

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León

Área de Conocimiento de Ciencias y Tecnología



Dirección de Biología

Carrera de Biología

Monografía para optar al título de Licenciado en Biología

Modelado de la distribución del género *Pinus* bajo distintos escenarios del cambio climático para el 2050 en Nicaragua

Autores

Br. Michael Uriel Gutiérrez Bucardo

Br. Abril del Pilar Castillo Suncin

Tutor

MSc. David Alberto Cerda Granados

Asesora

PhD. María Eugenia Cerda Castillo

León, Marzo 06 del 2025

“2025: 46/19, ¡Siempre Más Allá! ¡Avanzamos en la Revolución!”

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios, por darme la sabiduría y el entendimiento para sobrellevar estos años de carrera.

Agradezco a mi familia por el apoyo y motivación a lo largo de estos años. A mi tía María José, mi madre Carolina, mis hermanos Bryan y Juan Carlos, gracias por influir en cada uno de mis procesos.

También quiero darle las gracias a nuestro Tutor MSc. David Alberto Cerda y a nuestra Asesora PhD. María Eugenia Cerda por estar pendiente de nuestras necesidades con la monografía y brindarnos de sus conocimientos para mejorar como futuros profesionales, infinitamente gracias por guiarnos en esta etapa de nuestras vidas y llenarnos de sus conocimientos.

Gracias a algunos de nuestros colegas y amigos por aportar un granito de arena en este proceso, por cada uno de los momentos compartidos e intercambios de conocimientos.

Michael Gutiérrez Bucardo

Primeramente, agradezco a Dios por guiarme en cada paso de este camino académico. Gracias por las bendiciones que he recibido y por la fortaleza que me ha dado en mis momentos más difíciles.

Quiero expresar mis agradecimientos a mis padres. Gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo y la perseverancia. Agradezco a mis tías, quienes han sido mi mayor soporte y guía en mi vida, sus enseñanzas y consejos han sido esenciales para mi formación como persona y profesional.

Un agradecimiento especial a mi tutor y asesora cuya dedicación, paciencia y correcciones ha marcado una diferencia en mi trayectoria académica, gracias por su guía y consejos que llevare siempre en mi memoria como futuro profesional. También agradezco a los docentes que han sido parte de camino por la universidad cuyas enseñanzas, su pasión por la educación y esfuerzos en la investigación me han llegado a inspirar y a verlos como un modelo a seguir.

Un agradecimiento a mis compañeros de carrera, en especial Steven y Jackelin por ser grandes amistades, leales y generosos.

Abril Castillo

Dedicatoria

A mi tía María José, Madre Carolina, a mis hermanos, mis tíos de la ciudad universitaria León.

A todos los científicos que tanto nos encanta el arte de la investigación, eso de hacer lo que nos apasiona por la ciencia, la biodiversidad de nuestro país y el mundo.

Michael Gutiérrez Bucardo

A mi Madre y Padre, este logro es testimonio de su sacrificio, amor y esfuerzo para que no me faltara nada en la vida.

A mis Tías, Xiomara Castillo y Patricia Castillo. Esta monografía es un reflejo del compromiso e inalcanzable esfuerzo por brindarme una excelente educación.

Abril Castillo

En Memoria

En memoria de los seres queridos que hemos perdido.

A mis abuelos, quienes me enseñaron el valor del trabajo duro, la importancia de no rendirme en mis metas y a esforzarme por superarme cada día. A mi Tío Eugenio Castillo por figurar como padre para mí, por enseñarme, con mano dura, el valor de la obediencia, los buenos principios y todo el apoyo que me brindo. Espero poder honrar su memoria.

A mis abuelos por el cariño brindado en el poco tiempo que compartimos juntos, mi abuela Carmen y Guillermina que sé que estaría orgullosa de mí, mi abuelo Juan por ser un hombre guerrero y de grandes principios.

Abril Castillo y Michael Gutiérrez Bucardo

Resumen

Las emisiones de gases de efecto invernadero están causando cambios significativos en el medio ambiente. Se estima que la temperatura global podría aumentar hasta 1.5°C para el año 2040. Los bosques de coníferas, como los de pino, son especialmente vulnerables tanto al cambio climático como a las actividades humanas. Este estudio tiene como objetivo evaluar la dinámica de distribución actual y potencial de especies del género *Pinus* bajo la influencia de tres escenarios de cambio climático SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el año 2050 en Nicaragua utilizando MaxEnt (Máxima Entropía). MaxEnt es un programa que modela la distribución geográfica de las especies, utilizando punto de presencia de especie y las variables bioclimáticas, fundamentada en el principio de máxima entropía. Se utilizaron registros de la presencia de especies y variables bioclimáticas de precipitación y temperatura, además de otras variables como suelo, DEM, radiación UV-B y nubosidad. Se analizaron cuatro especies de pino presentes en Nicaragua: *Pinus maximinoi*, *P. oocarpa*, *P. tecunumanii* y *P. caribaea*. Para *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* se espera reducciones drásticas en su área de distribución bajo los tres escenarios climáticos. Las especies más vulnerables son las de distribución estrecha como *P. maximinoi* que es la más afectada con reducciones promedio de 85% en sus áreas idóneas. Por otra parte, *Pinus caribaea* experimentará un aumento en áreas idóneas del 18% para el escenario SSP2-4.5, 10% en el escenario SSP3-7.0 y por último 21% en el escenario muy alta SSP5-8.5 en relación con el sitio donde está presente la especie en Nicaragua. También se logró identificar las variables climáticas que más inciden en la distribución de las especies, las cuales son en general: DEM, Bio 17, Bio11, Bio10 y Cloud8. En resumen, se logró determinar la distribución actual y potencial de las especies de Pinos en Nicaragua, así como las variables bioclimáticas determinantes para la distribución de cada especie, por lo tanto, estos resultados nos indican posibles reducciones presentes en tres de las cuatro especies en Nicaragua, lo que resalta la necesidad de estrategias de conservación para mitigar los efectos del cambio climático sobre los bosques de pino en la región.

Palabras claves: Bosques de Coníferas, Cambio climático, Distribución, Escenarios climáticos, MaxEnt, Presencia de especies, Variables Bioclimáticas.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, LEÓN
FUNDADA EN 1812

AREA ESPECIFICA DE BIOLOGÍA

CARTA DE AUTORIZACIÓN

DAVID ALBERTO CERDA GRANADOS, Profesor Asistente de la Dirección de Biología del Área de Conocimiento de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua- León (UNAN-León),

CERTIFICA QUE:

La presente monografía titulada «Modelado de la distribución del género *Pinus* ssp. bajo distintos escenarios del cambio climático para el 2050 en Nicaragua» presentado por Br. MICHAEL URIEL GUTIÉRREZ BUCARDO (19-16147-0), Bra. ABRIL DEL PILAR CASTILLO SUNCIN (18-01135-0) para optar al grado de Licenciado en Biología por la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-León, ha sido realizada bajo mi dirección y que hallándose concluida,

AUTORIZO:

Su presentación para que pueda ser juzgada por el tribunal correspondiente.

Dado en la ciudad de León, departamento de León, el 17 de enero de 2025.

David Alberto Cerda Granados, M.Sc.
Profesor Asistente
Dirección de Biología, UNAN-León

TABLA DE CONTENIDO

I.	Introducción	1
II.	Objetivos.....	3
III.	Marco Teórico	4
	3.1 Bosques de <i>Pinus</i> spp.....	4
	3.1.1 Bosques de Pino-Encino.....	4
	3.1.2 Bosque de sabana de pino	4
	3.2 Descripción Botánica y Ecología de las especies del género <i>Pinus</i> en Nicaragua 5	
	3.2.1 <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari.....	6
	3.2.2 <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore.....	6
	3.2.3 <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltld. var. <i>oocarpa</i>	6
	3.2.4 <i>Pinus tecunumanii</i> F. Schwerdtf. ex Eguluz & JP Perry.....	7
	3.3 Cambio climático	7
	3.4 Modelos y Softwares para determinar nicho ecológico y distribución de especies	10
	3.5 MaxEnt o Maximum entropy (Maxima Entropía)	12
	3.5.1 Evaluación de los modelos MDEs	13
	3.6 Escenarios de Cambio Climático.....	13
	3.7 Variables bioclimáticas	14
	3.8 Correlación de Spearman	19
IV.	Diseño metodológico	21
	4.1 Tipo de estudio	21
	4.2 Área de estudio	21
	4.3 Población de estudio	22
	4.4 Muestra	22
	4.5. Obtención de datos	22
	4.5.1 Fuente de datos climáticos	22
	4.5.2 Fuente de datos presencia de especies.....	24
	4.6 Preparación de Datos.....	24
	4.6.1 Recorte de extensión geográfica.....	24
	4.6.2 Limpieza de datos	25
	4.6.3 Selección de las variables en el modelado por especie.....	25
	4.7 Análisis de Datos y Modelado	25

4.7.1 Modelado en MaxEnt	25
4.7.2 Validación del modelo	26
4.7.3 Mapas de Idoneidad.....	26
4.7.4 Elaboración de Mapas	27
V. Resultados y Discusión.....	28
5.1 Datos de presencia para el género <i>Pinus</i>	28
5.2 Contribución de las variables en el modelo	29
5.2.1 Prueba de Jackknife.....	31
5.3 Validación del modelo.....	37
5.4 Modelación bajo escenarios de Cambio Climático	38
5.5 Distribución espacio-temporal de especies de <i>Pinus spp.</i>	53
VI. Conclusiones	56
VII. Recomendaciones	57
VIII. Referencias bibliográficas.....	58
IX. Anexos.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1 Número total de registros, número de registros luego de la aplicación del buffer, Variables utilizadas en el modelo.	29
Tabla 2 Variables climáticas que más contribuyeron en los modelos.....	31
Tabla 3 Valores del área bajo la curva ROC (AUC) para cada escenario.	38
Tabla 4 Cambios en la Distribución de <i>P. maximinoi</i> y <i>P. oocarpa</i>	44
Tabla 5 Cambios en la Distribución de <i>P. tecunumanii</i> y <i>P. caribaea</i>	51
Tabla 6 Dinámicas en el cambio de las áreas de distribución de las especies del género <i>Pinus</i> bajo tres escenarios de cambio climático al 2050. El porcentaje de proporción de áreas se encuentran redondeado, de manera que, valores decimales mayores a .5 fueron redondeados al número superior.	52
Tabla 7 Variables Bioclimáticas en WorldClim.....	73
Tabla 8 Variables Climáticas de Suelo, DEM, Radiación UV-B y nubosidad.....	74
Tabla 9 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para <i>Pinus maximinoi</i>	79
Tabla 10 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para <i>Pinus oocarpa</i>	80
Tabla 11 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para <i>Pinus tecunumanii</i>	81
Tabla 12 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para <i>Pinus caribaea</i>	82
Tabla 13 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de <i>P. maximinoi</i>	91
Tabla 14 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de <i>P. caribaea</i>	91
Tabla 15 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de <i>P. oocarpa</i>	92
Tabla 16 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de <i>P. tecunumanii</i>	93

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa del Área de Estudio, Nicaragua.	21
Figura 2 Distribución de los registros de 4 especies del género <i>Pinus</i> analizadas en Nicaragua	28
Figura 3 Prueba de Jackknife con las variables usadas en el modelo de <i>Pinus maximinoi</i>	32
Figura 4 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de <i>Pinus oocarpa</i>	33
Figura 5 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de <i>Pinus tecunumanii</i>	34
Figura 6 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de <i>Pinus caribaea</i>	35
Figura 7 Distribución de <i>Pinus maximinoi</i> bajo distintos escenarios de Cambio Climático al 2050.....	40
Figura 8 Distribución de <i>Pinus oocarpa</i> bajo escenarios de cambio climático al 2050 .	42
Figura 9 Distribución de <i>Pinus tecunumanii</i> bajo escenarios de cambio climático para el 2050	46
Figura 10 Distribución de <i>Pinus caribaea</i> bajo escenarios de cambio climático al 2050	48
Figura 11 Efecto del Cambio Climático en los bosques de Nicaragua bajo tres escenarios: SSP2- 4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5; A. Puntos de presencia de las especies de <i>Pinus</i> en Nicaragua. B. Distribución actual de las especies. C. Distribución de las especies para el año 2050 con SSP2-4.5. D. Distribución para el año 2050 con SSP3-7.0. E. Distribución para el año 2050 con SSP5-8.5.....	54
Figura 12 Puntos de Ocurrencia y distribución actual de <i>Pinus maximinoi</i>	75
Figura 13 Punto de Ocurrencia y distribución actual de <i>Pinus oocarpa</i>	76
Figura 14 Puntos de Ocurrencia y Distribución Actual de <i>Pinus tecunumanii</i>	77
Figura 15 Puntos de Ocurrencia y Distribución Actual de <i>Pinus caribaea</i>	78
Figura 16 Valores de AUC para <i>P. maximinoi</i> Actual.....	83
Figura 17 Valores de AUC para <i>P. maximinoi</i> en el escenario SSP2-4.5.....	83
Figura 18 Valores de AUC para <i>P. maximinoi</i> en el escenario SSP3-7.0.....	84

Figura 19 Valores de AUC para <i>P. maximinoi</i> en el escenario SSP5-8.5.....	84
Figura 21 Valores de AUC para <i>P. caribaea</i> en el escenario SSP2-4.5	85
Figura 20 Valores de AUC para <i>P. caribaea</i> Actual.....	85
Figura 22 Valores de AUC para <i>P. caribaea</i> en el escenario SSP3-7.0	86
Figura 23 Valores de AUC para <i>P. caribaea</i> en el escenario SSP5-8.5	86
Figura 24 Valores AUC para <i>Pinus oocarpa</i> en el escenario SSP2-4.5.....	87
Figura 25 Valores de AUC para <i>P. oocarpa</i> Actual.....	87
Figura 26 Valores AUC para <i>Pinus oocarpa</i> en el escenario SSP5-8.5.....	88
Figura 27 Valores AUC para <i>Pinus oocarpa</i> en el escenario SSP3-7.0.....	88
Figura 28 Valores de AUC para <i>P. tecunumanii</i> Actual.	89
Figura 29 Valores de AUC para <i>P. tecunumanii</i> en el escenario SSP2-4.5.....	89
Figura 30 Valores de AUC para <i>P. tecunumanii</i> en el escenario SSP3-7.0.....	90
Figura 31 Valores de AUC para <i>P. tecunumanii</i> en el escenario SSP5-8.5.....	90

Abreviatura	Significado
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AUC	Area Under Curve
BIOCLIM	Bioclimatic Prediction System (Sistema de Predicción Bioclimática)
CLIMEX	Climate Extrapolation (Extrapolación climática)
CMCC	Euro-Mediterranean Center on Climate Change (Centro Euro-Mediterráneo sobre Cambio Climático)
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project Phase (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados)
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (Fase 5 del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados)
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (Fase 6 del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados)
DEM	Modelo de Elevación Digital
DOMAIN	Nombre de un modelo predictivo
GARP	Global Atmospheric Research Programme (Programa Global de Investigación Atmosférica)
GCM	General Circulation Models (Modelos Climáticos de Circulación General)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INAFOR	Instituto Nacional Forestal
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)
LUCC	Land Use and Land Cover Change
MAGFOR	Ministerio Agropecuario y Forestal
MARENA	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
MaxEnt	Máxima Entropía
MDE	Modelo de Distribución de Especies
MNE	Modelo de Nicho Ecológico
ONDL	Oficina Nacional de Designación de Líderes

OSINFOR	Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre
POSAF	Plan Operativo de Seguridad y Acción Forestal
RCP	Representative Concentration Pathways (Trayectorias Representativas de Concentración)
ROC	Curva Operada por el Receptor
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Rutas Socioeconómicas Compartidas)
UV-B	Radiación Ultravioleta B
WCRP	World Climate Research Programme (Programa Mundial de Investigaciones Climáticas)

I. Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero están provocando cambios en el medio ambiente, entre ellos aumento de la temperatura global y la aparición de fenómenos meteorológicos extremos. Estos cambios están afectando la distribución de las especies vegetales y animales. Los pronósticos son alarmantes, debido a que, si esta tendencia continúa, la temperatura podría aumentar hasta 1.5°C para el año 2040 (del-Val y Sáenz-Romero, 2017).

En las últimas décadas, el desarrollo e implementación de herramientas para evaluar cambios en la distribución de especies en determinado tiempo y espacio ha aumentado. Recientemente se han evaluado el efecto del cambio climático en muchas especies, como mamíferos, aves, insectos, así como diversos tipos de vegetación utilizando los Modelos de Nicho Ecológico (MNE) o los Modelos de distribución de especie (MDE) (Ortega, 2021).

Los MNE y MDE son métodos que permiten estimar y analizar los cambios en la distribución de las especies (Ortega, 2021). La distribución de especies es el insumo básico para desarrollar planes de conservación y manejo, asimismo son la base de estudios avanzados de ecología, biogeografía, evolución y taxonomía (Reguerin López, 2012).

Los bosques de coníferas son uno de los tipos de vegetación que están en mayor riesgo a nivel global. Tanto por el cambio climático como por actividades antropogénicas, los cuales podemos mencionar: la extracción de madera o musgo, cambios de uso de suelo para ganadería extensiva, sistemas de cultivos en zonas de laderas y los incendios forestales, que son cada vez más frecuentes en los períodos de sequías (Ortega, 2021).

Según un informe del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales/Programa Socio ambiental de Desarrollo Forestal (MARENA/POSAF II, 2006) en Nicaragua, se han identificado cuatro especies del género *Pinus*, *Pinus oocarpa* (ocote), *Pinus maximinoii* (pinabete), *Pinus tecunumanii* (pino rojo) y *Pinus caribaea* (caribeño), estos bosques de pino tienen un área de 514,879 ha, que equivale al 9.0% del total del bosque en el país.

En Nicaragua se ha perdido alrededor de 6,000 ha de bosque de pino durante el periodo del 2011 al 2016 (Rezaye Álvarez, 2016). La mayoría de los bosques a nivel mundial muestran signos de debilitamiento, reducción, fragmentación y por último su extinción (Tórrez, 2017).

Estudiar el impacto del cambio climático en especies vegetales es crucial para comprender cómo son afectadas y qué estrategias se pueden implementar para mitigar estos efectos. Al considerar la importancia ambiental y socioeconómico de estos bosques de Pinaceae en Nicaragua es necesario implementar mejores métodos de conservación y manejo forestal en función de sus condiciones biológicas y distribución espacial.

Lo que nos lleva a plantearnos la siguiente pregunta de investigación: ¿El impacto del cambio climático afectará la distribución de los bosques de Pino en Nicaragua? Por esta razón, el presente estudio pretende evaluar los efectos del cambio climático en los bosques de pino de Nicaragua, su rango y extensión geográfica de distribución actual usando modelos de nicho ecológico y escenarios climáticos para el año 2050.

