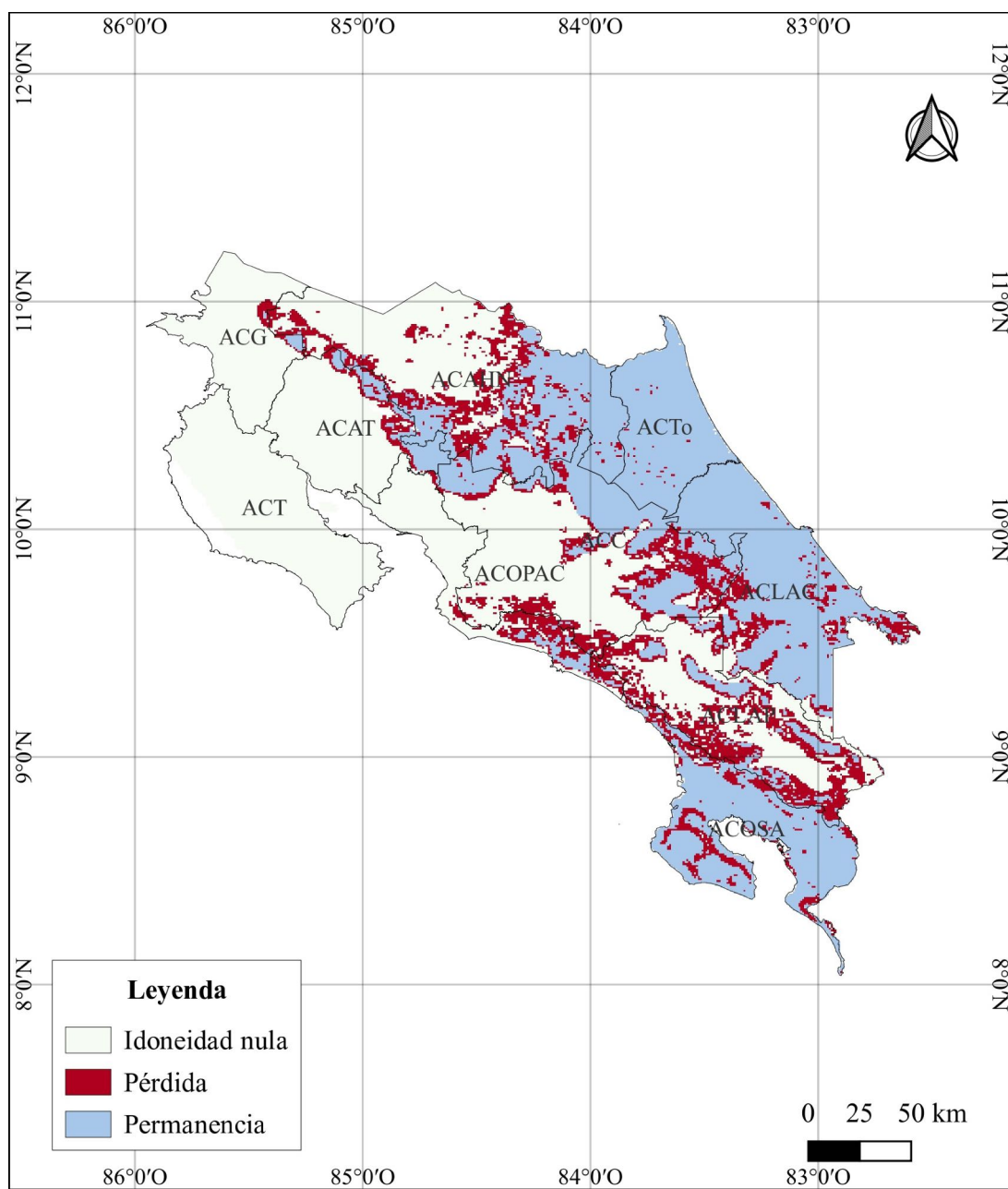


Figura 30. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Hieronyma alchorneoides* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

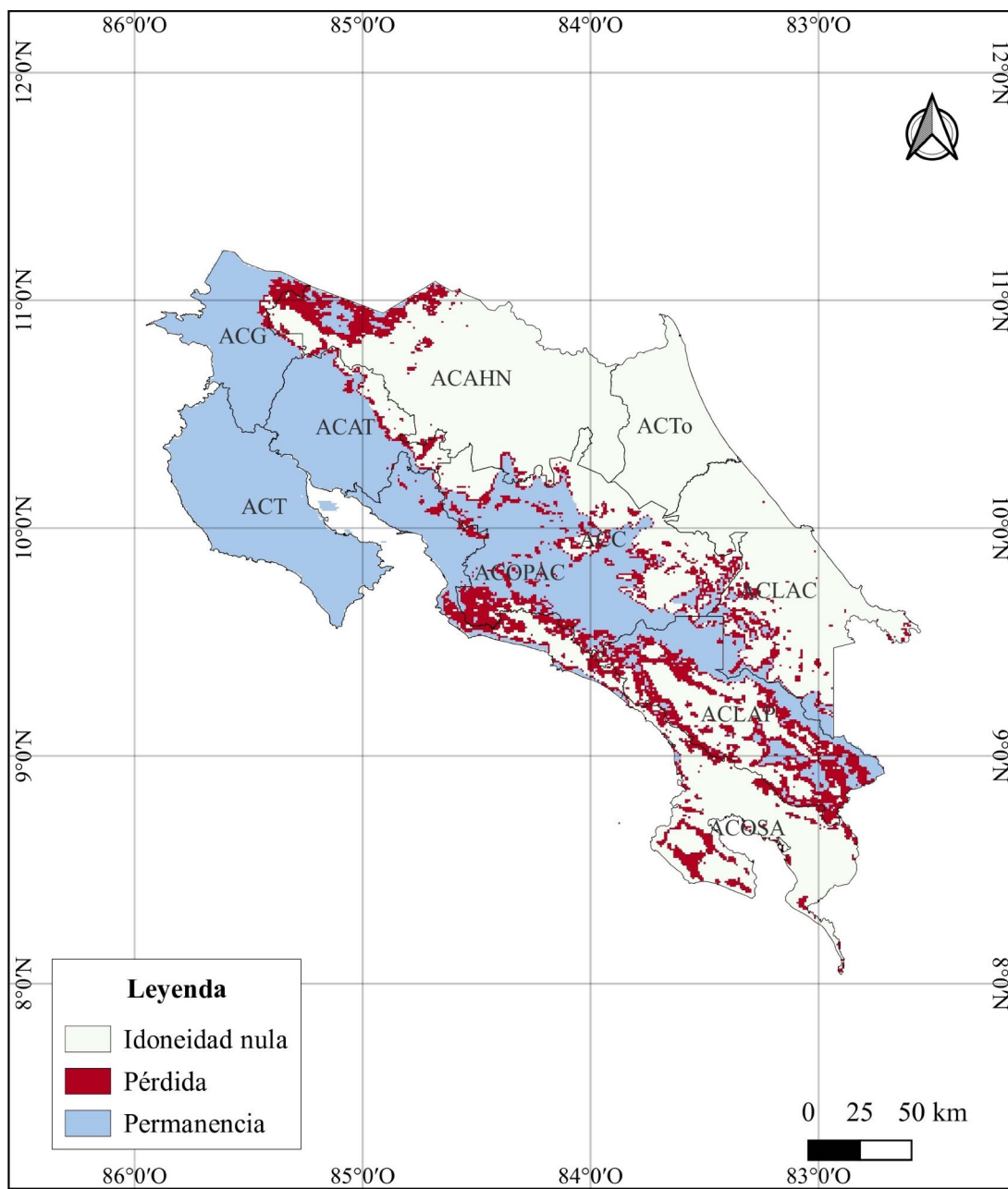


Figura 31. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Dalbergia retusa* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

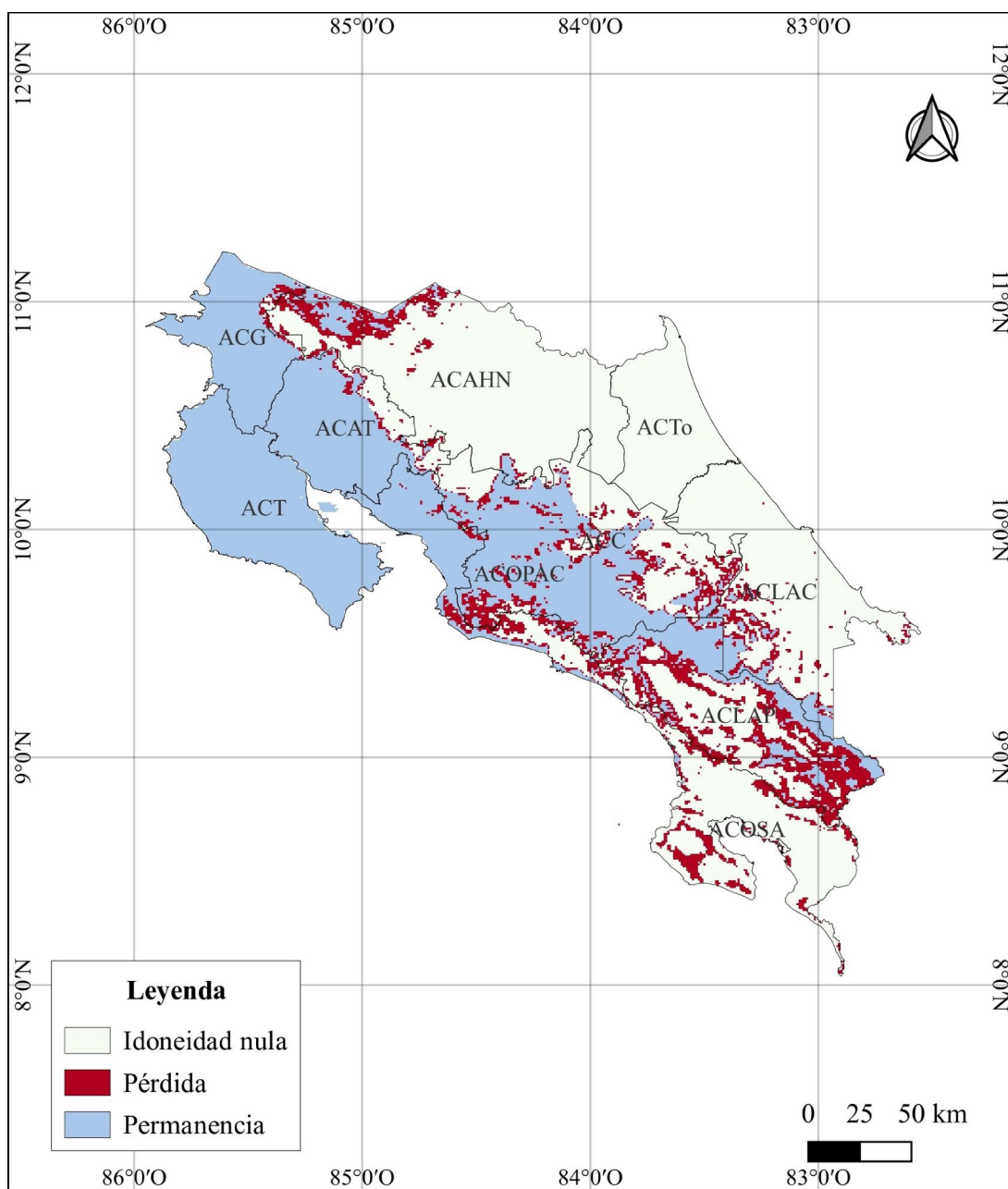


Figura 32. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Dalbergia retusa* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

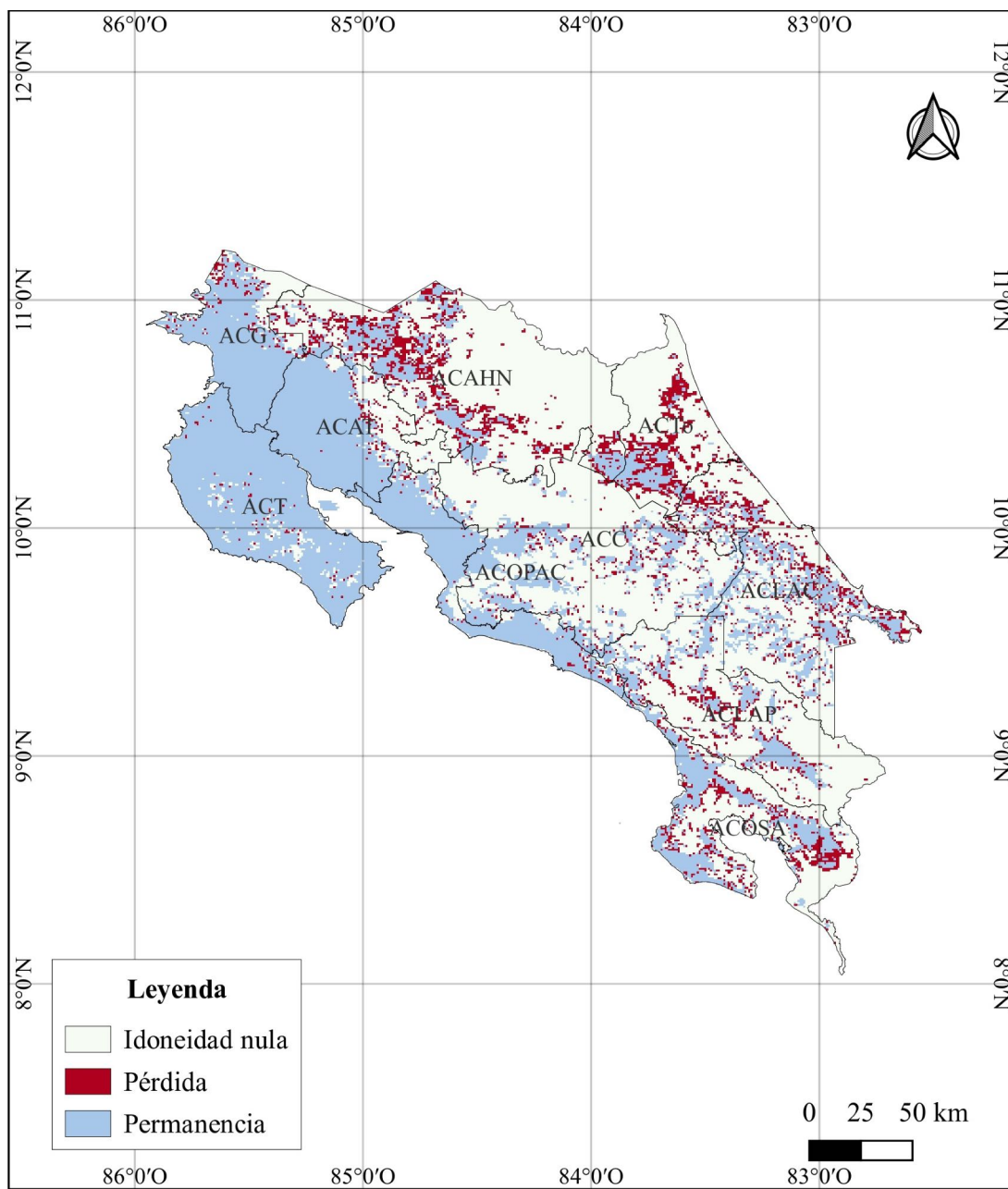


Figura 33. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Samanea saman* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