Esta investigación es fundamental para entidades ambientales y futuros investigadores, pues ofrece datos sobre la distribución potencial de los bosques de *Pinus* spp. en Nicaragua para 2050. Al identificar áreas vulnerables y prever cambios en su distribución geográfica, se pueden realizar estrategias para el manejo sostenible de estos bosques, asegurando la conservación de las especies de *Pinus* spp. en regiones menos afectadas por el cambio climático.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la dinámica de distribución actual y potencial de especies del género *Pinus* en Nicaragua bajo la influencia de tres escenarios de cambio climático utilizando el software MaxEnt para el año 2050.

2.2 Objetivos específicos

1. Definir la distribución actual de las especies del género *Pinus* en Nicaragua.
2. Identificar las variables ambientales que más inciden en la dinámica de distribución bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.
3. Determinar áreas geográficas vulnerables e idóneas en la distribución de especies de *Pinus* spp. para año 2050.

III. Marco Teórico

3.1 Bosques de *Pinus* spp.

3.1.1 Bosques de Pino-Encino

Los bosques de pino-encino se destacan por la presencia predominante de dos géneros, *Pinus* (familia Pinaceae) y *Quercus* (familia Fagaceae), en proporciones similares, cohabitando con otras especies. Su distribución en el continente americano abarca desde el suroeste de Estados Unidos hasta Nicaragua. La mayoría de las especies del género *Pinus* están adaptadas al fuego, lo que facilita una regeneración natural y exitosa de las unidades de vegetación de pino-encino. Por otro lado, el género *Quercus* posee la capacidad de rebrote y regeneración después de los disturbios naturales. En conjunto, estas especies tienen una capacidad notable para recuperarse de los disturbios naturales, siempre y cuando no superen el umbral ecológico del ecosistema en términos de intensidad y frecuencia (Mora-Donjuán y Alanís-Rodríguez, 2016).

El bosque de pinos en las tierras altas de Nicaragua se encuentra principalmente en la Zona Norcentral, desde el Departamento de Matagalpa hacia el norte, aunque hay pequeños rodales en los volcanes del norte de la Zona Pacífica (entre volcán Casita-San Cristóbal). Los rodales de pinos (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii*) crecen en suelos ácidos bien drenados, originados de granito y esquistos, y son menos comunes en suelos volcánicos. La precipitación varía entre 1,000 y 2,500 mm, y estos bosques suelen estar a más de 650 m de altitud. Esta vegetación está fuertemente relacionada con las actividades humanas, especialmente el uso del fuego, y generalmente se considera una etapa de sucesión que podría volver a convertirse en bosque macrofilo en ausencia de fuego. Se encuentran en laderas altas y medias, pero a menudo son sustituidos por bosques siempreverdes en cumbres y valles. Los árboles más comunes en estos bosques son especies de *Quercus* (roble-encino), junto con otros como *Arbutus xalapensis* (guayavillo) y *Vachellia pennatula* (carbón). La vegetación herbácea es diversa y abundante, dominada por Poaceae, Cyperaceae y Fabaceae (Stevens, 1995).

3.1.2 Bosque de sabana de pino

La sabana de pino se distribuye en parches dispersos, frecuentemente amplios, a lo largo de la Costa Caribe nicaragüense, desde la Laguna de Perlas al sur hasta Honduras al

norte. Estos parches están atravesados por bosques de galería y se mezclan de manera irregular con bosques húmedos siempreverdes. La precipitación oscila entre los 2,500 y 3,500 mm, y los suelos son extremadamente pobres, variando principalmente entre arena y grava. Las quemadas son comunes y juegan un papel fundamental en la ecología del lugar (Stevens, 1995).

El árbol predominante es el *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (pino), que forma áreas densas, aunque generalmente están dispersos y en algunas zonas con suelos más pobres y frecuentemente inundado. Los árboles y arbustos lechosos más frecuentes son *Byrsonima crassifolia* (nancite) y *Curatella americana* (hojachigüe), que suelen crecer como arbustos bajos. Las áreas abiertas en los suelos más pobres están dominadas por plantas de la familia Cyperaceae, como los géneros *Bulbostylis*, *Fimbristylis*, *Rhynchospora* y *Scleria*. Estas áreas están rodeadas por un cinturón de suelos más drenados y arenosos, donde predominan los pinos y plantas herbáceas, especialmente de la familia Poaceae. En los márgenes de este cinturón se encuentra una zona de transición hacia un bosque siempreverde, dominada por arbustos de Rubiaceae y Melastomataceae. En el interior de las grandes extensiones de sabana, es común encontrar islas de bosques siempreverdes con las mismas zonas de transición (Stevens, 1995).

3.2 Descripción Botánica y Ecología de las especies del género *Pinus* en Nicaragua

La familia Pinaceae son árboles perennes, típicamente de forma piramidal. Las hojas son lineales, dispuestas en espiral y carecen de pecíolo. Los conos masculinos (estróbilos microsporangios) tienen microsporófilos organizados en espiral, con simetría bilateral, y contienen dos microsporangios situados en la cara inferior de cada esporófilo. Los conos femeninos maduros leñosos con brácteas fusionadas, porción expuesta de la escama (apófisis) engrosada, y en la cara superior de cada escama se encuentran dos óvulos. Las pináceas son una familia con 11 géneros y unas 220-230 especies, restringidas al hemisferio norte. En Nicaragua, solo el género *Pinus* se encuentra naturalmente presente y cuenta con 4 especies (Styles, 2009); dentro de esta familia se encuentran las siguientes especies en el país:

3.2.1 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari

Los árboles de esta especie alcanzan alturas de 25 a 35 m, raramente superando los 40 m y con un diámetro que oscila entre 60 y 100 cm. Tienen una corona cónica e irregular. La corteza es áspera, con fisuras, de color grisáceo café. El follaje es rígido y erguido, de color verde pálido, con agujas generalmente dispuestas en fascículos de tres, a veces cuatro o cinco en poblaciones del interior, con longitudes de 12 a 28 cm (Styles, 2009).

Esta especie es la más común en Nicaragua. Se encuentra en las sábanas de pinos de Nueva Segovia, Matagalpa y Bluefields, a altitudes de hasta 800 m. Los conos maduran entre mayo y julio. Su distribución va desde Quintana Roo, México hasta Nicaragua, marcando el límite sur de los pinos americanos (Styles, 2009).

3.2.2 *Pinus maximinoi* H.E. Moore

Los árboles pueden alcanzar alturas de hasta 35 m, a veces incluso llegando a 50 m y tronco con un diámetro que varía entre 40 y 90 cm. La corona es muy densa y tiene forma de domo, compuesta por ramas gruesas y rectas dispuestas en horizontal y en verticilos. La corteza joven es delgada, lisa y de color grisáceo, pero con el tiempo se quiebra en placas alargadas y desarrolla fisuras de tono café rojizo. El follaje es denso y notoriamente péndulo, con un color azul-verde opaco o verde-grisáceo (Styles, 2009).

Esta especie es poco común y se encuentra en las laderas altas de la Sierra de Dipilto, en Nueva Segovia, a altitudes de 1000 a 1600 m. Los conos maduran entre marzo y mayo. Su distribución va de Jalisco, México, a Nicaragua. Crece en suelos volcánicos bien drenados, con pH de 5.7, y prefiere suelos húmedos en valles con precipitación anual de 1200 a 1400 mm (Styles, 2009).

3.2.3 *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa*

Los árboles pueden alcanzar alturas de hasta 30-35 m y tronco con un diámetro de entre 40 y 70 cm. La corona es cónica e irregular en los árboles de edad avanzada, con ramas que cuelgan más o menos. La corteza es áspera, de color café oscuro o negruzca, con fisuras profundas y se despega en placas gruesas, alargadas e irregulares, con un tono rojo-anaranjado en las fisuras. El follaje es áspero, grueso y de color verde oscuro (Styles, 2009).

Los bosques de pinos son dispersos y abiertos, con un sotobosque estacional. Están degradados por la explotación y los incendios, especialmente en la zona norcentral, y se ubican entre los 700 y 1300 m. Los conos maduran entre enero y marzo. Su distribución va de México a Nicaragua. Crecen en sitios secos con precipitación anual de 800-1200 mm, sobre suelos poco húmidos o roca pura, con pH de 5.5 a 6 y buen drenaje (Styles, 2009).

3.2.4 *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguluz & JP Perry

Los árboles alcanzan alturas de entre 30 y 40 (a veces hasta 45) m, su tronco cuenta con un diámetro que varía entre 50 y 90 (a veces hasta 110) cm. La corona es clara, con algunas ramas delgadas que pueden ascender o extenderse lateralmente. Las ramas jóvenes presentan brotes pruinosos, y el fuste puede mostrar engrosamientos nodales en ocasiones. La corteza es áspera y fisurada en la base del tronco, pero más lisa y delgada hacia arriba, de color grisáceo, y se desprende en escamas, placas o tiras papiráceas, dejando manchas de color rojizo-anaranjado debajo. El follaje es delgado, con una disposición patente o péndula, verde claro (Styles, 2009).

Esta especie es común en valles y cañones de la zona norcentral, a altitudes de 650 a 1500 m. Los conos maduran entre enero y febrero. Se distribuye desde Chiapas y Oaxaca, México, hasta Nicaragua. Prefiere suelos ácidos y arenosos, derivados de rocas basálticas o andesitas, con buen drenaje y precipitación anual de 1400 mm. Forma pequeños bosques puros o mezclados con *P. oocarpa* var. *oocarpa*, y a mayores altitudes se mezcla con *P. maximinoi* y bosques de hoja ancha. A menores altitudes, hasta 700 m, puede coexistir con *P. caribaea* var. *hondurensis* (Styles, 2009).

3.3 Cambio climático

El cambio climático es un desafío mundial que ha sido abordado por expertos de todo el planeta, especialmente por los especialistas del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Como expresa las Naciones Unidas, Cepal (2024), el cambio climático es la alteración del clima global de la Tierra, ocasionada tanto por factores naturales como, principalmente, por la actividad humana, que incluye la quema de combustibles fósiles, la deforestación y diversas prácticas industriales, agrícolas y de transporte, entre otras, resultando en la retención del calor solar en la atmósfera.

La deforestación de los bosques para urbanizar áreas contribuye al calentamiento global, priorizando los intereses económicos sobre la protección y conservación del medio ambiente así lo afirma el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales y Oficina Nacional de Designación de Líderes (MARENA-ONDL, 2008 citado por Barahona Mejia et al., 2022).

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) ha advertido que para el año 2100, el aumento de la temperatura podría ser el más grave registrado, con un posible incremento de entre 1.8 y 4°C, y hasta 6.4°C en el peor de los casos (Barahona Mejia et al., 2022). El IPCC estima que, debido a la deforestación de los bosques tropicales en el siglo pasado, las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzaron 1.6 billones de toneladas de carbono por año, lo que representa el 20% de las emisiones anuales totales a nivel mundial, contribuyendo al calentamiento global y, por lo tanto, al cambio climático (Cunningham Kain et al., 2010).

Por tal motivo, el principal factor que impulsa el forzamiento radiativo del clima durante la era industrial es el incremento en la concentración atmosférica de diversos gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero de larga vida (GEILV), como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), son químicamente estables y pueden permanecer en la atmósfera durante períodos que van desde varias décadas hasta siglos o incluso más. Por otra parte, los gases de vida corta, como el dióxido de azufre y el monóxido de carbono, son químicamente reactivos y suelen ser eliminados de la atmósfera a través de procesos naturales de oxidación, deposición en la superficie o precipitaciones (IPCC, 2021)

El cambio climático puede impactar a las especies silvestres, por lo que es fundamental entender cómo el clima influye en su distribución (Hernández Quiroz y Badano, 2017).

Nicaragua, señalan Barahona Mejia et al. (2022) que es una de las regiones más impactadas por el cambio climático. En el país, se estima que el aumento de la temperatura oscilará entre 0.2°C y 1.6°C, valores que se encuentran dentro de los rangos de calentamiento previstos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para la región del Pacífico.

Las precipitaciones en Nicaragua varían de menos de 800 mm en las zonas más secas a 5000 mm y más en la zona más húmeda, así lo menciona el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2022). Por otra parte, los modelos de predicción señalan que el fenómeno de La Niña probablemente continuará hasta marzo, con un 50% de probabilidad. Para abril, existe un 65% de posibilidad de que ocurra una transición hacia condiciones neutras. En cuanto a su intensidad, los datos indican que se trata de un evento débil, con una anomalía térmica de -0.6°C (INETER, 2025).

De acuerdo Betanco Ponce y Zúniga González (2016), en la región del Pacífico de Nicaragua, las temperaturas han alcanzado entre 37°C y 38°C , esta es una medida que se ha desplazado de su consideración como un problema de sostenibilidad global, por su incidencia en los ámbitos ambientales, sociales y económicos.

En Mesoamérica, países como Nicaragua no se consideran grandes contribuyentes al cambio climático, ya que sus emisiones no son estadísticamente significativas. Sin embargo, Nicaragua es altamente vulnerable y enfrenta riesgos para su biodiversidad y recursos naturales, cuyos efectos podrían ser irreversibles a largo plazo, así menciona El Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR, 2013).

Se prevé que el cambio climático influya en el funcionamiento, la estructura y la distribución de los ecosistemas de bosques de pino-encino, así como en sus especies constituyentes y recursos genéticos (Serrada et al., 2011).

Para el año 2090, solo el 47% de la superficie ocupada actualmente por el hábitat climático del bosque de pino-encino se mantendrá en las mismas áreas (Sáenz, 2015). Esto significa que el 53% del hábitat climático se ubicará en lugares diferentes a los actuales, generalmente en áreas de mayor altitud, que hoy en día son más adecuadas para bosques de coníferas más fríos. Por lo tanto, no solo es relevante la magnitud del cambio en el área del hábitat climático adecuado para un bioma, sino también su ubicación, ya que esto implica que las poblaciones de especies vegetales deberán desplazarse hacia los nuevos sitios climáticamente favorables (Sáenz, 2015).

3.4 Modelos y Softwares para determinar nicho ecológico y distribución de especies

El modelado del nicho ecológico (MNE) es una herramienta que nos permite examinar los factores ecológicos que afectan a diversas poblaciones de una especie en distintos grados y maneras. Esta información, analizada mediante varios tipos de algoritmos, nos permite proyectar la distribución geográfica potencial de la especie, así lo afirma El Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre (OSINFOR, 2013).

El objetivo del modelado del nicho ecológico; así como, del modelado de la distribución de especies y del hábitat, es identificar los lugares adecuados para la supervivencia de las poblaciones de una especie mediante la determinación de sus necesidades ambientales (Soberón y Nakamura, 2009).

El modelamiento del nicho ecológico es un tipo de modelo de distribución de especies (MDS), y estos son herramientas fundamentales para predecir la distribución de las especies en función del clima. Por ejemplo, los MDS indican que las especies de árboles podrían verse fuertemente afectadas por el calentamiento global, tanto a escala continental como regional, lo que tendría graves consecuencias para la preservación del hábitat y el mantenimiento de los servicios esenciales de los ecosistemas (Benito-Garzón et al., 2011).

El modelado de la distribución potencial y actual de las especies ha emergido como un campo de investigación dinámico, que generalmente se fundamenta en el concepto de nicho ecológico y se apoya en el uso de software especializado, uno de estos softwares y es el que se utiliza para esta investigación es MaxEnt (Leal-Nares et al., 2012).

Según OSINFOR (2013), desde los años ochenta, los australianos iniciaron la modelación "bioclimática" para investigaciones entomológicas con Climex. Posteriormente, crearon la base de datos Bioclim, DOMAIN y más tarde GARP. Estos modelos matemáticos que son algunos de muchos se describen de la siguiente manera:

Climex, este software es una herramienta diseñada para comparar diferentes ubicaciones y periodos de tiempo, permitiendo la generación de mapas con condiciones climáticas promedio (Ribeiro Barboza, 2020).

Bioclim ha sido ampliamente utilizado para predecir la distribución de diferentes grupos biológicos (Sánchez-Cordero et al., 2001) ya que es un modelo bioclimático empleado para anticipar la distribución potencial de especies según las variables climáticas.

DOMAIN según la recopilación de su concepto en el trabajo de Jayat y Pacheco (2006) este es un modelo de predicción bioclimática utilizado para determinar áreas de distribución fuera del rango conocido de una especie, especialmente cuando se tienen pocos datos sobre las ausencias.

GARP (*Genetic Algorithm for Rule-set Prediction*) es una metodología basada en inteligencia artificial que utiliza un algoritmo genético para modelar el nicho ecológico de las especies y su distribución geográfica (Monterrubio-Rico et al., 2007).

General Circulation Model (GCM): Los Modelos de Circulación Global (GCM) son representaciones a gran escala de la atmósfera y sus procesos. Un GCM simula, con cierto grado de precisión, los flujos y almacenamientos de masa y energía que se producen en la atmósfera, utilizando una unidad de análisis conocida comúnmente como "célula". Estas células son objetos tridimensionales en los que se aplican diversas ecuaciones a través de unidades de computación de alto rendimiento (Ramírez-Villegas y Jarvis, 2010).

Para facilitar la comparación de modelos climáticos acoplados a nivel global en un marco unificado, el Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP) lanzó el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP). Los modelos climáticos globales (GCMs) del CMIP se utilizan comúnmente para simular el clima histórico y proyectar el clima futuro bajo diferentes escenarios de emisiones. A pesar de las mejoras en CMIP6, que incluyen procesos físicos refinados y una mayor resolución espacial, persisten sesgos sistemáticos, especialmente en regiones de gran altitud con topografía compleja y escasos datos climáticos observados (Song et al., 2024).

3.5 MaxEnt o Maximum entropy (Maxima Entropía)

Es uno de los métodos de aprendizaje automático y versátil con una formulación matemática simple y precisa para la creación de modelos predictivos para distribución geográfica de especies (Phillips et al., 2006). Se ha utilizado para diversos fines, como modelar la distribución de especies en diferentes escalas temporales y espaciales, modelar nichos ecológicos con datos limitados, estudiar la filogeografía, analizar especies endémicas y amenazadas, y evaluar los efectos del cambio climático, entre otros (Abdelaal et al. 2019 citado por Rivera et al., 2021).

Aunque hay muchos modelos similares, MaxEnt tiene dos ventajas principales sobre los demás. Primero, solo requiere datos de presencia, a diferencia de otros modelos que necesitan datos de presencia y ausencia. Segundo, ofrece un rendimiento superior a comparación con otros 16 métodos similares, sobre todo cuando hay poca muestra (Austin & Van Niel 2010 citado por Rivera et al., 2021).