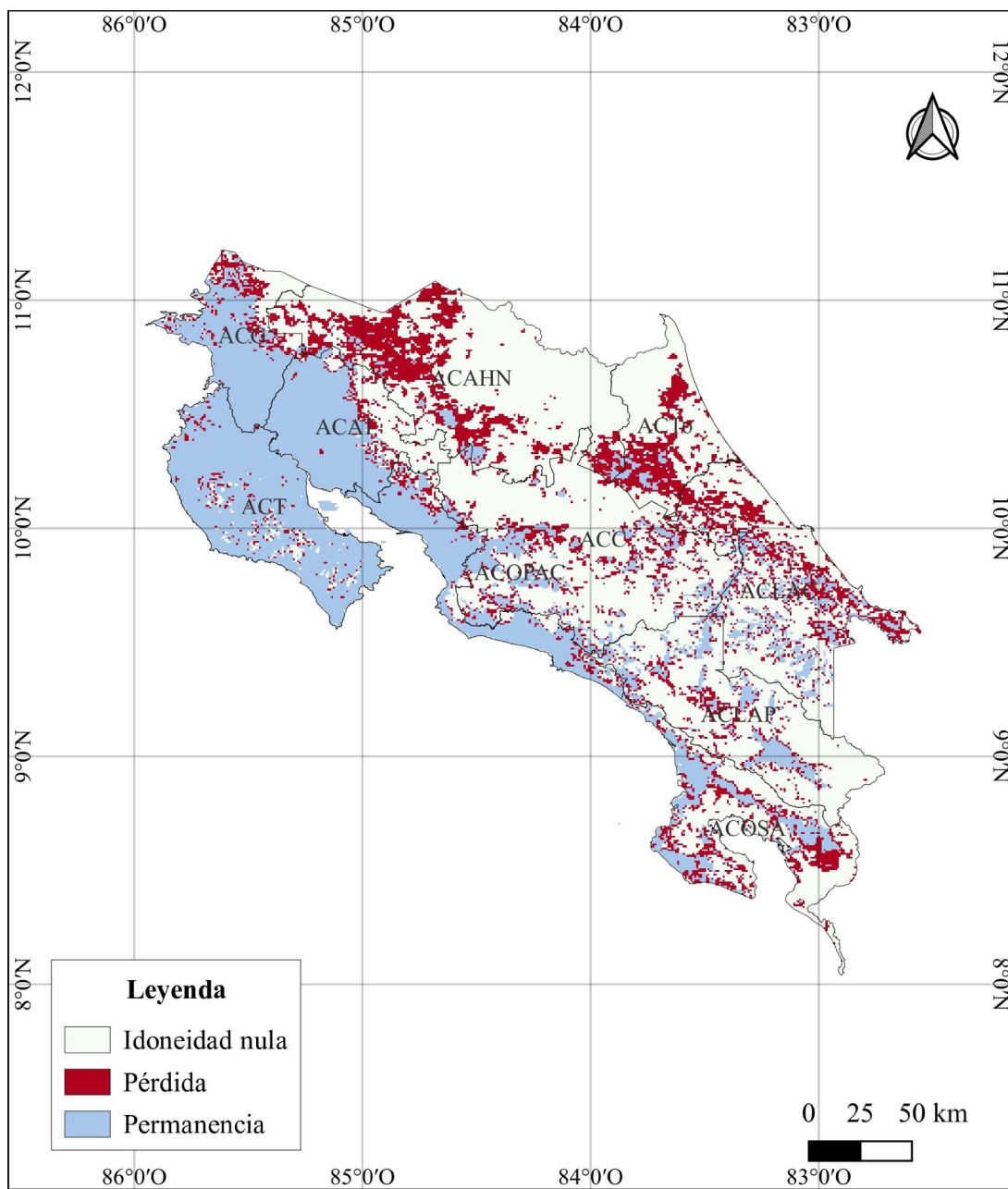


Figura 34. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Samanea saman* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

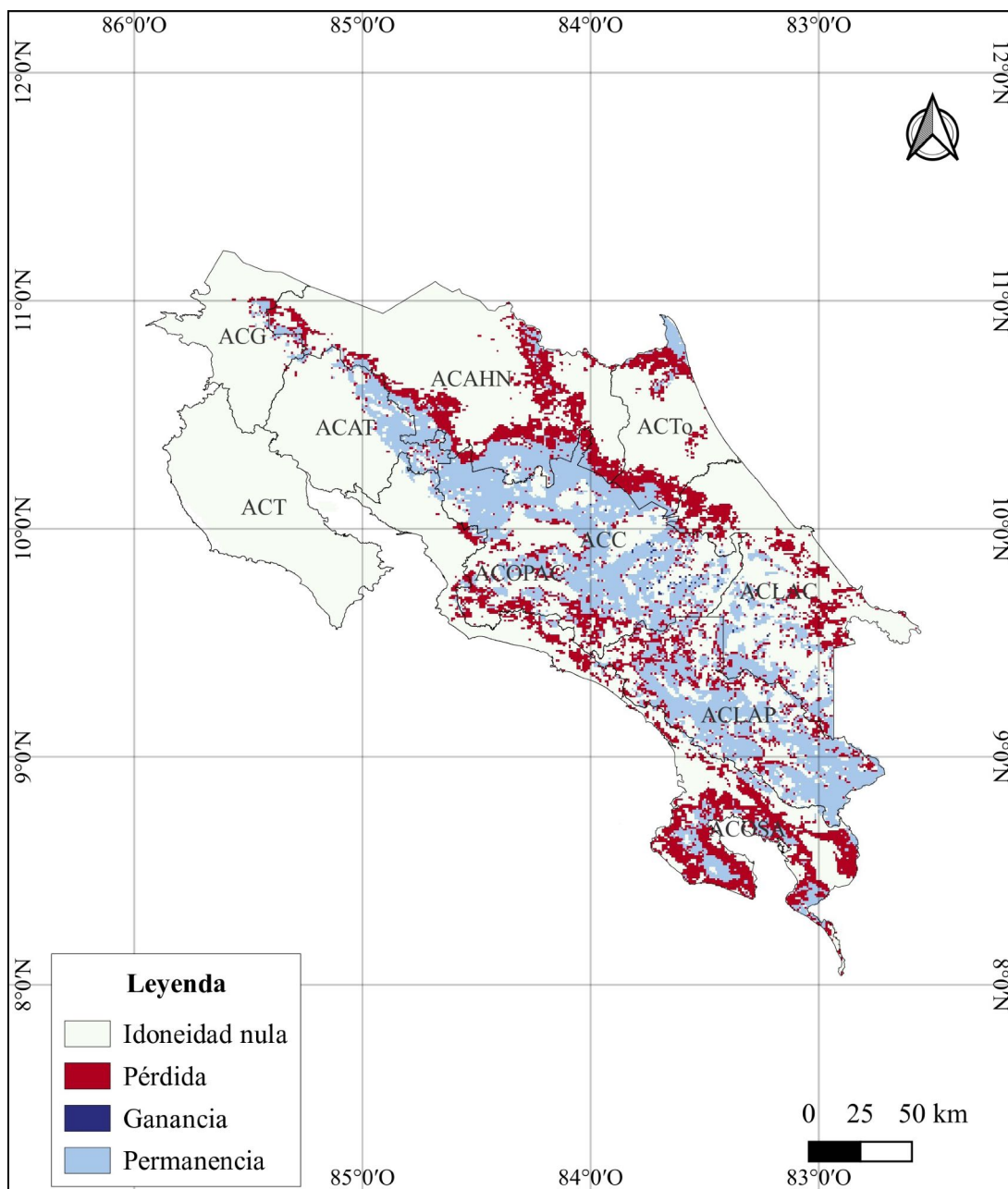


Figura 35. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Vochysia guatemalensis* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

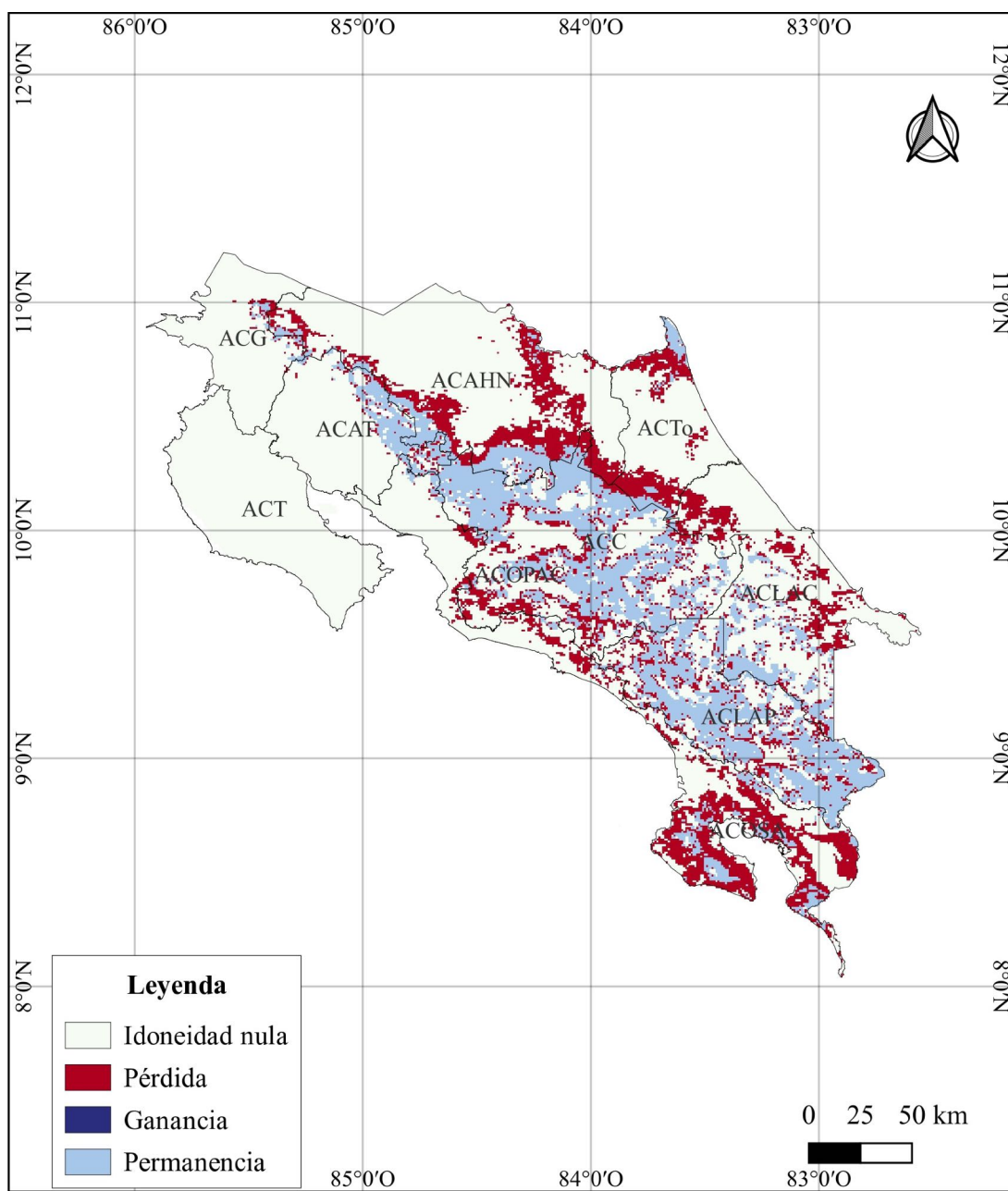


Figura 36. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Vochysia guatemalensis* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

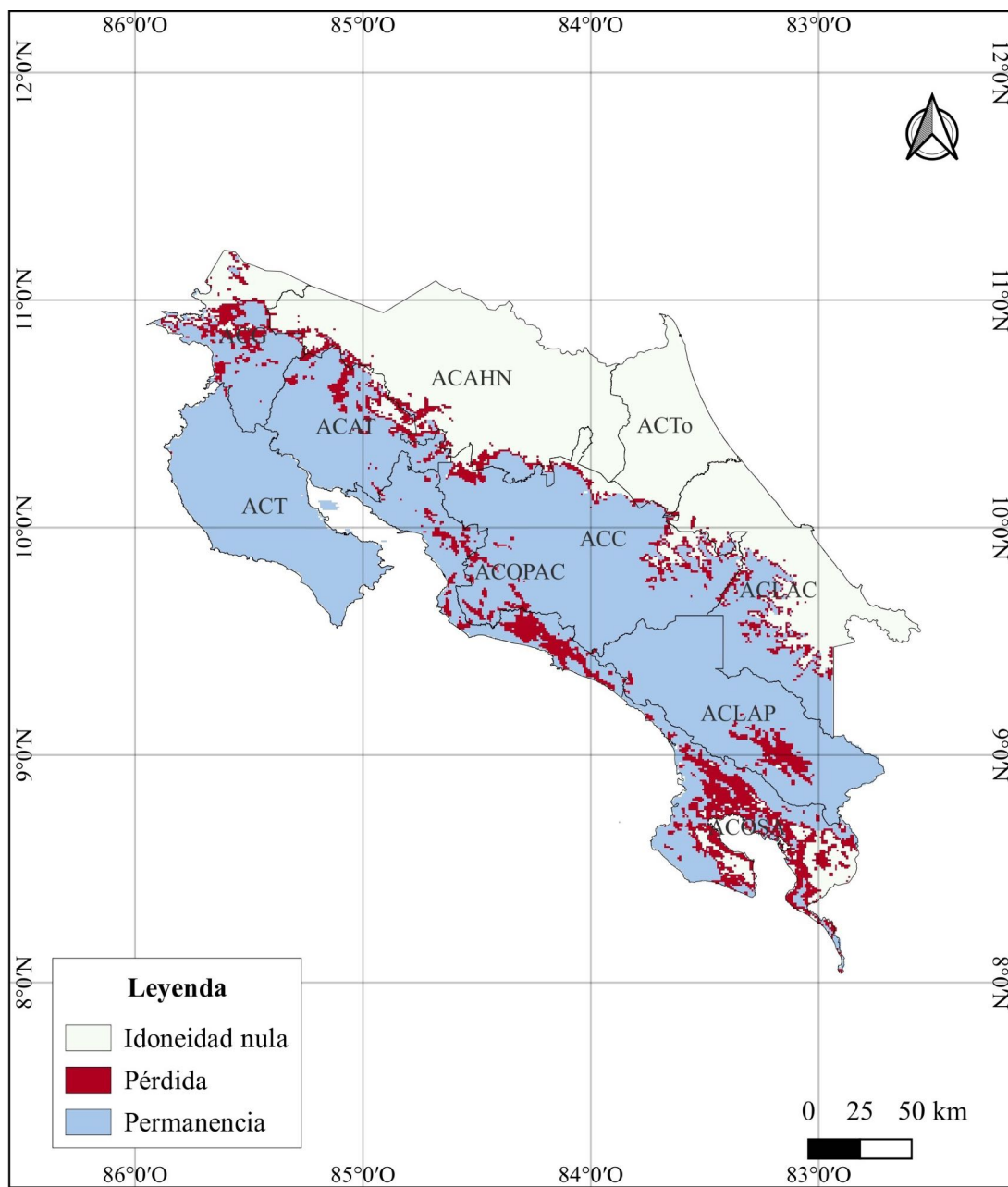


Figura 37. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Cedrela odorata* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