Los modelos que estiman el nicho ecológico de una especie se fundamentan en las variables climáticas de lugares donde se conocen los puntos de presencia. Para crear estos modelos, se consideran varios supuestos ecológicos respecto a las variables ambientales: en primer lugar, debe haber una relación temporal entre los lugares donde se encuentra la especie y las variables ambientales; en segundo lugar, las variables deben influir en la distribución de las especies a una escala relevante, definida por la extensión geográfica y el tamaño (Peterson et al., 1999).

En general, estos modelos de nicho ecológico analizan las relaciones entre datos de presencia conocida y variables ambientales que influyen en las distribuciones, lo que permite extender el área de distribución a regiones geográficas no muestreadas. Además, se han empleado para evaluar hipótesis biogeográficas y para identificar áreas prioritarias para la conservación (Delgado Cueva, 2011 citado por Treminio y Tinoco, 2014)

Por otra parte, para la validación del modelado de nicho ecológico en MaxEnt se recomienda la prueba de Jackknife para medir los efectos de cada variable en el modelo e identificar puntos atípicos para un conjunto de datos con una distribución normal de valores, como aquellos de muchas observaciones para cada taxón y también se

recomienda la prueba de AUC (*Area Under Curve*) y ROC (*Receiver Operating Characteristic*) que es el área bajo la curva (Scheldeman y Zonneveld, 2011).

3.5.1 Evaluación de los modelos MDEs

Los modelos de distribución de especies (MDEs) se emplean de manera extensiva para predecir cómo reaccionarán las especies ante el cambio climático mediante simulaciones del clima futuro. Por lo tanto, una simulación climática precisa es fundamental para modelar los cambios en el rango de distribución de las especies en el futuro (Song et al., 2024).

Para la evaluación de MDE se utiliza Índice AUC (*Area Under Curve*). Primero se debe de conocer los siguientes dos índices: **Sensitividad** = $a/(a + c)$, **Especificidad** = $d/(b + d)$. La sensibilidad es la proporción de presencias correctamente predichas y su alto valor indica un bajo error de omisión. También la especificidad es la proporción de ausencias correctamente predichas y su alto valor indica un bajo error de comisión (Reguerin López, 2012).

El estadístico AUC, es el área bajo la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), en esta curva el eje de las abscisas representa la tasa de presencias incorrectamente clasificadas (1-especificidad) y el de las ordenadas la tasa de presencias correctamente clasificadas (0-sensibilidad).

La AUC es la integral definida por esta curva al variar los umbrales de corte. El estadístico AUC toma valores entre 0 y 1, donde los valores menores a 0.7 indica la calidad del modelo pobre, 0.7-0.8 calidad del modelo “Bueno”, 0.8-0.9 “muy bueno” y valores mayores a 0.9 “excelente” en la calidad del modelo (Reguerin López, 2012).

3.6 Escenarios de Cambio Climático

El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. impulsados por diferentes supuestos socioeconómicos, los llamados “Senderos Socioeconómicos Compartidos” (SSP, por sus siglas en inglés). Estos escenarios se denominan SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (Harrison y Hauspadre, 2019).

Los resultados iniciales de aproximadamente 40 modelos del CMIP6, ya es evidente que varios de ellos muestran una sensibilidad climática notablemente mayor que los modelos CMIP5. Esta mayor sensibilidad constituye a las proyecciones de un mayor calentamiento este siglo (0.4°C más cálido que los escenarios similares ejecutados en el CMIP5), aunque estas proyecciones pueden cambiar a medida que salgan nuevos modelos disponibles (Harrison y Hauspadre, 2019).

Escenarios Shared Socioeconomic Pathway (SSP)

Según la IPCC (2021) el CMIP6 y la IPCC ha añadido 5 nuevos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

- Escenario SSP1-1.9: Es el escenario de emisiones de GEI muy bajas, es sumamente improbable que se supere un calentamiento global de 2°C
- El escenario SSP1-2.6: Generalmente limitan el calentamiento a menos de 2°C y es improbable que se supere dicho calentamiento.
- Escenario SSP2-4.5: Limita el calentamiento alrededor de 3°C para 2100. También el SSP2-4.5 muestra un punto de partida más alto y una disminución ligeramente más lenta que el RCP4.5, aunque las disminuciones de las emisiones de CO₂ en el SSP2-4.5 también juegan un papel importante.
- El escenario SSP3-7.0: Se sitúa justo en el medio del rango de los resultados de referencia. Se utiliza para modelar como podría calentarse el mundo que no implemente ninguna política ambiental.
- Por último, el SSP5-8.5: Tiene emisiones de CO₂ sustancialmente más altas que el con reducciones correspondientemente mayores en las emisiones distintas del CO₂.

3.7 Variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas derivan de los valores mensuales de precipitación y temperatura para generar variables con mayor significado biológico. Estas se utilizan a menudo en modelados de distribución de especies y técnicas de modelado ecológico (WorldClim, 2022).

WorldClim es un sitio web que compila conjuntos de datos climáticos a nivel mundial. Los datos futuros se basan en los resultados del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) para la versión actual de WorldClim, y en los resultados del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) para la versión 1.4 de la plataforma. La versión más reciente (2.1) ofrece un conjunto de 19 variables basadas en datos climáticos mensuales (**Tabla 7** de anexos), interpolados espacialmente con una resolución de 30 segundos de arco, correspondientes al período 1970-2000 (Rivera et al., 2021).

Ahora se describirán los conceptos de cada variable para el modelaje de especies:

Modelo de Elevación Digital (DEM)

Los modelos digitales de elevación (MDE) son ampliamente empleados en geociencias. La calidad de un MDE es fundamental para diversas aplicaciones y se ve afectada en varias etapas del procesamiento, desde la obtención de datos de elevación hasta la interpolación utilizada en el remuestreo. Además, la calidad localmente puede depender de la cobertura del suelo y la inclinación del terreno. Para que la calidad sea adecuada, debe alinearse con las necesidades del usuario, las cuales deben especificarse claramente en relación con el terreno nominal y la resolución pertinente (Mukherjee et al., 2013; Polidori y Hage, 2020).

La estructura de datos DEM más común es la ráster o de cuadrícula, que generalmente consiste en una matriz de celdas cuadradas donde se almacena la elevación promedio de cada celda en una matriz bidimensional. La posición de una celda en el espacio geográfico se deduce de su ubicación en filas y columnas dentro de la matriz, siempre que se conozcan las coordenadas de los límites (georreferencias) de la misma. (Garbrecht y Martz, 2000).

La elaboración de modelos de distribución potencial requiere tres tipos de información ambiental: a) características del terreno, b) condiciones climáticas y c) tipo de sustrato. El terreno abarca aspectos como la altitud, inclinación, relieve y orientación, que pueden derivarse de datos topográficos y transformarse en un modelo digital de elevación (MDE), siendo uno de los elementos clave en el proceso de modelación (Leal-Nares et al., 2012).

Cambios en usos de suelo

El cambio antropogénico en el uso y cobertura del suelo o sus siglas en inglés (LUCC) es una de las principales causas del cambio ambiental global. La transformación de tierras naturales en paisajes humanos ha sido significativa en los últimos siglos, pero ha experimentado una aceleración notable en las últimas dos o tres décadas, y se prevé que continúe si no hay alteraciones en las actividades humanas (Joshi et al., 2016). La conversión de bosques y pastizales en tierras agrícolas y pastos es el cambio más común, relacionado con el aumento de la demanda de alimentos y fibras, y tiene efectos sobre las reservas de carbono, la biodiversidad y el clima (Chang et al., 2022; Joshi et al., 2016).

El concepto general de LUCC abarca tanto la transformación total o las modificaciones más sutiles de la cobertura del suelo, como los cambios significativos en el uso de la tierra o alteraciones discretas en su gestión (Joshi et al., 2016). Tras una década de avances, los métodos para investigar el proceso temporal y espacial del LUCC (Land Use and Land Cover Change) han mejorado considerablemente. En cierto modo, se está creando rápidamente un marco metodológico para estudiar estos procesos. Este marco se fundamenta en la integración de teorías clásicas de la geografía y en tecnologías recientes como la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que representa un nuevo campo de investigación destinado a satisfacer la demanda de información científica para fomentar estudios sobre la adaptación al cambio global y el desarrollo sostenible (Joshi et al., 2016).

Las representaciones estáticas de la cobertura del suelo son esenciales como insumo para los modelos del sistema terrestre y tienen diversas aplicaciones en la gestión del territorio. Desde el lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, se han utilizado datos satelitales para caracterizar la cobertura terrestre (Defries y Townshend, 1999).

El uso de datos de teledetección ya sea desde aeronaves o satélites, es un enfoque en rápida evolución en este ámbito, especialmente por su capacidad para proporcionar datos espaciales y temporales de manera regular en extensas áreas, en contraste con las evaluaciones realizadas en el campo. Los sensores remotos funcionan según diversos principios físicos, capturando las propiedades electromagnéticas de la superficie

terrestre, ya sea mediante la energía reflejada (sensores ópticos), la energía emitida (sensores infrarrojos térmicos o de microondas pasivos) o la energía dispersada (sensores de radar activos), lo que les permite ofrecer una amplia gama de información sobre las características del suelo (Joshi et al., 2016).

La aplicación de capas de uso de suelo en la modelación de especies aporta de gran manera a investigaciones predictivas debido a que el cambio en el uso y la cobertura del suelo (LUCC) es una de las principales causas de alteración en los ecosistemas y la biodiversidad a nivel global. La transformación de hábitats naturales, como bosques y pastizales, en tierras agrícolas y zonas urbanas afecta directamente la disponibilidad de hábitat y las condiciones ambientales que permiten la supervivencia de diversas especies (Gil y Lobo, 2012; Plasencia Vázquez y Escalona Segura, 2014).

Conjunto de Datos de Radiación Ultravioleta B (UV-B)

El conjunto de datos global que aborda la radiación UV-B (**Tabla 8** de anexos) para investigaciones macroecológicas se descargaron de la página gIUV (Beckmann et al., 2014). gIUV es un conjunto de superficies climáticas que ofrece datos sobre distintos aspectos de la distribución global de la radiación ultravioleta B (UV-B). Esta información complementa otros conjuntos climáticos existentes, como CliMond y WorldClim, y contribuye a mejorar los análisis macroecológicos y los modelos bioclimáticos (Beckmann et al., 2014)

El gIUV permite investigar cómo la radiación UV-B limita la vida terrestre y marina. Su uso no se restringe a la modelización bioclimática, sino que también es útil para diseñar experimentos sobre gradientes UV-B o reevaluar distribuciones de especies actuales. Además, los estudios sobre la variabilidad de la radiación UV-B a lo largo del año pueden beneficiarse de las medias mensuales UV-B, que sirven para derivar variables bioclimáticas específicas de UV-B (Beckmann et al., 2014).

Fuera de la ecología y la biología, el gIUV también puede emplearse para estimar la degradación de materiales o abordar cuestiones de salud relacionadas con la radiación UV-B. Se han derivado seis variables relevantes para la biología a partir de las capas medias mensuales, empleando métodos similares a los de los conjuntos de datos

WorldClim (WorldClim, 2022). Las variables incluyen la media anual de radiación UV-B (UVB1), la estacionalidad de UV-B (UVB2), la media de UV-B del mes con mayor valor (UVB3), la media del mes con menor valor (UVB4), la suma de la media mensual de UV-B del trimestre con mayor radiación (UVB5) y la suma de la media mensual del trimestre con menor radiación (UVB6). La estacionalidad de UV-B se define como la desviación estándar de los valores mensuales medios (Beckmann et al., 2014)

Para calcular la suma de la media de radiación UV-B en los trimestres de radiación máxima y mínima (UVB5 y UVB6), se emplea el mismo algoritmo que el utilizado en WorldClim para las variables bioclimáticas BIO16 y BIO17, que corresponden a la precipitación del trimestre más húmedo y seco (método 'biovars' del paqueteR dismo, Hijmans et al., 2012). Este algoritmo considera las 12 combinaciones trimestrales posibles, incluso aquellas que abarcan el cambio de año, y selecciona la suma más alta o baja. En el caso de UVB3 a UVB6, el momento específico (mes o trimestre) al que se refieren estas variables puede variar espacialmente, incluso entre celdas cercanas. Para mantener la consistencia, todas las superficies de radiación UV-B, incluidas UVB5 y UVB6, se expresaron en las mismas unidades ($J/m^2/día$) (Hijmans et al., 2012).

Conjunto de Datos de Nubes

Mitchell y Jones (2005) presentan un conjunto detallado de rejillas climáticas mensuales de alta resolución, con una resolución espacial de 10 minutos para Europa y de 0.5 grados para toda la superficie terrestre global. Este conjunto abarca cinco variables climáticas: temperatura, rango de temperatura diurna, precipitación, presión de vapor y cobertura de nubes. Incluye el registro climático observado (1901-2000), un escenario de control (1901-2100) y 16 escenarios de clima futuro proyectado (2001-2100).

Estos 16 escenarios de cambio climático combinan cuatro escenarios de emisiones con cuatro modelos de clima global (GCMs), lo cual cubre el 93% del rango de incertidumbre del calentamiento global del siglo XXI reportado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Con ello, los usuarios pueden analizar los posibles impactos climáticos en función de las principales fuentes de incertidumbre sobre el clima futuro (Mitchell y Jones, 2005).

La construcción de estos escenarios se basó en la combinación de series temporales de calentamiento global y patrones de cambio de los GCMs con el clima de referencia y la variabilidad observada en el último siglo. Así, este conjunto de datos proporciona escenarios homogéneos y transitorios para un período de 200 años (1901-2100), facilitando proyecciones de impacto futuro del cambio climático en modelos ambientales (Mitchell et al., 2004)

Las cuadrículas fueron diseñadas por Mitchell et al. (2004, pp. 3-4) para ofrecer flexibilidad en una amplia gama de aplicaciones con modelos de impacto, permitiendo lo siguiente:

1. Los analistas pueden utilizar, de forma parcial o completa, las series de tiempo del escenario desde 1901 hasta 2100 para cualquiera de las cinco variables climáticas: temperatura, rango diurno de temperatura, precipitación, presión de vapor y cobertura de nubes.
2. La combinación de cuatro escenarios de emisiones con cuatro modelos de circulación general (GCM) da lugar a 16 escenarios que capturan gran parte de la incertidumbre asociada con el cambio climático futuro.
3. Gracias al diseño basado en cuadrículas, los datos pueden aplicarse directamente a la resolución de las celdas de la cuadrícula o en promedios regionales. Además, es posible obtener información con mayor resolución a través de técnicas de recampaneo espacial o temporal, así como mediante el uso de técnicas de reducción estadística o generadores de clima.

3.8 Correlación de Spearman

Esta es un complemento del Software IBM SPSS Statistics que te permite ver la correlación de las variables a utilizar en el modelo. El término estadística no paramétrica se refiere a métodos estadísticos que no necesitan la especificación de un supuesto sobre la distribución que proceden de los datos de muestra para ejecutar inferencias sobre la población. Dentro de los métodos no paramétricos se encuentra el coeficiente de Correlación de Spearman, este análisis permite examinar la dirección y magnitud asociada entre dos variables cuantitativas, en otras palabras, la intensidad de la relación

entre las variables, en cualquier tipo de asociación, no necesariamente lineal (Mondragón Barrera, 2014).

La correlación de Spearman es una herramienta eficaz para medir la relación entre dos conjuntos de datos con valores discretos o jerárquicos (ordinales). Es especialmente útil cuando los datos no siguen una distribución normal bivariante, sobre todo en presencia de valores atípicos (Salinas, 2007).

El método de Spearman permite calcular la correlación entre dos variables, pero no admite más de dos a la vez. Este, no permite la realización de regresiones, lo que impide modelar una variable dependiente Y en función de múltiples predictores o analizar la influencia de una variable sobre otra. En comparación con la regresión lineal o logística, su capacidad de análisis es más limitada (Salinas, 2007).

La fórmula del coeficiente:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Siendo:

- n= la cantidad de sujetos que se clasifican
- xi= el rango de sujetos i con respecto a una variable
- yi= el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable
- di= xi- yi (Mondragón Barrera, 2014)

El coeficiente de correlación de Spearman varía entre -1 a 1. Si tenemos un coeficiente entre -1 y 0, existe una correlación negativa entre las variables. Si tenemos un coeficiente entre 0 y 1, hay una correlación positiva las dos variables. Mientras el resultado más se acerque a 0, no tenemos correlación (DATAtab, 2024).

IV. Diseño metodológico

4.1 Tipo de estudio

La investigación optó un diseño descriptivo y predictivo para describir los posibles escenarios de distribución de especies mediante el programa MaxEnt. Además, se utilizó un enfoque cuantitativo para la recolección y análisis de datos.

4.2 Área de estudio

Nicaragua y Los bosques de pino reportados en el territorio nacional. Los bosques de pino de Nicaragua se localizan principalmente en la Zona Norcentral, aunque también se pueden encontrar en pequeñas áreas en los volcanes septentrionales de la Zona Pacífica y en la zona caribe con la especie de *Pinus caribaea*. Estos bosques, compuestos mayormente por *Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii*, prefieren suelos ácidos bien drenados derivados de granito y esquistos, siendo menos frecuentes en suelos volcánicos. La precipitación en esta área oscila entre 1.000 y 2.500 mm, y la altitud generalmente supera los 650 m (Stevens, 1995).



Figura 1 Mapa del Área de Estudio, Nicaragua.

4.3 Población de estudio

Corresponde a las especies del género *Pinus*. reportadas en Nicaragua

4.4 Muestra

Como muestra se tomaron los datos de ocurrencia de 4 especies reportadas en el país según Flora de Nicaragua revisado hasta la fecha de 07 febrero 2025, las cuales son: *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari, *P. maximinoi* HE Moore, *P. oocarpa* Schiede ex Schltldl., *P. tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & JP Perry

4.5. Obtención de datos

4.5.1 Fuente de datos climáticos

Los datos climáticos actuales y para los escenarios futuros se obtuvieron del sitio web WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) que es la fuente más importante de variables bioclimáticas (Rivera et al., 2021). Se descargaron datos con una resolución de 30 segundos de arco (1 km), siendo estos los más apropiados para analizar áreas pequeñas utilizando los puntos de presencia precisos (Hijmans et al., 2005; Rivera et al., 2021).

WorldClim comprende un grupo de 19 variables que se derivan de datos climáticos mensuales (WorldClim, 2022) (**Tabla 7** Anexos). Primeramente, se excluyeron las variables Bio8, Bio9, Bio18, Bio19, estas cuatro variables combinan información de precipitación y temperatura en la misma capa y presentan anomalías espaciales en forma de discontinuidades extrañas entre píxeles adyacentes (Sun et al., 2020).

Se descargaron datos bioclimáticos a futuro del modelo CMCC-ESM2 en escenarios con emisiones de GEI **intermedias** (SSP2-4.5) con emisiones de CO₂ que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo y escenarios con emisiones de GEI **altas y muy altas** (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) con emisiones de CO₂ que prácticamente se duplican con respecto a los niveles actuales para 2100 y 2050, respectivamente. Para mejor comprensión al momento de hablar sobre los escenarios se nombraron de la misma manera que aparece en el informe de la IPCC (2021).

Se escogieron los escenarios con pronósticos más agresivos a mediano plazo (2041-2060) debido a que el IPCC establece que existe una probabilidad de más del 50% de

que el aumento de la temperatura global alcance o supere los 1.5 °C entre 2021 y 2040, es decir no se cumplirían los pronóstico en los escenarios de emisiones GEI bajas (improbable que supera un calentamiento global de 2°C), incluso mencionan que específicamente en una ruta de altas emisiones, el mundo puede alcanzar este umbral incluso antes, entre 2018 y 2037 (IPCC, 2021; United Nations, 2024).

El Modelo de elevación digital se obtuvo de la página WorldClim. Las variables de suelo físico (contenido de arcilla, limo y contenido de volumen de agua) y suelo químico (capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno, carbono orgánico, pH del agua) a una profundidad de 15-30cm con una resolución de 2.5 min de arco se obtuvieron de la página web SoilGrids (<https://soilgrids.org/>) utilizada por Salazar et al. (2024) para determinar la Distribución y riqueza global de especies de *Pinus* ante cambio climático hasta el año 2070. Para la capa de uso de suelo se descargaron de la página web (https://env1.arcgis.com/arcgis/rest/services/Sentinel2_10m_LandCover/ImageServer) uso y cobertura del suelo derivada del Sentinel-2 ESA con una resolución de 10m (Karra et al., 2021).

Los datos de nubosidad se descargaron de la página web de *Data Distribution Centre* de la IPCC (https://www.ipcc-data.org/observ/clim/cru_ts2_1.html) que utilizan el método de Mitchell y Jones (2005) la cual, consta de 12 variables con unas resoluciones espaciales de 10 minutos para Europa y 0.5 grados para la superficie terrestre global en el periodo 1901-2002. Los datos de radiación UV-B se descargaron de la página web gLUV: un conjunto de datos globales de radiación UV-B (<https://www.ufz.de/gluv/>) que se utilizan como una extensión de los datos de Bioclim y consta de 6 variables con una resolución de 15 min de arco del periodo 2004 al 2013 (Beckmann et al., 2014).

Para corregir la diferencia en el tamaño de los píxeles y la resolución de las variables haciendo uso del Software QGIS ver. 3.28 (QGIS, 2024), se recurrió a la herramienta raster proyecciones → combar (reproyectar) en la cual, se puede elegir la resolución del archivo de salida y el método de remuestreo (QGIS, 2002); y se tomó como referencia los parámetros de las variables de Worldclim (Bio1, Bio2, Bio3, ect.) ya que son las más utilizadas para el software MaxEnt. Se dejaron algunos parámetros por defecto y se cambiaron las opciones SRC objetivo (Project CRS: 4326 – WGS84), resolución del

archivo de salida (0.008333), tipo de dato de salida (Float64) y por último la extensión georreferenciada del archivo de salida se creó a partir de una capa ráster de las variables bioclimáticas de Worldclim. Esto se realizó para cada una de las capas de las variables DEM, Suelo (Físico y químico), uso de suelo, radiación UV-B y de Nubes.

Las 15 variables bioclimáticas junto con las variables de elevación digital (DEM), suelo físico y químico, radiación UV-B y nubosidad (**Tabla 8** Anexos) son importantes para recortar el área de estudio, se omiten algunas variables porque muchas veces su uso en modelación de nichos puede traer predicciones erróneas (Jiménez y Méndez, 2021). Dando un total de 41 variables climáticas utilizadas para el modelo.

4.5.2 Fuente de datos presencia de especies

Los datos de presencia de las especies del género *Pinus* spp. se descargaron de la página web de Flora de Nicaragua (legacy.tropicos.org/Project/FN) y de *Global Biodiversity Information Facilities* en un archivo de valores separados por coma (“*comma separated values*”, extensión .csv). Los campos que contienen son los nombres de especie, longitud y latitud. Seguido se eliminaron los datos de presencia repetidos en Excel.

Posteriormente se observó una acumulación de puntos para las especies *Pinus caribaea*, para minorar esta acumulación se realizó un remuestreo con buffer de 5 km para cada registro y separar los puntos a una distancia mínima de 13 km entre sí (Pearson et al., 2007).

4.6 Preparación de Datos

4.6.1 Recorte de extensión geográfica

Los datos bioclimáticos para el modelaje actual y futuro se encuentran en archivo ráster (.tif) a nivel mundial, por lo tanto, se procedió a recortar solamente el área de estudio, (en este caso con una capa en formato .shp del croquis de Nicaragua) haciendo uso del Software QGIS ver. 3.28 (QGIS, 2024), posteriormente se transformó del formato ráster (.tif) a ASCII (.asc) para evitar interrupciones en el software (Rivera et al., 2021).

Para las variables re proyectadas se utilizó la herramienta extracción → cortar ráster por extensión para obtener una capa solamente del área de estudio y se transformo del formato ráster (.tif) a ASCII (.asc).

4.6.2 Limpieza de datos

Para la limpieza de datos se exportaron archivos en formato .csv que contiene los valores de cada una de las variables y de los puntos de ocurrencia de las especies utilizando el complemento “*Point Sampling Tool*”. Estos archivos se pasaron al software IBM SPSS Statistics para realizar gráficos de caja (boxplots) para cada variable. Se eliminó los puntos atípicos para reducir el sesgo por valores muy grandes o pequeños.

4.6.3 Selección de las variables en el modelado por especie

La selección de las variables para el modelado se hizo siguiendo el método de Scheldeman y Zonneveld (2011) que consistió en hacer una modelación preliminar con todas las variables y con los resultados de Jackknife se escogieron las variables con mayor contribución.

Así mismo se evaluó la multicolinealidad de las variables al modelo a través de un análisis de correlación de Spearman utilizando el software IBM SPSS Statistics. Por lo tanto, se eliminaron las variables con una baja contribución porcentual según Jackknife y una alta correlación ($|r| \geq .8$). De las variables que presentaban correlación entre sí y alta contribución al modelo, se dejó solamente la de mayor contribución, esto siguiendo la metodología de Wang et al. (2024).

4.7 Análisis de Datos y Modelado

4.7.1 Modelado en MaxEnt

Para generar los modelos de distribución de las cuatro especies del género *Pinus* y sus escenarios de cambio climático evaluados, se utilizó el software MaxEnt 3.4.4. (Phillips y Dudík, 2008).

Los archivos en formato asc. de las variables, aunque ya posean los mismos parámetros, para evitarnos errores con el software se utilizó el bloc de notas. Tomando siempre de referencia las variables de Worldclim, se copiaron los datos de las primeras cinco líneas

de una variable Bio y pegaron en las variables que se re proyectaron para poder ejecutarlas correctamente.

Durante la modelación se mantuvieron los parámetros predeterminados del programa más las opciones de *Random seed*, *add all simples to background* y *write plot data*. Se realizaron 10 réplicas para el modelo de cada especie utilizando como método de remuestreo *crossvalidate*. El modelaje se realizó con aproximadamente el 70% de los registros independientes y el 30% restante se utilizó para entrenar el modelo, esto según lo expuesto por Méndez-Encina et al. (2021).

El formato de salida fue de tipo logístico, el cual puede interpretarse como probabilidad de presencia. Para el modelado de la distribución se introdujeron las variables futuras a MaxEnt para hacer la proyección del modelo a los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

4.7.2 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó por medio de las pruebas de respuesta (análisis de omisión/comisión) y sensibilidad Curva Operada por el Receptor (ROC), también el Área bajo la curva (AUC) y por último la prueba de Jackknife para medir los efectos de cada variable en el modelo, las variables <0.5 no se consideraron porque no contribuyen por sí mismas al modelo y >0.6 se consideran de alto valor de contribución para el modelo (Rivera et al., 2021).

4.7.3 Mapas de Idoneidad

Para disminuir el error de idoneidad en los mapas se recurrió a la herramienta *threshold* del modelo y se utilizó como regla de umbral la opción *10 percentile training presence*. También se convirtieron los modelos continuos de MaxEnt en binarios clasificando mejor la cuadrícula entre Idóneo y no Idóneo de acuerdo con el umbral predefinido. Se generaron rasters binarios en formato ASCII (.asc) con las condiciones climáticas actuales y las condiciones futuras proyectadas, estas se exportaron en QGIS para el análisis de impacto del cambio climático sobre la distribución de especies (Scheldeman y Zonneveld, 2011).

La idoneidad de un área determinada se refiere a la capacidad del entorno para sustentar la reproducción, la supervivencia y la salud general de determinadas especies vegetales. El cambio climático plantea desafíos importantes a la idoneidad del hábitat al alterar los patrones de temperatura y precipitación, haciendo que hábitats que alguna vez fueron adecuados puedan volverse inhabitables, es decir, no idóneos para las especies (Fiveable, 2025).

4.7.4 Elaboración de Mapas

Los modelos resultantes (mapas de los escenarios futuros en formato ráster) representan valores de idoneidad de las especies (0–1). Para pasar el modelo a valores de idoneidad de 0-2 se realizó utilizando la herramienta raster “Reclasificar por tabla” dejando los valores de la herramienta por defecto. Los valores en la tabla de reclasificación son de 0,0,0 en la primera fila y 1,1,2 en la segunda fila, con límite de rango de $\text{min} \leq \text{valor} \leq \text{max}$.

Posteriormente se resta la capa reclasificada menos la capa del modelo actual en la calculadora raster, la capa obtenida posee valores de 2 a -1, con estos valores se clasifican las áreas en -1: Zonas de alto impacto, 0: Áreas fuera del Nicho, 1: Zonas de bajo impacto y 2: Nuevas áreas idóneas. Se calculó la extensión de las áreas antes mencionada en km^2 utilizando la herramienta “Informe de valores únicos de capa raster”.

Finalmente, con la calculadora ráster de QGIS se elaboraron mapas que muestran la suma de riqueza de las cuatro especies de *Pinus*, utilizando tanto las distribuciones actuales como las proyectadas en los escenarios de cambio climático, con el fin de analizar el comportamiento de los bosques de *Pinus* para el año 2050.

V. Resultados y Discusión

5.1 Datos de presencia para el género *Pinus*

Se reunieron un total 197 registros de ocurrencia de las 4 especies del género *Pinus*. (Figura 2). Para la especie de *Pinus maximinoi* se registraron un total de 16 ocurrencias, siendo esta la especie con menos registros que hay en Nicaragua. En la especie *P. oocarpa* se obtuvieron 51 registros y en *P. tecunumani* se recogieron datos de 59 puntos de presencia para Nicaragua. Por último, para *P. caribaea* se registraron un total de 71, sin embargo, a esta especie fue la única que se le aplico un Buffer de 5 km (Pearson et al., 2007) reduciendo así los puntos de ocurrencia, utilizando para el modelo solamente 28, estos se observan en la **Tabla 1**.

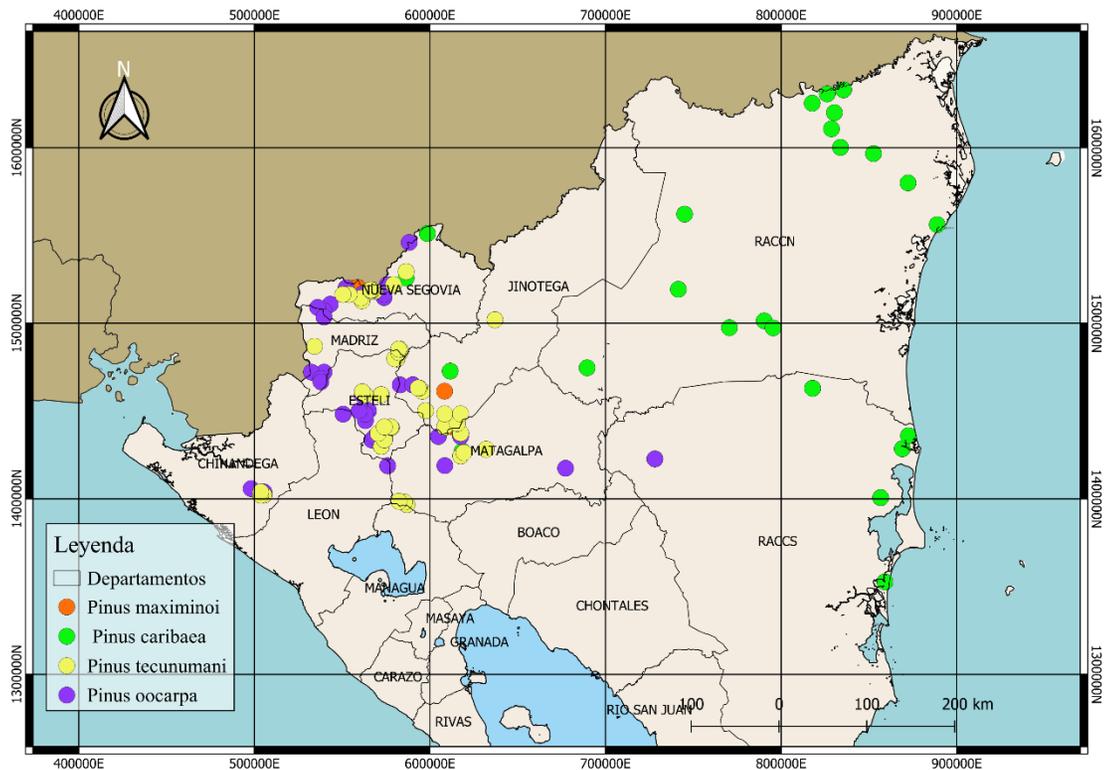


Figura 2 Distribución de los registros de 4 especies del género *Pinus* analizadas en Nicaragua

Se realizó de esta manera debido a que los datos de ocurrencia forman acumulaciones de los puntos, lo que generaba errores en el modelo para de *Pinus Caribaea* por la variedad de condiciones climáticas en la que se encuentra la especie. No se consideró un diámetro < 5 km porque la eliminación de los registros sería mayor, disminuyendo el

número de muestras, ni < 5 km porque el amortiguamiento de la concentración sería imperceptible

5.2 Contribución de las variables en el modelo

El número de variables que contribuyen para cada especie fue distinto (**Tabla 1**). De las 41 variables analizadas, se seleccionaron 7 variables climáticas para *P. maximinoi*, 12 para *P. oocarpa*, 9 para *P. tecunumanii* y 10 para *P. caribaea*

Tabla 1 Número total de registros, número de registros luego de la aplicación del buffer, Variables utilizadas en el modelo.

Especies	Número total de registros	Registros con buffer de 5km	Variables antes de análisis de multicolinealidad	Variables bioclimáticas usadas en el modelo
<i>P. maximinoi</i>	16	No realizado	Bio1, Bio10, Bio11, Bio4, Bio6, Bio5, Bio16, Bio7, Cloud 7, Cloud3, DEM, UV-B3, Uso de Suelo.	Bio10, Bio11, Bio7, Cloud 3, DEM, UV-B3, Uso de Suelo.
<i>P. oocarpa</i>	51	No realizado	DEM, CLOUD (1, 3, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12), BIO (10, 14, 17, 15, 1, 11, 12, 13, 16, 2, 5, 6, 7). UV-B (1, 3, 4, 6) limo, intercambio catiónico, pH de agua, suelo.	DEM, Bio (17, 16, 7, 6, 2), Cloud 1 y 8, Intercambio catiónico, UV-B1 y UV-B4, pH de agua.

<i>P. tecunumanii</i>	59	No realizado	BIO (1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17), CLOUD (1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12), UV-B1 y UV-B6, pH de agua, arcilla DEM	Bio4, Bio6, Bio16, Bio17, Cloud1, Cloud8, Cloud10, pH de agua, DEM.
<i>P. caribaea</i>	71	28	Bio1, Bio17, Bio2, Bio4, Bio6, Bio7, Capa de arcilla, Carbono orgánico, DEM, limo, Nitrógeno, pH de agua, Uso de Suelo	Bio17, Bio6, Bio7, Bio4, Capa de arcilla, Carbono orgánico, limo, Nitrógeno, pH de agua, Uso de Suelo.

La distribución de las especies se relacionó principalmente con las variables DEM y Temperatura (Bio2, Bio4, Bio6, Bio7, Bio10, Bio11), Precipitación (Bio16, Bio17), UV-B (1, 3, 4) y Cloud (1,3, 8, 10). Las variables de Capa de arcilla, Carbono orgánico, limo, Nitrógeno, pH de agua, Intercambio catiónico y Uso de Suelo. Para escoger las variables utilizadas en el modelo, se hizo uso de la prueba de Jackknife para ver que variable contribuía más cuando dos de estas tenían correlación, se dejaba la de mayor aporte y se omitía la restante. Las variables de radiación UV-B 5, UV-B6 y UV-B1 tenían alta correlación entre sí de 0.9, por lo cual se seleccionó solo una que es la que más contribuye la UV-B1. En las variables de nube todas las variables que mostraron alta contribución presentan correlación entre sí de 0.8 a mayores de 0.9 dejando solamente las variables Cloud 1, Cloud 8 y Cloud 10 que son las de mayor contribución y no presentan correlación entre ellas mismas, esto va a depender de la especie ya que para *P. maximinoi* únicamente se utiliza la Cloud3.

Finalmente, las variables de precipitación y temperatura varían según la especie y se encuentran diferentes variables que presentan correlación entre ellas misma como la

Bio14-Bio17, Bio13-Bio16 que son variables de precipitación, también Bio6-Bio11, Bio7-Bio2, Bio5-Bio10 que son variables de temperatura con correlación mayor a 0.9, por lo tanto la selección de estas variables se realizaron con detalle, seleccionando únicamente las variables que son necesarias para el modelo y no presenten correlación entre ellas, lo cual se aprecia de la **Tabla 9** a la **12** de Anexos.

En la **Tabla 2**, se puede apreciar las variables climáticas que más contribuyeron en el modelaje según el Porcentaje de Contribución proporcionado por MaxEnt, el porcentaje de contribución del total de variables usadas para el modelo se puede observar en la **Tabla 13 a 16 Anexos**. La variable que más contribuye y se encuentra en todos los escenarios para 3 de las especies es Modelo de Elevación Digital (DEM) e igualmente Bio17 que se encuentra tanto en *P. tecunumanii*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*.