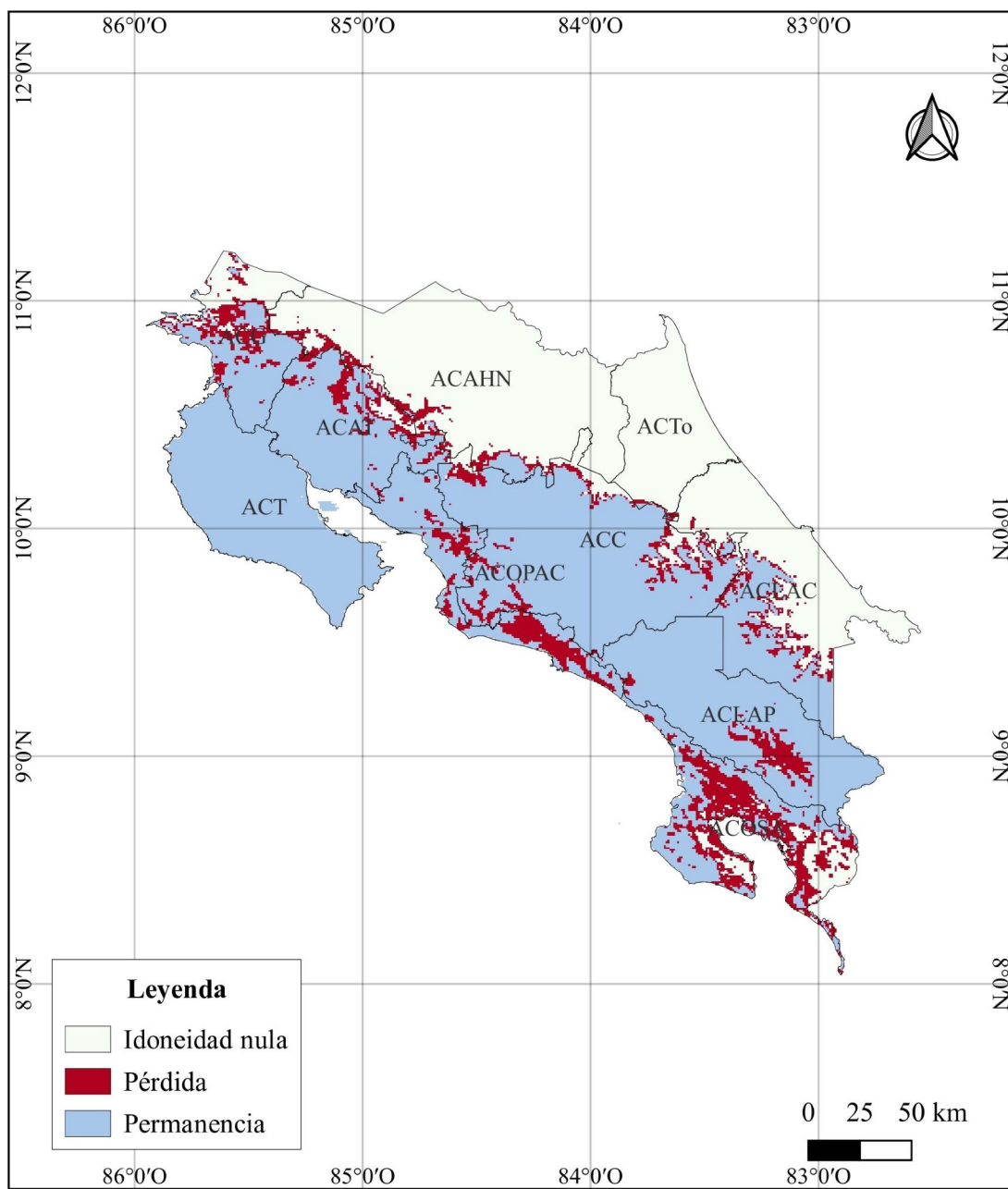


Figura 38. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Cedrela odorata* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

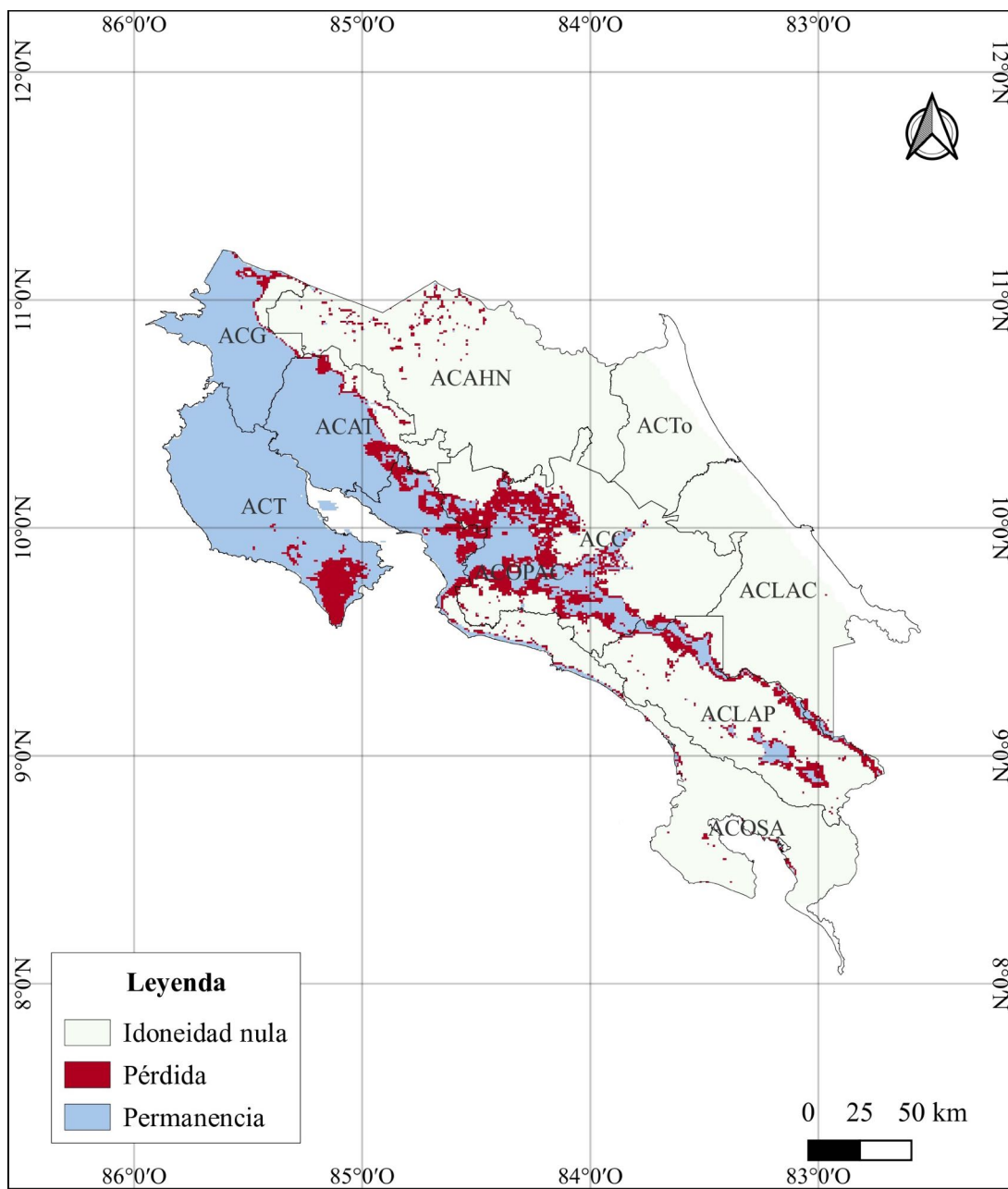


Figura 39. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Swietenia macrophylla* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