Tabla 2 Variables climáticas que más contribuyeron en los modelos.

Especies	Actual	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
<i>P. maximinoi</i>	DEM: 84.4%	DEM: 82.8%	DEM: 85.6%	DEM: 84.6%
	Bio11: 12.1%	Bio11: 12%	Bio11: 6.4%,	Bio10: 5.9%,
<i>P. oocarpa</i>	DEM: 77.3%	DEM: 79.6%	DEM: 78.1%	DEM: 79.3%
	Cloud8: 5.8%	Cloud8 y Bio17: 9.5%,	Cloud8: 8.8%,	Cloud8: 8.8%,
<i>P. tecunumanii</i>	DEM: 85.6%	DEM: 86.5%	DEM: 90.7%	DEM: 88.9%
	Bio17: 6.5%	Bio6: 5.1%.	Cloud1 5.5%.	Cloud1: 4.6%.
<i>P. caribaea</i>	Bio17: 28.2%	Bio17: 38.5%	Bio17: 43.2%	Bio17: 32.9%
	Bio7: 22.1%	Uso de suelo: 26.4%	Bio7: 22.4%	Bio7: 29.7%,

5.2.1 Prueba de Jackknife

Las variables más importantes asociadas a la especie fueron determinadas mediante la prueba de Jackknife. Coria et al. (2014) menciona que el modelo asigna un incremento a las variables, que da como resultado un gráfico donde se muestra la ganancia o contribución de cada una. La barra color azul corresponde a la contribución cuando se

utilizan las variables de manera aislada o por sí sola, las barras color turquesa señala la disminución de la ganancia cuando se excluye o se omite y finalmente la barra roja crea un modelo donde se usan todas las variables.

Pinus maximinoi H.E. Moore

En la **Figura 3** para la prueba de Jackknife se observa que la variable con mayor ganancia es Bio11 (Temperatura media del cuatrimestre más frío), DEM y Bio10 (Temperatura media del cuatrimestre más cálido.), son las que parecen tener la información más útil para generar el modelo por sí misma. Las variables ambientales que no logra ninguna ganancia en el modelo por sí misma es UV-B 3 y Uso de Suelo.

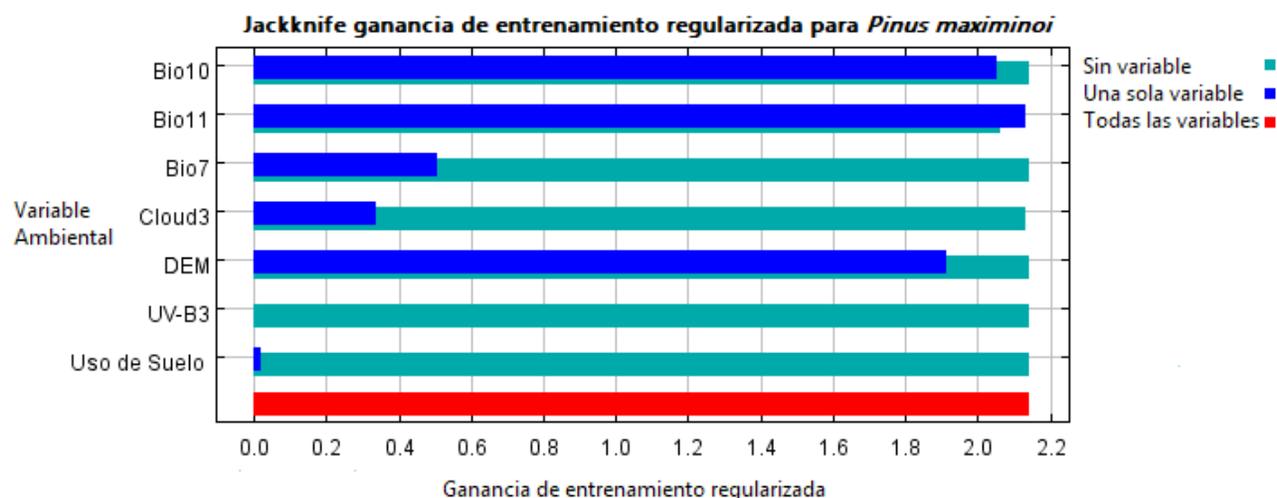


Figura 3 Prueba de Jackknife con las variables usadas en el modelo de *Pinus maximinoi*.

Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa*

En la **Figura 4** de la prueba de Jackknife, se observa que la variable con mayor aporte de información es el Modelo de Elevación Digital (DEM), Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío) y Bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo). Lo que indica que estas variables proporcionan la información más valiosa para el modelo de distribución. Por otro lado, la variable de Intercambio Catiónico y UV-B1 son las que menos aportan de ganancia informativa por sí sola, pero si sobrepasa el rango mínimo para tomarlas en cuenta y estimar de manera efectiva la distribución de *P. oocarpa* en el modelo.

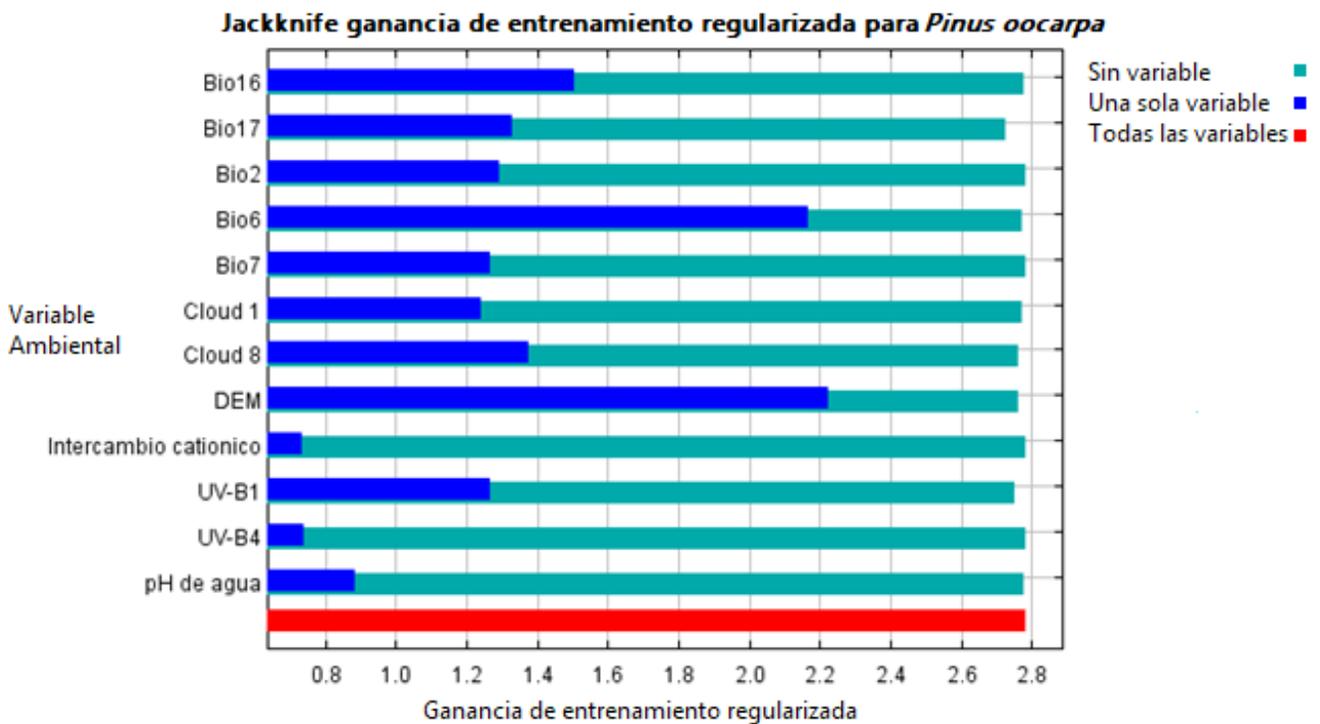


Figura 4 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de *Pinus oocarpa*

Pinus tecunumanii F. Schwerdtf. ex Eguluz & JP Perry

En la **Figura 5**, la prueba de Jackknife revela que la variable que más contribuye al modelo de distribución es el Modelo de Elevación Digital (DEM), Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío) y Bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo) ya que proporciona la mayor cantidad de información relevante. Por otra parte, la variable de pH de agua genera poca ganancia informativa por sí misma, sin embargo, sobre pasa los valores mínimos (0.6) para que la variable sea de aporte para el modelo.

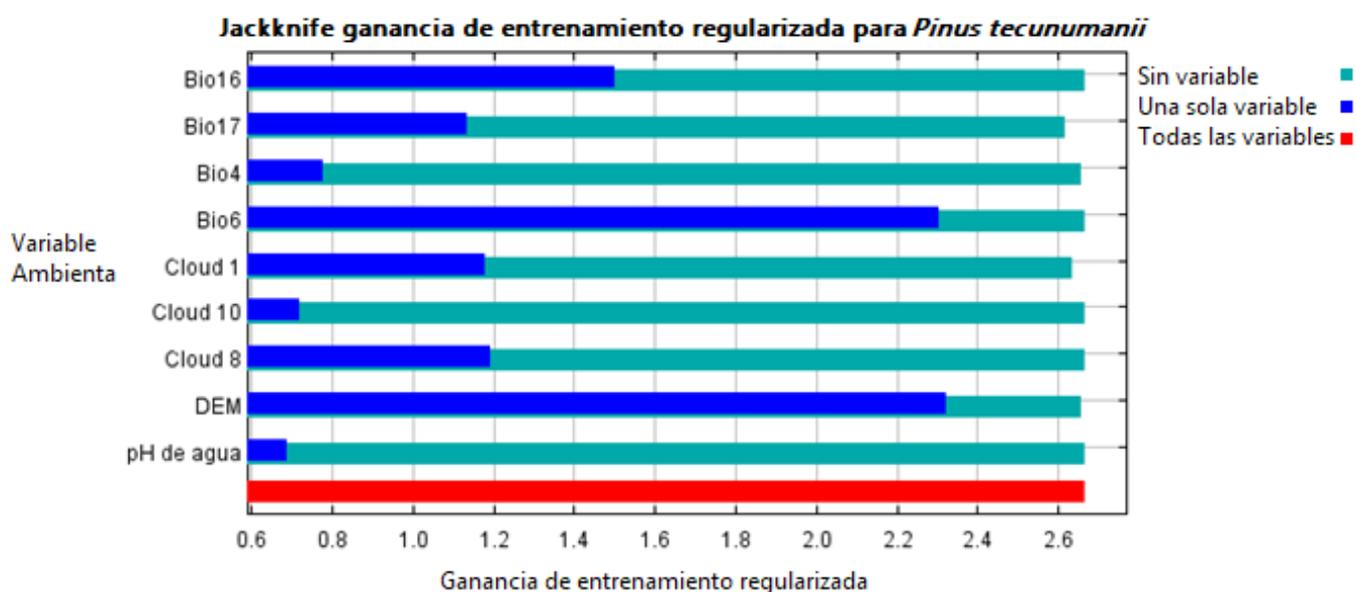


Figura 5 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de *Pinus tecunumanii*

Pinus caribaea var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari

En la **Figura 6**, se puede observar que la variable que menos aporta al modelo por sí misma son Carbono orgánico y Contenido de arcilla, las que más llegar a aportar por sí mismas son es Bio7 (Oscilación anual de la temperatura (BIO5-BIO6)), Bio17 (Precipitación del trimestre más seco) y Bio4 (Estacionalidad de la temperatura) , sin embargo, se puede apreciar que ninguna de las variables ambientales que se sometieron en el modelaje es razonablemente bueno para la distribución de *P. caribaea*, debido a,

que ninguna de las variables llega a superar el rango ≥ 0.6 necesario para considerar relevantes para el modelaje.

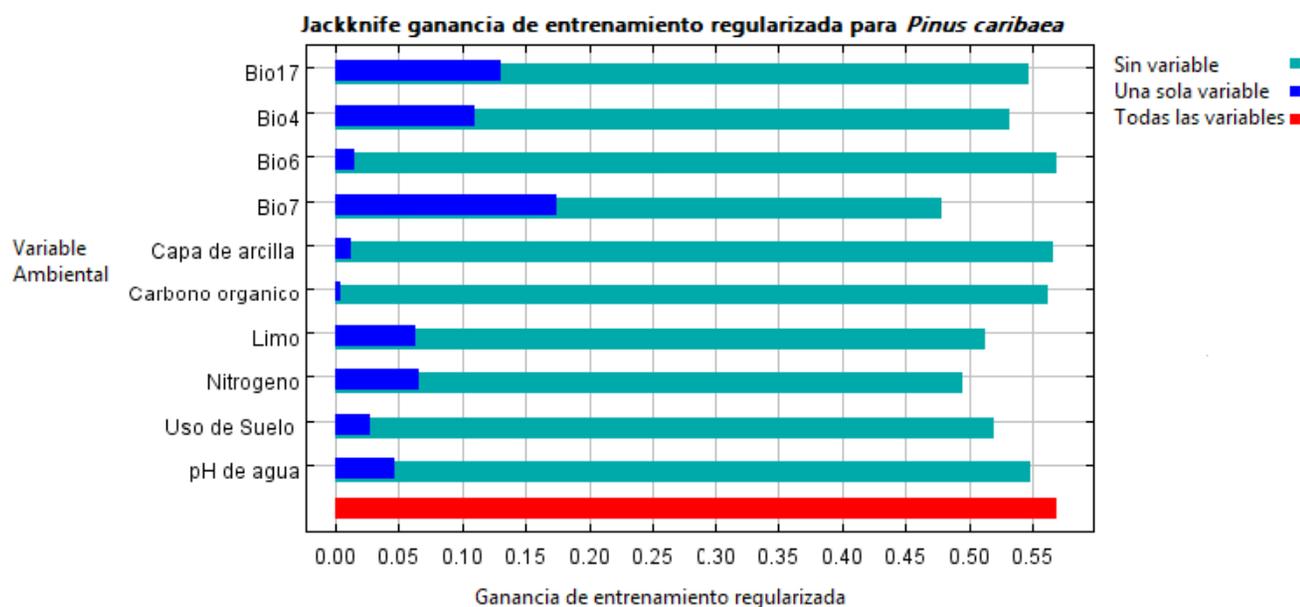


Figura 6 Prueba de Jackknife con las variables usada para el modelo de *Pinus caribaea*

Las variables relevantes para el periodo analizado fueron DEM, Bio6, Bio10, Bio11, Bio17 y Bio16. Manzanilla-Quiñones et al. (2019) mencionan que el DEM es un factor importante en la distribución de la especie *Pinus hartwegii* en México una especie con rango altitudinal similar a las especies de *Pinus ssp.* en Nicaragua, resultado similar al que se obtuvo en tres de las especies de este estudio (**Figura 3, 4 y 5**), la variable altitud (DEM) es de relevancia en la distribución de las especies analizadas, siendo estas *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* que se encuentran a una altitud de 650 a 1500 msnm. Por otro lado, *P. caribaea* aunque sus variables no sobrepasan el valor mínimo de aporte (0.6) para el modelo en la prueba de jackknife, si son ligeramente relevantes en el porcentaje de contribución para todos los escenarios, esto podría deberse a que esta especie se encuentra en una altitud entre 0 a 800 msnm (Styles, 2009). Debido a la altitud que presentan *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* hacen que DEM se destaque entre las demás variables. Al ser DEM de las que más aporta para el modelaje, hacen de este un perfil completo para el hábitat de las especies de Pinaceae en Nicaragua en los escenarios futuros.

Las especies *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* al presentarse en terrenos de altura, tienden a tener temperaturas mínimas a los 13°C y precipitaciones de 600 mm anualmente (Avila Folgar, 2003). Por consiguiente, en la prueba de Jackknife nos muestra como las Bio6, Bio11 y Bio16 son las variables bioclimáticas más determinantes para la proyección a futuro de estas especies, mismas que utilizó Lin et al. (2020) debido a su aporte para el modelaje. Estas especies al estar en zonas altas y bien drenadas responden de manera eficaz ante las precipitaciones (Styles, 2009). En un estudio realizado por Lin et al. (2020) mencionan que Bio6 puede indicar si la temperatura es adecuada para cumplir con el requerimiento de vernalización en las especies del norte y si los pinos de regiones de baja latitud pueden resistir las condiciones climáticas extremas del invierno. En Nicaragua la variable Bio6 indicaría si las temperaturas mínimas no representan una amenaza para que las especies puedan crecer sin restricciones térmicas.

Por otra parte *P. caribaea*, no posee tantas variables que contribuyan por sí mismas (**Figura 6**), el perfil bioclimático es diferente entre especies y va a depender de su distribución geográfica en el país (Aceves-Rangel et al., 2018). Por tal motivo, al omitirse algunas variables disminuiría la ganancia para el modelo, la amplia gama de condiciones ambientales en las que se encuentran esta especie hace que tenga una aceptación con el ambiente en donde se encuentre (Salazar-Tortosa et al., 2024).

Un estudio de esta especie realizado en Cuba por Martínez (2018) señala que el régimen de precipitaciones es el determinante en *Pinus caribaea*, lo cual concuerda con los resultados obtenidos; ya que, la precipitación del trimestre más seco (Bio17) es de las que más contribuye en el modelo junto con Oscilación anual de la temperatura (Bio7) así se aprecia en la **Figura 6**. Cuando destaca esta variable de precipitación (Bio17), es porque donde se encuentra la especie de estudio requiere de las precipitaciones mínimas del trimestre más seco para su supervivencia.

Estudios similares como el de Aceves-Rangel et al. (2018) y Ávila Coria et al. (2014) que utilizaron variables bioclimáticas para la evaluación de especies de *Pinus* destacaron como las de mayor influencia en el modelaje son los valores mínimos y máximos de temperatura y precipitación. Por otra parte Rosas Ávila (2008) menciona que las especies

P. maximinoi, *P. oocarpa* y *P. patula* se caracterizan por tolerar temperaturas elevadas (como la temperatura media anual, la del mes más cálido, la del mes frío, así como la del mes más húmedo y el más seco) y por recibir lluvias significativas (con precipitaciones anuales superiores a 1,200 mm, precipitaciones en el cuartil más húmedo entre 650 y 780 mm, y en el cuartil más cálido entre 350 y 450 mm) y de esta manera es que las especies se desarrollan en condiciones mucho más cálidas y húmedas que otras especies.