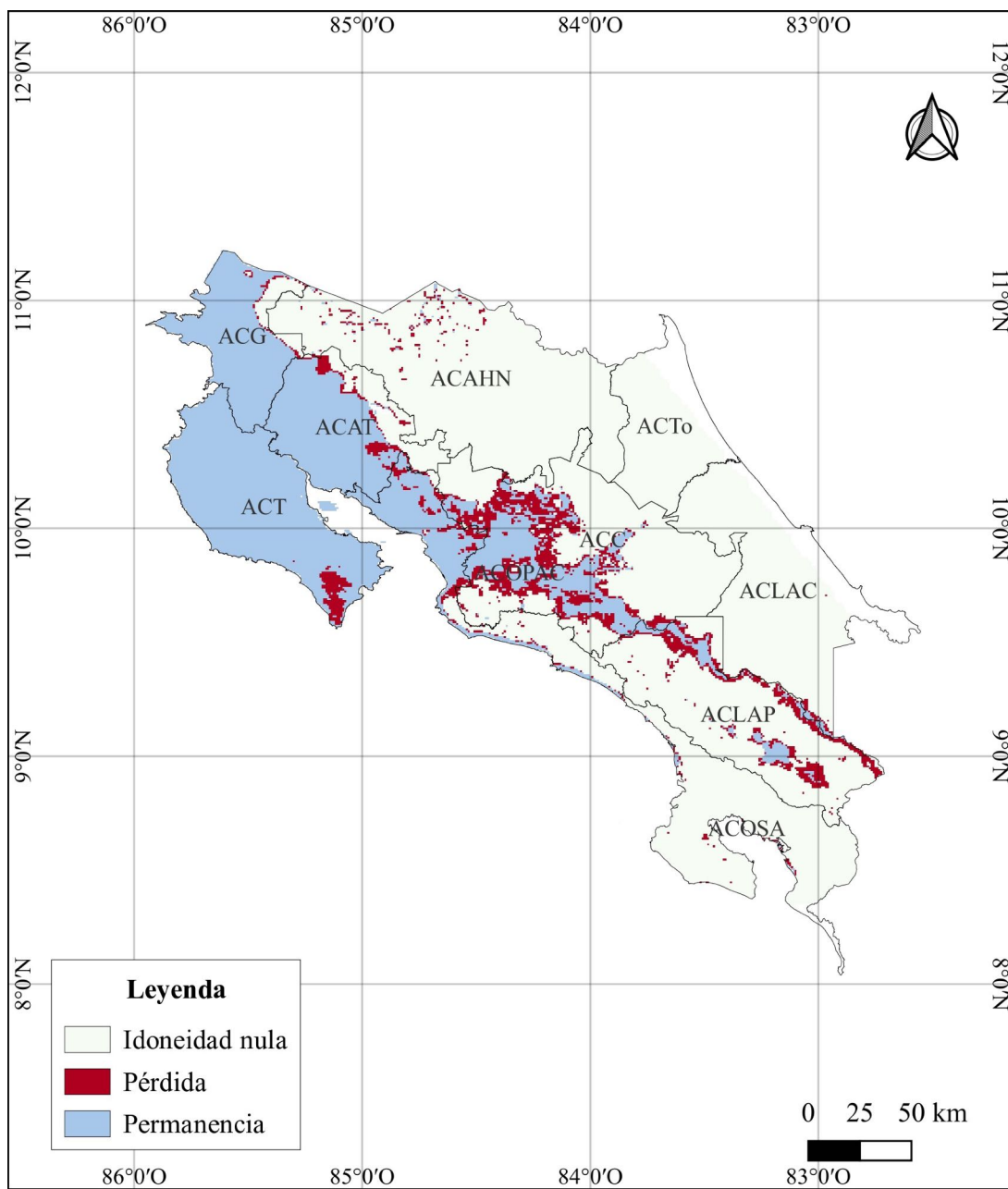


Figura 40. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Swietenia macrophylla* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia

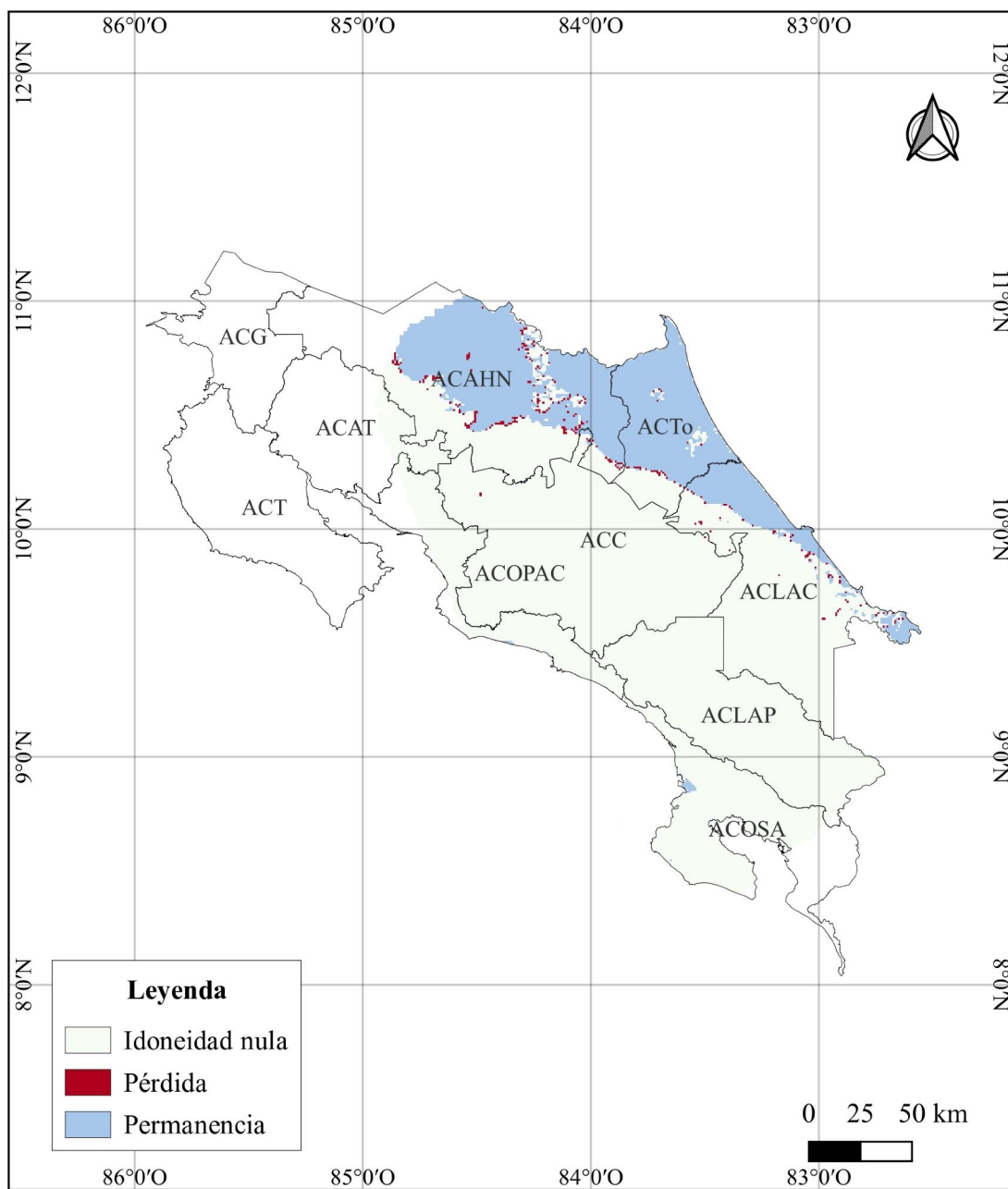


Figura 41. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Dipteryx oleifera* a escenario SSP2 al 2050

Fuente: Elaboración propia

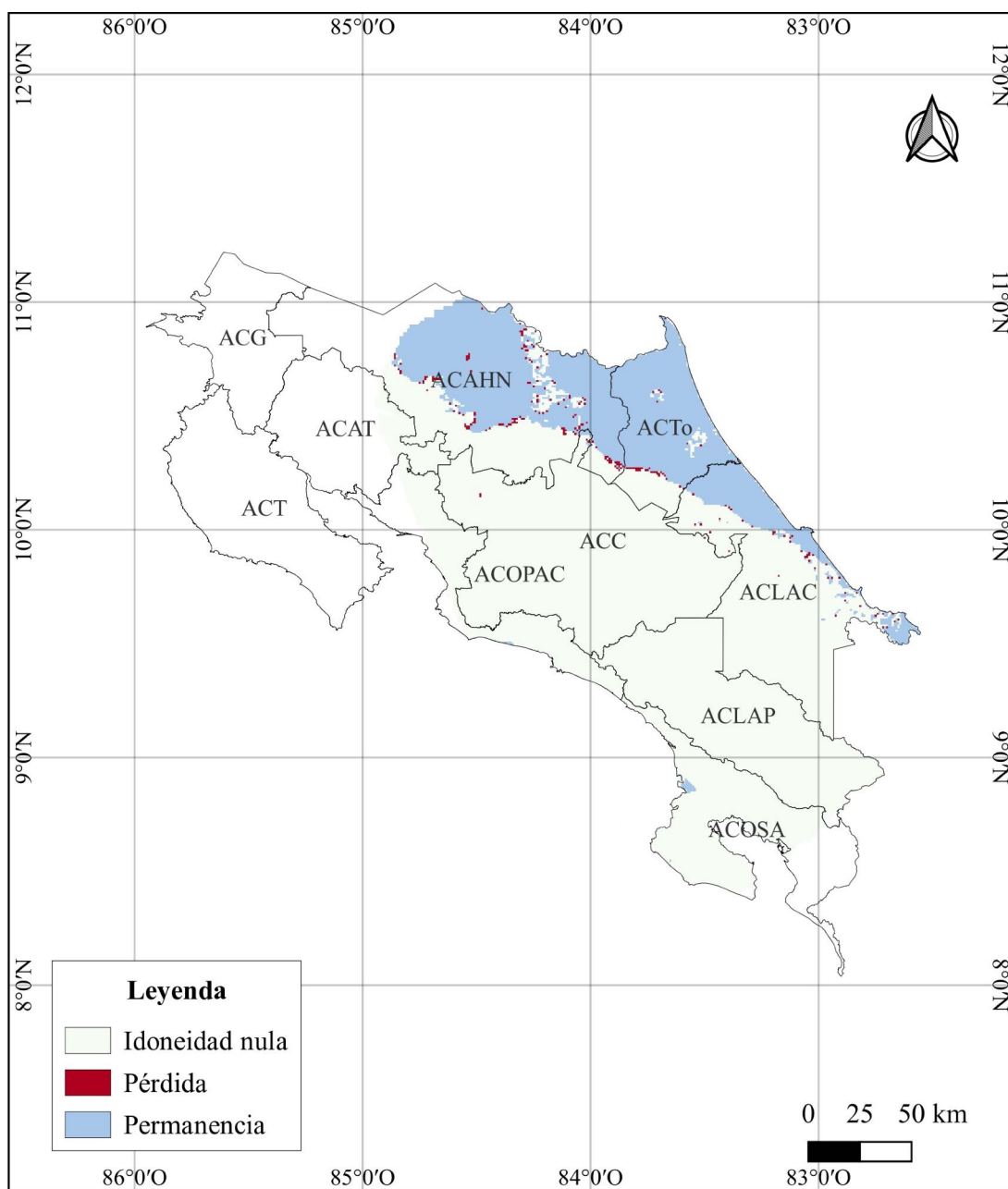


Figura 42. Mapa de cambios de idoneidad de hábitat para *Dipteryx oleifera* a escenario SSP3 al 2050

Fuente: Elaboración propia



Discusión y conclusiones

El valor del AUC (área bajo curva) indica qué proporción de la distribución potencial actual obtenida corresponde a los puntos de presencia (datos observados). Esta evaluación varía entre 0 y 1, donde los valores menores a 0.5 señalan un bajo desempeño del modelo, mientras que valores cercanos a 1 reflejan un alto desempeño (Ceccarelli *et al.* 2020). Los valores de AUC obtenidos a partir de los modelos para las diferentes especies osciló de 0.58 a 0.92, lo que brinda mayor confiabilidad a la información generada y una idea del grado de ocupación en la distribución potencial actual modelada.

Además, los resultados revelan cambios en la extensión y ubicación del área correspondiente a la idoneidad de hábitat para las especies priorizadas en proyectos de restauración. Aunque algunos sectores mantendrán su idoneidad a pesar del cambio climático, se prevén varias pérdidas de área para cada especie. De Souza *et al.* (2017) coinciden con estos resultados al modelar la idoneidad de hábitat de especies agroforestales en Centroamérica y señalar reducciones en áreas de condiciones favorables.

Según lo mencionado por Vergara *et al.* (2014) y Uribe-Botero (2015), las especies endémicas son las más afectadas y vulnerables a las variaciones abióticas que depara el cambio climático. Por esta razón, la probabilidad de cambios (pérdidas y/o ganancias) es menor en especies cuya distribución potencial actual depende de variables edáficas y fisiográficas, lo que sugiere una mayor área de permanencia para estas especies.

Asimismo, las variables cruciales para la distribución de las especies vegetales estudiadas son la precipitación y temperatura. Para todas las especies priorizadas, se observó una reducción de áreas de idoneidad, principalmente atribuible a las variables Bio-12 - precipitación anual (mm) y Bio-17 - precipitación en el trimestre más seco (mm).

En los escenarios de SSP2 y SSP3, las áreas de pérdida se proyectan mayoritariamente para las especies *Vochysia guatemalensis* y *Vochysia ferruginea* que –a su vez– son de las pocas especies cuya distribución actual es amplia, ya que ocupan casi el total del territorio. De igual forma, las variables ambientales más influyentes en la distribución para *V. guatemalensis* han sido Bio-17 - precipitación en el trimestre más seco (mm)

(33,48%), pH del suelo (26,12%) y la pendiente (7,44%) y para *V. ferruginea*, Bio-17 - precipitación en el trimestre más seco (mm) (41,64%), Bio-12 - precipitación anual (mm) (16,22%) y la profundidad del suelo (9,42%), y se tratan de variables que inciden altamente en el desarrollo y crecimiento de estas especies.

La especie para la que se encontró mayor permanencia de áreas idóneas –pese al cambio climático en los escenarios SSP2 y SSP3– fue *Cordia alliodora*, cuya distribución estaría definida principalmente por una de las variables edáficas, el contenido de carbono orgánico. Es importante destacar que esta variable es clave para la presencia de la especie. En este caso, se trató de una variable que se mantiene estática (sin variación ante el cambio climático) en el proceso de modelado. Saber si las variables responsables de la presencia de una especie son cambiantes o estáticas ante el cambio climático brinda una idea de cuán dinámica será la distribución frente a escenarios futuros.

A pesar de las limitaciones del estudio, como la omisión de competidores y restricciones en la dispersión de semillas, la modelación de la idoneidad de hábitat y sus variaciones se evidencia como una herramienta útil para mitigar la incertidumbre en la predicción de los impactos del cambio climático en las especies.

En los mapas de distribución actual y distribución potencial actual se observa una importante superposición en las áreas de distribución de varias especies priorizadas, lo que facilitaría el establecimiento de fuentes semilleras en estas zonas. Esto proporcionaría un valioso recurso vegetal para proyectos de restauración con diversos objetivos. La priorización del establecimiento de fuentes semilleras y plantaciones forestales en las zonas identificadas como zonas de permanencia es fundamental. Se espera que estas áreas mantengan condiciones ambientales, edáficas y topográficas estables frente al cambio climático, y se conviertan así en reservorios de diversidad genética, esenciales para la adaptación.

Es recomendable establecer parcelas permanentes de especies priorizadas en zonas de permanencia, ganancia y pérdida, a fin de cuantificar las diferentes respuestas ecofisiológicas de las especies por los cambios en la distribución por efecto del cambio climático.