Sin embargo, un factor importante que también puede influir en la distribución de los pinos es la radiación UVB, una longitud de onda de radiación perjudicial que puede ocasionar problemas en las plantas, como daño al ADN y disminución de la tasa de crecimiento (Day y Neale, 2002). *P. maximinoi* y *P. oocarpa* fueron las únicas que se le aplicaron variables como la radiación UVB (**Figura 3 y 4**), tales como UV-B1, UV-B3 y UV-B4 debido a que contribuían al modelo; resultados similares a los que se presentaron en un trabajo realizado por Lin et al. (2020) donde utilizó UV-B1 y UV-B3; las cuales, fueron de gran aporte en dos de sus especies de *Pinus* en estudio.

5.3 Validación del modelo

Se puede apreciar en la **Tabla 3** los valores de área bajo la curva ROC que funcionan para la validación del modelaje, también pueden apreciar su forma gráfica para cada escenario en las **Figuras 16 a la 31 en Anexos**. En este caso, *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. tecunumanii* obtuvieron valores AUC mayores a 0.9, mientras que *Pinus caribaea* obtuvo valores de 0.7 a 0.9. De acuerdo a (Siles et al., 2005) para garantizar la calidad y confiabilidad de las predicciones se toma en cuenta solo aquellos modelos con un valor de $AUC \geq 0.7$. Según Manzanilla-Quiñones et al. (2019), el desempeño de los modelos fue excelente (mayores a 0.9), mientras que un modelo de 0.7 a 0.8 como lo obtenido por *P. caribaea* indica un desempeño del modelo satisfactorio. Phillips (2005) expresa que el valor de AUC tiende a ser más alto con especies de distribución estrecha en relación con el área evaluada, eso explicaría el valor de AUC para *P. caribaea* que posee una distribución más amplia. En estos casos, la amplia gama de condiciones ambientales en las que se encuentra esta especie pudo haber comprometido la calibración del modelo

(Salazar-Tortosa et al., 2024). Esta especie se puede encontrar en zonas de la Costa Caribe y Norte-Central del país, y con diferentes temperaturas y precipitaciones.

Tabla 3 Valores del área bajo la curva ROC (AUC) para cada escenario.

Especie	Valores de AUC Actual	Valores de AUC SSP2-4.5	Valores de AUC SSP3-7.0	Valores de AUC SSP5-8.5
<i>P. maximinoi</i>	0.98	1.00	0.99	1.00
<i>P. oocarpa</i>	0.95	0.99	0.98	0.98
<i>P. tecunumanii</i>	0.97	0.98	0.98	0.99
<i>P. caribaea</i>	0.74	0.97	0.99	0.91

Se ha demostrado que la modelación de cualquier especie depende de la cantidad y calidad de los datos; se ha sugerido, para que sea robusta la precisión geográfica, se utilice un mínimo de 50 registros, aunque se han realizado modelaciones con menos de 6 registros y estas se ha reportado como no significativa (Aguirre Gutiérrez y Duivenvoorden, 2010).

Según el estudio realizado por Reynoso Santos et al. (2018) los modelos generados para las especies *P. oocarpa* y *P. pseudostrobus* mostraron valores de AUC de 0.882 y 0.947 respectivamente, lo cual demuestra que pueden utilizarse para predecir la presencia y distribución de ambas especies, con un nivel de confiabilidad alto. También menciona que otros estudios han registrado valores de AUC entre 0.7 y 0.9, tomando en cuenta estos datos se concluye que se alcanzaron resultados precisos con el uso de MaxEnt.

5.4 Modelación bajo escenarios de Cambio Climático

Pinus maximinoi H.E. Moore

En la **Figura 7**, se puede observar la distribución actual y los efectos del cambio climático para el año 2050. Es importante destacar que la categoría de "Nuevas áreas idóneas" no presenta datos, lo que indica que, para esta especie, no se prevén áreas que se convertirán en idóneas en el futuro. También en la **Tabla 6** se muestra de manera cuantitativa, el cambio en las áreas de distribución para *P. maximinoi*. La distribución

actual de esta especie abarca 2,740 km² y se espera una reducción de las áreas de distribución bajo escenarios climáticos donde las cifras son: SSP2-4.5= 2,340 km² (86%), SSP3-7.0= 2,220 km² (81%) y SSP5-8.5= 2,440 km² (89%) respectivamente.

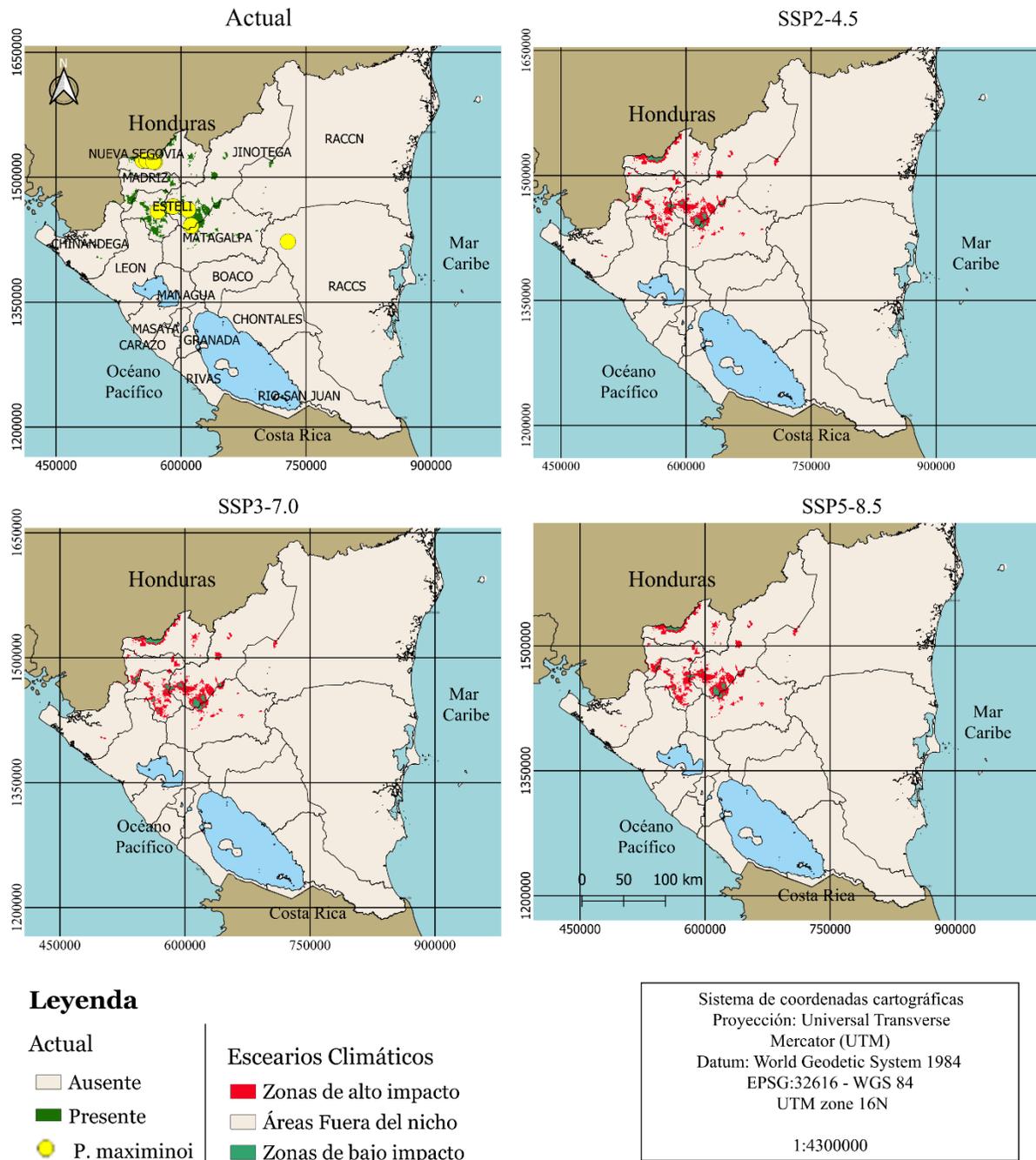


Figura 7 Distribución de *Pinus maximinoi* H.E. Moore bajo distintos escenarios de Cambio Climático al 2050

Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa*

En la **Figura 8**, se observa la distribución actual y potencial bajo escenarios del cambio climático para el año 2050. En la **Tabla 6**, se observan los cambios potenciales en *P. oocarpa*, la distribución actual abarca 5,099 km² y bajo escenarios de cambio climático habrá reducciones de las áreas de presencia, teniendo como resultado los escenarios SSP2-4.5= 1550 km² (30%), SSP3-7.0= 1040 km² (20%) y SSP5-8.5 2450 km² (44%).

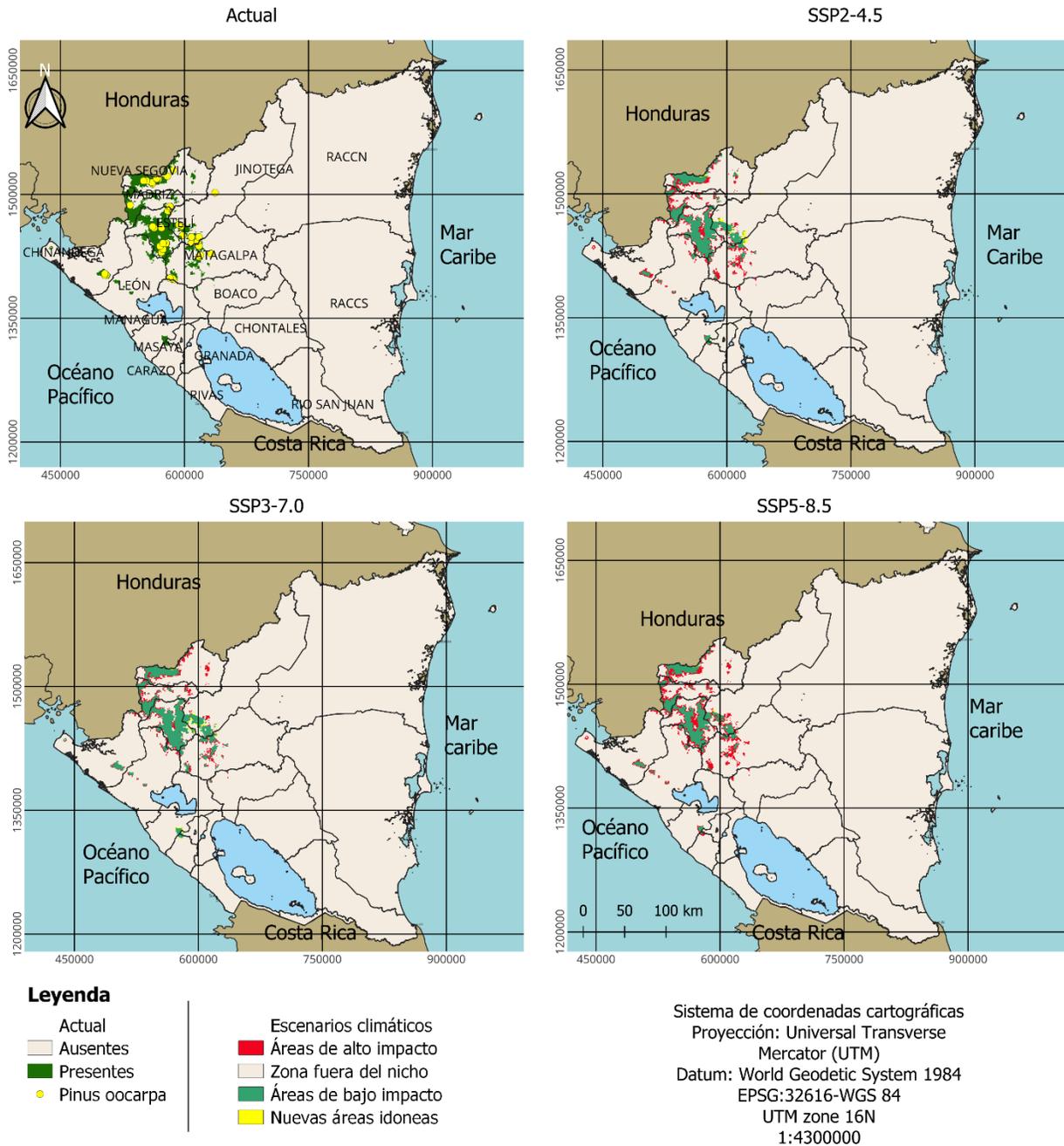


Figura 8 Distribución de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schtdl. var. *oocarpa*, bajo escenarios de cambio climático al 2050

Diferentes autores como Guzmán-Santiago et al. (2024) mencionan la utilidad de modelos de nicho ecológico para entender el impacto de los cambios en la precipitación y temperatura que influyen en la distribución de las especies. Sin embargo, también sugiere que la influencia de las variables climáticas difiere entre especies y ecosistemas. Otros autores afirman que para especies vegetales en específico especies de pino son importantes las variables de pendiente y altitud (Martínez-Méndez et al., 2016), suelo y vegetación (Miranda et al., 2019), radiación UV-B y nubosidad (Wang et al., 2024).

Los resultados de este estudio muestran que las especies evaluadas son principalmente sensibles a la pendiente (DEM), temperatura y precipitación. Aceves-Rangel et al. (2018) expresa que la distribución de cada una difiere en función de las características bioclimáticas locales. Un estudio similar realizado por Salazar-Tortosa et al. (2024) para especies del género *Pinus* a nivel mundial prevé una disminución en la idoneidad de áreas en la que se espera aumentos marcados de aridez. Esto podría tener un efecto negativo en la riqueza de pinos en estas áreas.

Los resultados obtenidos muestran reducciones de áreas idóneas para tres de las cuatro especies del género *Pinus* en Nicaragua bajo los escenarios estudiados. Las especies *P. oocarpa* y *P. maximinoi* muestran una disminución de 31% y 85% como media respectivamente, siendo *P. maximinoi* la que más se verá afectada ya que el modelo no predice nuevas áreas idóneas para esta especie. Según la IPCC (2021) en el escenario con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5) es probable que se produzca calentamiento global de 1.6 a 2.5 °C y se espera disminuciones de áreas idóneas del 30% para *P. oocarpa* y del 86% para *P. maximinoi*; Igualmente, en los escenarios con emisiones de GEI altas (SSP3-7.0) con aumentos de 1.7 a 2.6 °C y el de emisiones GEI muy altas (SSP5-8.5) de 1.9 a 3 °C se espera disminuciones aún mayores de 81% y 89% para *P. maximinoi* y del 20% y 44% para *P. oocarpa*. Las áreas idóneas para la especie *P. oocarpa* se encuentra en los departamentos de Jinotega, Matagalpa y algunas zonas altas de Estelí, Nueva Segovia y en partes del Pacífico.

Datos similares obtuvo Salazar-Tortosa et al. (2024), donde estudiaron la distribución futura de todas las especies del género *Pinus* en el mundo y en su mayoría éstas reducirían las áreas de distribución con respecto a la prevista actual. Igualmente, estudios

realizados por Bárcenas (2015) y Ramos-Dorantes et al. (2017) que trabajaron en la modelación de más de 20 especies de pino, incluyendo *P. oocarpa* y *P. maximinoi* resaltan una disminución en la distribución potencial de estas especies y cada vez más severa bajo los escenarios con emisiones de GEI muy altas utilizados. Incluso Ramos-Dorantes et al. (2017) cataloga a *P. oocarpa* como una especie en Peligro crítico, esto debido al tipo de vegetación en el que se encuentra registrado. Debido a que *P. maximinoi* es una especie con distribución restringida se espera que el cambio climático y el crecimiento poblacional ocasioné la destrucción de hábitats naturales y la disminución de su distribución potencial.

En otras palabras, Es muy probable que se supere el nivel de calentamiento global de 2 °C en el período de medio plazo 2050, lo que conlleva cambios en la distribución de las especies de *P. maximinoi* y *P. oocarpa* que se puede explicar mejor en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Cambios en la Distribución de *P. maximinoi* y *P. oocarpa*

Especies	Cambios en la distribución
<i>P. maximinoi</i>	No se espera nuevas áreas idóneas en ninguno de los escenarios, los lugares más afectados son Jinotega, Estelí y Matagalpa. Nueva Segovia y Jinotega son los departamentos que tiene mayor área de bajo impacto ante el cambio climático, lo que significa que en estas áreas puede sobrevivir y lograr adaptarse mejor la especie. Por último, el escenario que predice mayores cambios desfavorables es SSP5-8.5, muestra una reducción del 89% en las áreas de distribución, lo que implica una disminución significativa en su hábitat.
<i>P. oocarpa</i>	Los lugares más afectados son Matagalpa, Madriz y Estelí en los tres escenarios. Estelí y Nueva Segovia poseen las mayores áreas de bajo impacto ante el cambio climático y se observan nuevas áreas idóneas en Jinotega bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, lo que serían zonas propicias para la adaptación y resiliencia de esta especie. Por último, el escenario que predice mayores cambios desfavorables es SSP5-8.5 con reducción del 44% en las áreas de distribución.

Pinus tecunumanii F. Schwerdtf. ex Eguiluz & JP Perry

En la **Figura 9**, se observa la distribución actual y potencial bajo escenarios del cambio climático para el año 2050. En la **Tabla 6** se presentan cambios en la distribución futura de *P. tecunumanii*, la distribución actual presenta 6,210 km² y bajo escenarios de cambio climático muestra que habrá una reducción en las áreas de distribución para los escenarios SSP2-4.5= 750 km² (11%), SSP3-7.0 1210 km² (19%) y para el escenario SSP5-8.5= 1270 km² (20%).

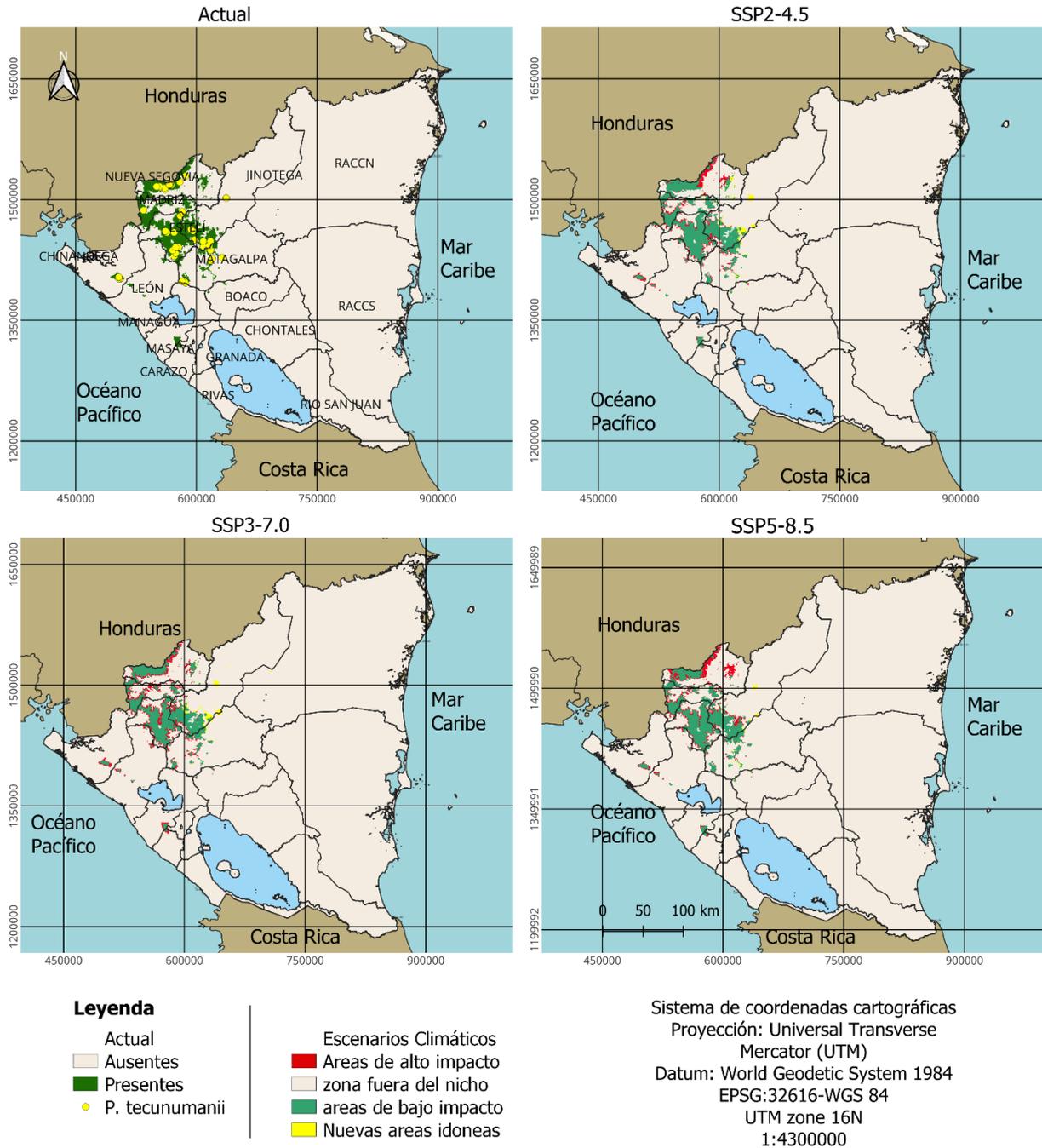


Figura 9 Distribución de *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguluz & JP Perry, bajo escenarios de cambio climático para el 2050

Pinus caribaea var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari

Los resultados obtenidos se pueden observar en la **Figura 10** la distribución actual y los efectos del cambio climático para el año 2050 y en la **Tabla 6** los cambios en las áreas de distribución obtenidos para *P. caribaea*, la distribución actual presenta 65,030 km² y los resultados indican un aumento en el área de distribución para los tres escenarios, siendo para SSP2-4.5 de 14,920 km² (18%), SSP3-7.0 de 8,010 km² (10%) y SSP5-8.5 de 18,200 km² (21%).

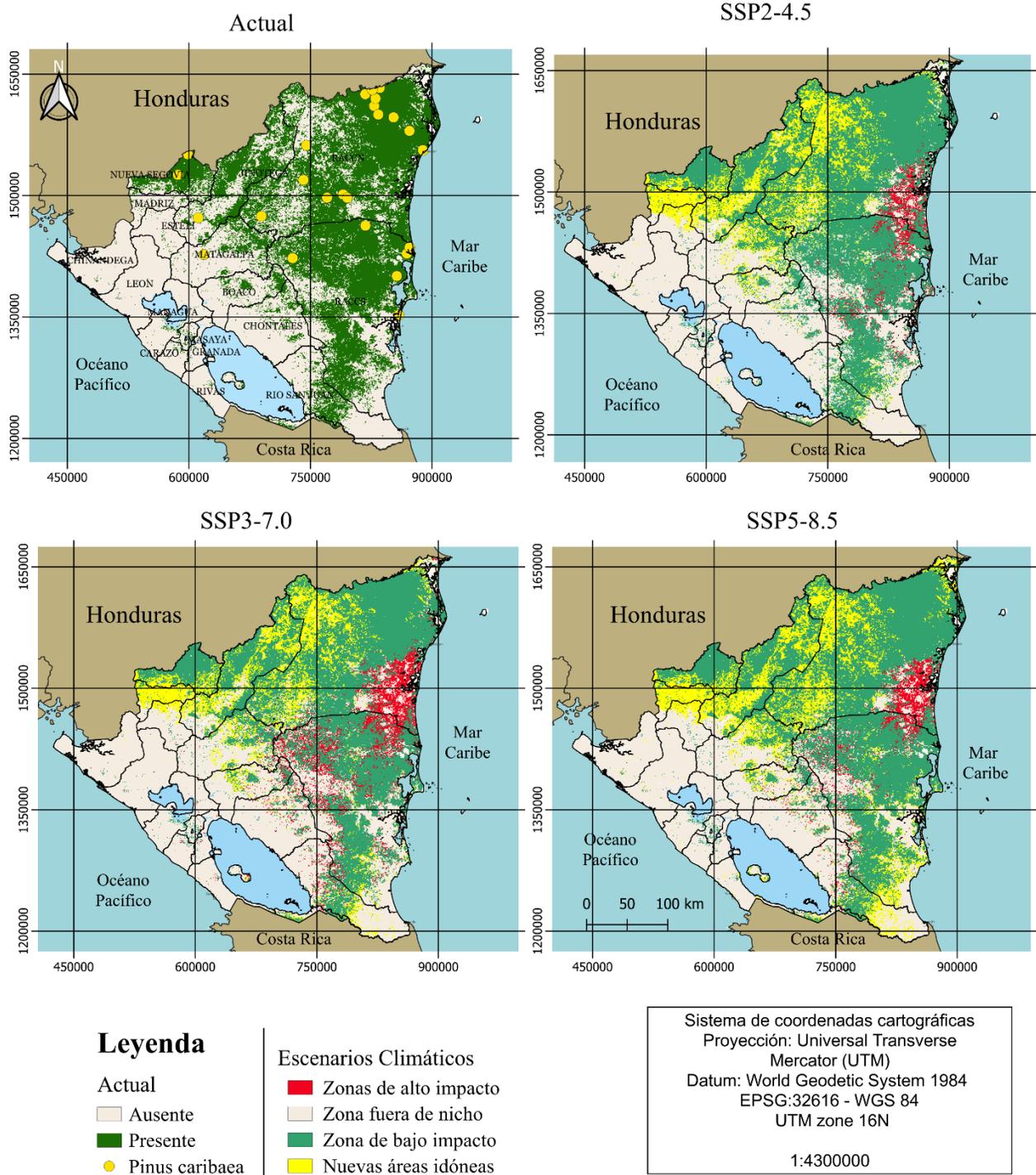


Figura 10 Distribución de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari, bajo escenarios de cambio climático al 2050

En la **Figura 10** se observa que la especie de *P. caribaea* espera aumentos de áreas idóneas del 16% y en la **Figura 9** *P. tecunumanii* espera disminuciones del 17%. Ante un escenario con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5) es probable un incremento en el calentamiento global de 1.6 a 2.5 °C el cual produce un aumento del 18% en *P. caribaea* y una disminución del 11% para *P. tecunumanii* de acuerdo con su distribución actual prevista. En el escenario con emisiones de GEI altas (SSP3-7.0) se espera aumentos de 1.7 a 2.6 °C y con emisiones de GEI muy altas (SSP5-8.5) de 1.9 a 3 °C. Sin embargo, en los escenarios *P. caribaea* mostrará un aumento de 10% y 21%; mientras que para *P. tecunumani* se esperan reducciones de 19% y 20% respectivamente. Las áreas idóneas para estas especies se ubican principalmente en las partes altas de Chinandega y León, Jinotega, Matagalpa, Estelí, Madriz y Nueva Segovia para *P. tecunumanii* y para *P. caribaea* son Jinotega, Matagalpa, Estelí, Madriz, Nueva Segovia, RACCN y RACCS, Río San Juan, Boaco y Chontales.

Estos resultados están relacionados con los obtenidos por van Zonneveld et al. (2009), en este trabajo se utilizó dos escenarios de cambio climático para *P. tecunumanii* y *P. patula* que son especies que presentan similitud, estas mismas experimentan una reducción del 49% de áreas idóneas para el 2050. También observo una disminución fuerte pero no significativa; prácticamente no se obtuvieron nuevas áreas idóneas solamente un 2%. van Zonneveld et al. (2009) mencionan que estas especies de pinos poseen una adaptación al cambio climático mayor de la que indican los modelos de envolventes climáticas (CEM), sus estudios demuestran que se desarrollan adecuadamente en un rango más amplio que los límites de nicho climático establecidos.

Por otro lado, Bárcenas (2015) realizó un estudio en especies maderables de *Pinus* donde demuestra un 13% de reducción en el escenario moderado y del 10% en el escenario con emisiones de GEI altas, lo que demuestran un cambio menor en todos los modelos de distribución de la especie.

Un estudio realizado por Miranda-Sierra et al. (2017) en la parte occidental de Cuba demuestra que especies como *P. caribaea* indica mayor probabilidad de presencia en condiciones climáticas localizadas en áreas similares a su presencia actual. Por otro lado, estos resultados contradicen a los obtenidos por Leguía et al. (2009) que mencionan que

las áreas óptimas para *Pinus caribaea* van a disminuir constantemente, siendo esta especie la más afectada para su estudio reduciendo hasta 24% de áreas óptimas entre el periodo actual hasta el 2070-2100 siendo Nicaragua el país donde ocurrirá mayores cambios desfavorables.

El trabajo de Leguía et al. (2009) acerca de impactos de cambio climático en plantaciones forestales en Centroamérica, estudiaron a la especie de *P. caribaea* y mencionan que Nicaragua es el país en el cual ocurrirán los mayores cambios desfavorables hasta un 41.9% de su territorio y en los periodos del 2040-2070 se mantiene una tendencia de cambios favorables bajos (menos del 2%). Las áreas óptimas o aptas para *P. caribaea* se vuelven muy escasas para Nicaragua.

Se debe tomar en consideración que los modelos de distribución para *Pinus caribaea* sobrepasa el límite de distribución natural con nuevas áreas idóneas lo que contradicen los estudios similares sobre esta especie. La fiabilidad de los datos para la especie de *P. caribaea* en este estudio pudo verse afectada por sesgos espaciales que a la vez provoca sesgos en la distribución afectando potencialmente los resultados en las predicciones para estas especies, probablemente es debido a errores en la georreferencia o identificación de las especies al momento de incluirlos en la base de datos, lo cual produce que el modelo considere la presencia de una especie en un lugar del que realmente está ausente, y viceversa. Estos errores son especialmente problemáticos porque producen falsas presencias en lugares donde ambientalmente no está su presencia actual (Varela et al., 2014).

Ávila-Coria et al. (2014) señalan que el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero causará variaciones en la temperatura y las precipitaciones. Por consiguiente, esto llevará a que los bosques ubicados en zonas altas sean los más impactados y a su vez, provocará un cambio en la distribución de las especies.

La IPCC (2021) describe que aumentos de 1 °C a 2 °C representarían un daño moderado a la biodiversidad y arriba de 3.5 °C sería perjudicial para muchas especies. Es muy probable que se superen el nivel de calentamiento global de 2 °C en el período de medio plazo 2050, lo que implica cambios en la distribución de las especies de *P. tecunumanii* y *P. caribaea* que se explican mejor en la **Tabla 5**.

Tabla 5 Cambios en la Distribución de *Pinus tecunumanii* y *P. caribaea*

Especies	Cambios en la Distribución
<i>P. tecunumanii</i>	<p>Los lugares más afectados ante el cambio climático para la especie son Nueva Segovia, Estelí y Madriz bajo los tres escenarios. Jinotega, Estelí y Nueva Segovia poseen las mayores áreas de bajo impacto e incluso en el escenario SSP2-4.5 predice nuevas áreas idóneas en Jinotega, Madriz, Nueva Segovia y Matagalpa y en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se predicen nuevas áreas en Jinotega, Nueva Segovia y Matagalpa, lo que significa que son los lugares más beneficiosos para la adaptación y sobrevivencia de esta especie. Por último, el escenario que predice mayores cambios desfavorables es SSP5-8.5 con una reducción del 20% en áreas de distribución.</p>
<i>P. caribaea</i>	<p>No se predicen reducciones en las áreas de distribución para esta especie, los resultados indican que, bajo los tres escenarios analizados, se podrían esperar aumentos en dichas áreas. Aun así, se aprecian zonas de alto impacto ante el cambio climático en las Regiones Autónomas RACCN y RACCS. En los tres escenarios predicen nuevas áreas idóneas en Madriz, Estelí, Nueva Segovia, Matagalpa, Jinotega, RACCN y RACCS, aunque también lo predice en zonas fuera de su distribución natural como Boaco, Chontales, Río San Juan y parte sur de RACCS. Debido a los sesgos en el modelo de distribución para esta especie se predice que podría beneficiarse, incluso con aumentos del 21% en el escenario con emisiones GEI muy alta (SSP5-8.5).</p>

Tabla 6 Dinámicas en el cambio de las áreas de distribución de las especies del género *Pinus* bajo tres escenarios de cambio climático al 2050. El porcentaje de proporción de áreas se encuentran redondeado, de manera que, valores decimales mayores a .5 fueron redondeados al número superior. Los porcentajes positivos representan área de distribución ganada y porcentajes negativos área perdida.

Escenarios climáticos Futuros	Área ($\times 10^3$ km ²)					Proporción de área (%)			
	Futura	Perdida	Ganada	Sin Cambio	Total	Perdida	Ganada	Sin Cambio	Total
<i>Pinus maximinoi</i>									
SSP2-4.5 - 2050	2.73	2.34	0	0.39	-2.34	86	-	14	-86
SSP3-7.0 - 2050	2.73	2.22	0	0.51	-2.22	81	-	19	-81
SSP5-8.5 - 2050	2.73	2.44	0	0.29	-2.44	89	-	11	-89
<i>Pinus oocarpa</i>									
SSP2-4.5-2050	5.25	1.7	0.15	3.4	-1.55	32	3	65	-30
SSP3-7.0-2050	5.23	1.18	0.14	3.91	-1.04	23	3	75	-20
SSP5-8.5-2050	5.12	2.26	0.03	2.83	-2.23	44	1	55	-44
<i>Pinus tecunumanii</i>									
SSP2-4.5-2050	6.53	1.07	0.32	5.14	-0.75	16	5	79	-11
SSP3-7.0-2050	6.53	1.53	0.32	4.68	-1.21	23	5	72	-19
SSP5-8.5-2050	6.33	1.4	0.13	4.8	-1.27	22	2	76	-20
<i>Pinus caribaea</i>									
SSP2-4.5-2050	83.42	3.48	18.4	61.54	14.92	4	22	74	18
SSP3-7.0-2050	81.73	8.7	16.71	56.32	8.01	11	20	69	10
SSP5-8.5-2050	87.88	4.65	22.85	60.38	18.2	5	26	69	21

5.5 Distribución espaciotemporal de especies de *Pinus* spp.

La **Figura 11** presenta un análisis del impacto del cambio climático en la distribución de las especies del género *Pinus* en Nicaragua, específicamente en las especies de *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa*, *P. tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & JP Perry y *P. caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari bajo tres escenarios de emisiones futuras (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). A través de este mapa, se visualiza la distribución actual de las especies de *Pinus* en el país, así como sus posibles cambios para el año 2050 bajo los tres escenarios de cambio climático.

Primeramente, se puede observar un aumento en la distribución espaciotemporal de especies en el escenario con emisiones de GEI intermedias SSP2-4.5, en las Regiones Norte-Central de Nicaragua y también en la Región de la Costa Caribe Norte y Sur presenta mayor área ocupada por la especie de *Pinus caribaea*. La disminución se puede observar en los escenarios con emisiones de GEI altas SSP3-7.0 y el con emisiones de GEI muy altas SSP5-8.5, donde la mayor disminución de diversidad se observa en el escenario con emisiones de GEI muy altas.

Los escenarios muestran cómo diferentes niveles de emisiones podrían influir en la expansión o contracción de las áreas de distribución de estas especies, las áreas ricas para las cuatro especies desaparecerán en gran parte del territorio, lo que subraya la vulnerabilidad de los bosques nicaragüenses a los efectos del cambio climático y la importancia de considerar estos factores para la conservación y manejo forestal en el futuro.