Además, la modelación de áreas de idoneidad de hábitat abre nuevas interrogantes que podrían dar origen a futuras investigaciones, tales como los efectos del cambio climático en escenarios más pesimistas y a largo plazo, las variaciones al determinar las zonas de semillas por especie y someterlas a modelaciones en distintos escenarios, así como la validación en campo de los resultados a través de la evaluación de indicadores de fuentes semilleras, características fenotípicas de los árboles semilleros e identificación y sistematización de los árboles plus. Esta investigación plantea otras preguntas que pueden dar lugar a nuevos análisis sobre:

- ¿Qué variaciones se podrían observar si se determinan las zonas de semillas por cada especie y se las somete a modelaciones de cambio climáticos con escenarios más pesimistas, como SSP5 8.5 y con horizontes temporales más largos, es decir, proyectados al 2070 y 2100?
- ¿Cómo sería la validación en campo de los resultados de este trabajo, mediante la evaluación de indicadores de fuentes semilleras, características fenotípicas de los árboles semilleros e identificar y sistematizar los árboles plus?

Finalmente, a fin de asegurar procesos de restauración climáticamente inteligentes –en otras palabras–resistentes al clima, es necesario que los tomadores de decisiones evalúen caso por caso y vean la manera de gestionar las prácticas de restauración de acuerdo con los objetivos o fines de restauración (conservación de fauna, regulación de nutrientes, producción maderera, etc.) y las condiciones ambientales (bioclimáticas, edáficas y fisiográficas), y –además–considerar en la ecuación los rasgos funcionales de las especies. Por ejemplo, en zonas de permanencia, seleccionar árboles semilleros locales para conservación de calidad genética y establecer plantaciones de dichas especies a largo plazo. Mientras, para las especies que muestran pérdidas de áreas de idoneidad o cuando hay certeza de que las poblaciones locales de ciertas especies no pueden adaptarse lo suficientemente rápido, se requiere la migración asistida.



Referencias bibliográficas

- Adjonou, K; Abotsi, KE; Segla, KN; Rabiou, H; Houetchegnon, T; Sourou, KB; Johnson, BN; Ouinsavi, CAN; Kokutse, AD; Mahamane, A; Kokou, K. 2020. Vulnerability of African Rosewood (*Pterocarpus erinaceus*, Fabaceae) natural stands to climate change and implications for silviculture in West Africa (en línea). *Heliyon* 6(6):8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04031>.
- Atkinson, RJ; Thomas, E; Roscioli, F; Cornelius, JP; Zamora-Cristales, R; Franco Chuaire, M; Alcázar, C; Mesén, F; López, H; Ipinza, R; Donoso, PJ. 2021. Seeding resilient restoration: An indicator system for the analysis of tree seed systems. *Diversity* 13(8):367. DOI: <https://doi.org/10.3390/d13080367>.
- Ceccarelli, V; Fremout, T; Thomas, E; Durán Montesinos, P; Arana Olivos, A; Candia Dipaz, C; Villa Zegarra, B; Blas Jaime, D; Ugarte-Guerra, JL. 2020. Efectos del cambio climático en la distribución de 20 especies forestales maderables de la región amazónica del Perú (en línea). Lima. SERFOR-Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. 48 p. Disponible en <https://hdl.handle.net/10568/114602>.
- Cotrina Sánchez, DA. 2020. Modelamiento biogeográfico de especies forestales maderables nativas para la recuperación de bosques degradados en Amazonas, Perú. Disponible en <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/2156>.
- Díaz, S; Demissew, S; Carabias, J; Joly, C; Lonsdale, M; Ash, N; Larigauderie, A; Adhikari, JR; Arico, S; Báldi, A; Bartuska, A. 2015. The IPBES Conceptual Framework—connecting nature and people (en línea). *Current opinion in environmental sustainability* 14:1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>.
- Fick, SE; Hijmans, RJ. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12):4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Fremout, T; Thomas, E; Bocanegra-González, KT; Aguirre-Morales, CA; Morillo-Paz, AT; Atkinson, R; Kettle, C; González-M; Alcázar-Caicedo, C; González, MA; Gil-Tobón, C; Gutiérrez, JP; Gonzalo Moscoso-Higueta, L; López-Lavalle, LAB; de Carvalho, D; Muys, B. 2021. Dynamic seed zones to guide climate-smart seed sourcing for tropical dry forest restoration in Colombia. *Forest Ecology and Management* 490:15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119127>.
- Fremout, T; Thomas, E; Taedoumg, H; Briers, S; Gutiérrez-Miranda, CE; Alcázar-Caicedo, C; Lindau, A; Mounmami Kpoumie, H; Vinceti, B; Kettle, C; Ekué, M. 2022. Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes (en línea). *Journal of Applied Ecology* 59(3):664-679. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14079>.
- Fung, E; Imbach, P; Corrales, L; Vílchez, S; Zamora, N; Argotty, F; Hannah, L; Ramos, Z. 2017. Mapping conservation priorities and connectivity pathways under climate change for tropical ecosystems (en línea). *Climatic Change* 141(1):77-92. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1789-8>.
- Hengl, T; Mendes de Jesus, JS; Macmillan, RA; Batjes, NH; Heuvelink, GBM; Carvalho Ribeiro, ED; Samuel Rosa, A; Kempen, B; Leenaars, JGB; Walsh, MG; Ruipérez González, M. 2014. SoilGrids1km: información global del suelo basada en mapeo automatizado. *PLoS ONE* 9(8):[e105992]. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 95 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H-O. Pörtner, DC. Roberts, M. Tignor, ES. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge, UK, and New York, USA. 3056 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Jalonen, R; Valette, M; Boshier, D; Duminil, J; Thomas, E. 2017. Forest and landscape restoration severely constrained by a lack of attention to the quantity and quality of tree seed: Insights from a global survey. *Conservation Letters* 11(4):e12424. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12424>.
- Lee, MK; Chun, JH; Lee, CB. 2021. Prediction of distribution changes of *Carpinus laxiflora* and *C. tschonoskii* based on climate change scenarios using MaxEnt model (en línea). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 23(1):55-67. DOI: <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2021.23.1.55>.
- Mesén-Sequeira, F; Jiménez-Alvarado, LD. 2022. Guía para el diseño y operación de bancos de semillas y viveros forestales comunitarios.
- Pearson, RG. 2008. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History. Disponible en <http://ncep.amnh.org>.
- Thomas, E; Alcázar, C; Moscoso Higueta, LG; Osorio, LF; Salgado Negret, B; González, M; Parra, M; Bozzano, M; Loo, J; Jalonen, R; Ramírez, W. 2017. The importance of species selection and seed sourcing in forest restoration for enhancing adaptive potential to climate change: Colombian tropical dry forest as a model (en línea). CBD Technical Series. Disponible en <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/90681>.
- Uribe-Botero, E. 2015. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. CEPAL-Unión Europea. Naciones Unidas, Santiago. 77 p. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf?jsessionid=3B938%20A87945D3A9D132330450FA9736F?sequence=1.
- Vergara, W; Ríos, AR; Trapido, P; Malarín, H. 2014. Agricultura y Clima Futuro en América Latina y el Caribe: Impactos sistémicos y posibles respuestas. BID. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. Documento de Debate No. IDP-DP-329. BID, Washington D.C. 15 p. Disponible en https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/agricultura_y_cambio_climatico_idb-dp-329_es.pdf.
- Walck, JL; Hidayati, SN; Dixon, KW; Thompson, K; Poschlod, P. 2011. Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology* 17(6):2145-2161. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>.
- Wan, JZ; Wang, CJ; Yu, FH. 2017. Spatial conservation prioritization for dominant tree species of Chinese forest communities under climate change. *Climatic Change* 144(2):303-316. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2044-7>.



CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



Tel. + (506) 2558-2000



comunica@catie.ac.cr



Sede Central, CATIE
Cartago, Turrialba, 30501
Costa Rica