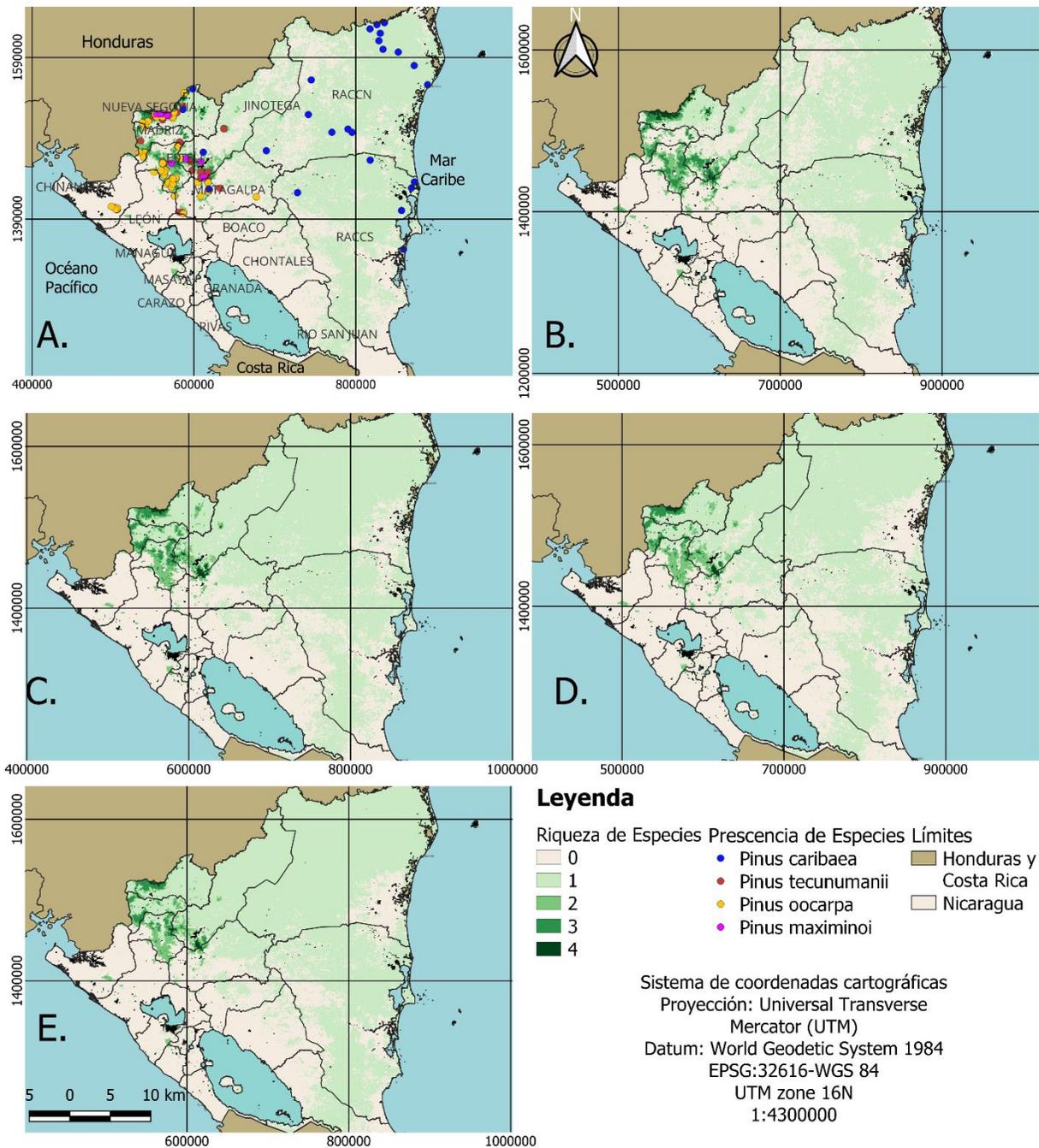


Figura 11 Efecto del Cambio Climático en los bosques de Nicaragua bajo tres escenarios: SSP2- 4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5; A. Puntos de presencia de las especies de *Pinus* en Nicaragua. B. Distribución actual de las especies. C. Distribución de las especies para el año 2050 con SSP2-4.5. D. Distribución para el año 2050 con SSP3-7.0. E. Distribución para el año 2050 con SSP5-8.5.

Según los resultados de la **Figura 11** muestran la suma de las predicciones de las 4 especies de *Pinus* bajo escenarios de cambio climático para el 2050; y también señala que podrían experimentar reducciones significativas en la adecuación del hábitat, esto resultará en la pérdida de distribución, particularmente en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN), Región Autónoma de la Costa Caribe Sur (RACCS) y partes de la Región Norte Central y en las partes alta de la Región del Pacífico como el complejo Volcánico San Cristóbal. La disminución de especies debido al cambio climático ha sido reportada en varias especies usando MaxEnt, tal como, el estudio realizado por Cortez-Martínez (2015) de especies frutales en Mesoamérica donde se predice una disminución en las zonas de diversidad en Nicaragua y la mayor parte de la riqueza se concentra en las partes alta de Nicaragua.

Según Milán-Pérez (2009) existe riesgo de pérdida importante de la biodiversidad en muchas zonas tropicales de América Latina debido a la extinción de especies. Los cambios de precipitación y la temperatura que se predice tendrán importantes impactos en los bosques y su biodiversidad en un futuro. Sin embargo, existen ecosistemas que son muy particulares en Nicaragua, como los Bosques de Pino (submontanos y montanos) los cuales se reconoce como uno de los ecosistemas más amenazados ante el cambio climático en Nicaragua (Milán Pérez, 2009).

Como tal, los modelos de distribución bajo escenarios climáticos serán útiles para predecir como cambiara la distribución potencial de esta Familia en el territorio Nacional. Un estudio realizado por Gradis y Trujillo (2006) menciona los lugares con mayor diversidad de especies de *Pinus*, exceptuando a *P. caribaea*, son Matagalpa, Nueva Segovia, Estelí y Jinotega. Estas regiones coinciden con las áreas de mayor diversidad de especie y de mayor distribución potencial de Pinaceae, por lo tanto, la conservación en esta área es crucial. Salazar-Tortosa et al. (2024) sugiere que la migración podría mitigar los efectos de cambio climático en algunos casos.

VI. Conclusiones

Las especies de *P. tecunumanii*, *P. maximinoi* y *P. oocarpa* tienen distribuciones de aproximadamente 6,210 km², 2,740 km² y 5,099 km², respectivamente, ubicándose en la zona Nor-central de Nicaragua y algunos parches en el Pacífico. En contraste, *P. caribaea* abarca 65,030 km², con una distribución más amplia en la RACCN, RACCS y la parte central del país.

Las principales variables que impactan son la elevación (DEM) y climáticas como temperatura (Bio4, Bio6, Bio7, Bio10, Bio11), precipitación (Bio16, Bio17) y nubosidad (cloud8, cloud1). Cada especie tiene requerimientos climáticos específicos. En el escenario SSP2-4.5, DEM influye en un 86.5% y Bio17 con 38.5%; en SSP3-7.0, DEM con 90.7% y Bio17 de 22.4%; en SSP5-8.5, DEM en un 88.9% y Bio7 con 29.7%.

Las áreas vulnerables para las especies de Pinos serán para *P. maximinoi*, que podría reducirse hasta un 85%, y *P. oocarpa*, con un 31% en las tres evaluaciones. *P. tecunumanii* presenta una reducción del 17%. El cambio climático afectará la composición y distribución de *Pinus* en Nicaragua, impactando su permanencia y servicios ecosistémicos. Los sesgos en el modelo de distribución para *P. caribaea* prevé nuevas áreas idóneas en un 16%, siendo la única especie que se beneficia.

VII. Recomendaciones

- ✓ Realizar estudios adicionales sobre la modelación de especies asociadas a bosques de *Pinus*, para analizar los cambios en su distribución potencial y comparar los resultados con este estudio, con el fin de establecer prácticas consistentes para el manejo y conservación de los recursos naturales del país.
- ✓ Incluir variables bióticas como la competencia con otras especies, la interacción con plagas y enfermedades, o el cambio en la calidad del suelo; estos factores pueden tener un impacto significativo en la distribución potencial de las especies.
- ✓ Evaluar cómo las áreas protegidas o los corredores ecológicos podrían ya sea facilitar o limitar el desplazamiento de las especies en respuesta al cambio climático, con el fin de identificar las áreas de mayor importancia para la conservación y restauración de ecosistemas forestales.
- ✓ Investigar la distribución de otras especies clave para los ecosistemas de Nicaragua, como las especies endémicas o las de alto valor económico y ecológico, con el fin de obtener un panorama más amplio sobre cómo el cambio climático afecta la biodiversidad en general.
- ✓ Realizar modelos de la especie *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, de manera dividida dependiendo la zona, condiciones climáticas y registros de los individuos para evitar sesgos en sus predicciones.

VIII. Referencias bibliográficas

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., Nájera-Luna, J. A., Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., y Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52(7), 1043-1057.
- Aguirre Gutiérrez, J., y Duivenvoorden, J. F. (2010). (PDF) Can we expect to protect threatened species in protected areas ? A case study of the genus Pinus in Mexico. *Institute for Biodiversity and Ecosystems Dynamics (IBED), Universiteit van Amsterdam*, 876-882.
- Ávila Coria, R., Villavicencio García, R., y Ruiz Corral, J. A. (2014). Distribución potencial de Pinus herrerae Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(24), 92-109.
- Avila Folgar, R. I. (2003). *Evaluación del estado y crecimiento inicial de cuatro especies prioritarias (Pinus maximinoi H.E. Moore; Pinus caribaea Morelet; Pinus oocarpa Schiede y Tectona grandis L.F.) del Programa de Incentivos Forestales en la región 2, en los departamentos de Alta y Baja Verapaz, Guatemala*. Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1990>
- Barahona Mejia, V. D., Garmendia, Y. Y., Villalta Pineda, K. G., y Aguilar- Garcia, J. A. (2022). Efectos del Cambio Climático en Centroamérica. *Revista Iberoamerica de Bioeconomia y Cambio Climatico*, 8(16), 2018-2028. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15227>
- Bárcenas, M. (2015). *Modelo de la Distribución espacial y el Riesgo de extinción de especies maderales de Pinus; una aproximación al manejo forestal*. [Licenciatura,

- Universidad Nacional Autónoma de Mexico].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000729574/3/0729574.pdf>
- Beckmann, M., Václavík, T., Manceur, A. M., Šprtová, L., Von Wehrden, H., Welk, E., y Cord, A. F. (2014). GIUV: a global UV-B radiation data set for macroecological studies. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(4), 372-383.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12168>
- Benito-Garzón, M., Alía, R., Robson, T. M., y Zavala, M. A. (2011). Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20(5), 766-778. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x>
- Betanco Ponce, C. A., y Zúniga González, C. A. (2016). Cambio Climático y sus consecuencias en Nicaragua. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 2(1), 180-192. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5693>
- Chang, X., Xing, Y., Wang, J., Yang, H., y Gong, W. (2022). Effects of land use and cover change (LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106333.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106333>
- Coria, R. Á., García, R. V., y Corral, J. A. R. (2014). Distribución Potencial de Pinus herrerae Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 19.
- Cortez Martínez, S. V. (2015). *Efecto del cambio climático sobre las especies frutales más comunes en SAF con café en Mesoamérica usando modelamiento de Nicho*

Ecológico con MaxEnt para el año 2070. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León.

Cunningham Kain, M. K., Mairena Aráuz, D., y Pacheco Sebola, M. (with Instituto de Investigación y Desarrollo). (2010). *Cambio climático: Medidas de adaptación en comunidades de las regiones autónomas de la Costa Caribe de Nicaragua.* Instituto de Investigación y Desarrollo (Nitlapan).

DATAtab. (2024). *T-Test, Chi-Square, ANOVA, Regression, Correlation...*
<https://datatab.es/tutorial/spearman-correlation>

Day, T. A., y Neale, P. J. (2002). Effects of UV-B Radiation on Terrestrial and Aquatic Primary Producers*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 33(Volume 33, 2002), 371-396.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150434>

Defries, R. S., y Townshend, J. R. G. (1999). Global land cover characterization from satellite data: From research to operational implementation? *Global Ecology and Biogeography*, 8(5), 367-379. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00139.x>

del-Val, E., y Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (coleoptera: Curculionidae) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 20(2), 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.006>

Delgado Cueva, T. (2011). *EVOLUCIÓN DE LA DIVERSIDAD VEGETAL EN ECUADOR ANTE UN ESCENARIO DE CAMBIO GLOBAL* [Universidad Complutense de Madrid]. <https://bibdigital.rjb.csic.es/medias/7e/43/79/35/7e437935-184c-4407-bd15-eddb753fc582/files/7156.pdf>

- Fiveable. (2025). *Habitat suitability—(Intro to Botany)—Vocab, Definition, Explanations*.
<https://library.fiveable.me/key-terms/introduction-botany/habitat-suitability>
- Garbrecht, J., y Martz, L. W. (2000). *Digital Elevation Model Issues in water resources Modeling*. proceedings.esri.com.
<https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>
- Gil, G. E., y Lobo, J. M. (2012). El uso de modelos predictivos de distribución para el diseño de muestreos de especies poco conocidas. *Mastozoología neotropical*, 19(1), 47-62.
- Global Biodiversity Information Facilities (GBIF). (2024). *Especies de Pinus spp.*
<https://www.gbif.org/species/5285740>
- Gradis, J., y Trujillo, M. (2006). *Estructura de la vegetación en poblaciones de Pinus tecunumanii Eguluz & J. P. Perry en la región norcentral de Nicaragua* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León.
- Guzmán-Santiago, J. C., Santos-Posadas, H. M. D. los, Ángeles-Pérez, G., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., Rodríguez-Ortiz, G., y Corona-Núñez, R. O. (2024). Efecto del cambio climático en la distribución de las especies de clima templado en Oaxaca, México. *Botanical Sciences*, 39-53.
<https://doi.org/10.17129/botsci.3355>
- Harrisson, T., y Hauspadre, Z. (2019). *CMIP6: The next generation of climate models explained*. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>

- Hernández Quiroz, N. S., y Badano, E. I. (2017). Cambio climático y bosques de encinos. *Ciencia*, 68(4), 70-75.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hijmans, R. J., Phillips, S., Leathwick, J., y Elith, J. (2012). *dismo: Modelado de distribución de especies* (Versión 1.3-14) [Java]. <https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/index.html>
- INETER. (2022). *Perspectiva del probable comportamiento de las lluvias durante el período diciembre 2021, enero, febrero y marzo 2022 (APANTE)* (p. 11). INETER. [https://www.ineter.gob.ni/boletines/Boletin%20Perspectiva%20periodo%20lluvias o/PERSPECTIVAS-LLUVIAS-DEFM_2021-2022-2.pdf](https://www.ineter.gob.ni/boletines/Boletin%20Perspectiva%20periodo%20lluvias%20o/PERSPECTIVAS-LLUVIAS-DEFM_2021-2022-2.pdf)
- INETER. (2025). *Boletín de seguimiento al fenómeno El Niño – Oscilación del Sur*. <https://www.ineter.gob.ni/boletines/Boletin%20ENSO/2025/BoletinENSO012025.pdf>
- IPCC. (2021). *Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (Sexta edición). Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jayat, J. P., y Pacheco, S. (2006). Distribución de *Necromys lactens* y *Phyllotis osilae* (Rodentia: Cricetidae: Sigmodontinae) en el noroeste argentino: modelos predictivos basados en el concepto de nicho ecológico. *Mastozoología neotropical*, 13(1), 69-88.

- Jiménez, M. Á. S., y Méndez, J. G. (2021). Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 27(3), 14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732117>
- Joshi, N., Baumann, M., Ehammer, A., Fensholt, R., Grogan, K., Hostert, P., Jepsen, M. R., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Mitchard, E. T. A., Reiche, J., Ryan, C. M., y Waske, B. (2016). A Review of the Application of Optical and Radar Remote Sensing Data Fusion to Land Use Mapping and Monitoring. *Remote Sensing*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/rs8010070>
- Karra, Kontgis, y Esri. (2021). *Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series (Mature Support)—Información general*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d3da5dd386d140cf93fc9ecbf8da5e31>
- Leal-Nares, Ó., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D., Geneletti, D., López-Granados, E., y Carranza, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: Un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(4), 1152-1170. <https://doi.org/10.7550/rmb.27199>
- Leguía, E., Locatelli, B., y Imbach, P. (2009). Impacto del cambio climático en plantaciones forestales en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambientales*, 56-57, 150-159.
- Lin, L., He, J., Xie, L., y Cui, G. (2020). Prediction of the Suitable Area of the Chinese White Pines (*Pinus subsect. Strobilus*) under Climate Changes and Implications for Their Conservation. *Forests*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/f11090996>

- MAGFOR. (2013). *Plan de Adaptación a la variabilidad y el Cambio Climático en el Sector Agropecuario, Forestal y Pesca en Nicaragua*. Ministerio Agropecuario y Forestal.
<https://faolex.fao.org/docs/pdf/nic148691.pdf>
- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., y Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Universidad Autónoma de Nuevo León. Mexico*, 25(2), 16. <https://doi.org/10.21829>
- MARENA/POSAF II. (2006). *Manejo de Bosque de Pino en Nicaragua*. Programa Socioambiental y Desarrollo Forestal.
- Martínez, Y. C. (2018). Modelación de hábitats en *Pinus caribaea* var. *Caribaea* Barrett y Golfari y *Pinus tropicalis* Morelet. *Ciencias Forestales y Ambientales*, 3(1), Article 1.
- Martínez-Méndez, N., Planter, E. A., Eguiarte, L. E., y Correa, J. P. J. (2016). Ecological niche modeling of species of the genus *Abies* (Pinaceae) in Mexico: Some taxonomic and conservation implications. *Botanical Sciences*, 49(1), 20. <https://doi.org/10.17129/botsoci.508>
- Méndez-Encina, F. M., Méndez-González, J., Mendieta-Oviedo, R., López-Díaz, J. Ó. M., y Nájera-Luna, J. A. (2021). Ecological Niches and Suitability Areas of Three Host Pine Species of Bark Beetle *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Forests*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/f12040385>
- Milán Pérez, J. A. (2009). *Apuntes sobre el Cambio Climático en Nicaragua* (1a ed.). FAO.
<https://coin.fao.org/coin->

static/cms/media/5/12802494073060/apuntes_sobre_cambio_climatico_en_nicaragua.pdf

- Miranda, R. P., Sánchez, M. E. R., Hernández, A. G., Mata, S. R., Sánchez, F. M., y Padilla, V. J. A. (2019). Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. INIFAP.*
- Miranda-Sierra, C. A., López, G. G., y Sospedra, R. S. (2017). Modelación de hábitats potenciales de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barrett y Golfari en el occidente de Cuba. *Centro de Información y Gestión Tecnológica (CIGET)*, 19(1), 10.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., y New, M. (2004). A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: The observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Tyndall Centre for Climate Change Research*, 30.
- Mitchell, T. D., y Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25(6), 693-712. <https://doi.org/10.1002/joc.1181>
- Mondragón Barrera, M. A. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Ibero americana*, 8(1), 8.
- Monterrubio-Rico, T. C., Villaseñor-Gómez, L. E., Marín, M. C., López-Cordova, E. A., Fabian-Turja, B., y Sorani-Dalbon, V. (2007). Distribución histórica y actual del loro cabeza amarilla (*Amazona oratrix*) en la costa central del Pacífico mexicano:

Ventajas y limitaciones en el uso de GARP en especies bajo fuerte presión de tráfico. *Ornitología Neotropical*, 18, 263-276.

Mora-Donjuán, C. A., y Alanís-Rodríguez, E. (2016). Resiliencia de bosques de pino – encino en América: Una visión global del estado actual. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 01-02. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v13i33.2571>

Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., y Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>

Naciones Unidas, Cepal. (2024). *Acerca de Cambio climático*. CEPAL; Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/temas/cambio-climatico/acerca-cambio-climatico>

Ortega, K. (2021). *Modelado de la Distribución Actual y Futura de Pinus hartwegii Lindl. Bajo escenarios de cambio climático en México* [Máster, Instituto de Enseñanza en Investigación en Ciencias Agrícolas]. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/4685/Ortega_Rivera_K_MC_Botanica_2021.pdf;jsessionid=87AE1DEA96552F93D57DACF001E9B5F5?sequence=1

OSINFOR. (2013). *Modelamiento espacial de nichos ecológicos para la evaluación de presencia de especies forestales maderables en la Amazonía peruana* (1.^a ed.). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1016321/modelamiento_nichos_ecologicos20200716-31706-1vqoc9m.pdf?v=1594954842

- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., y Peterson, A. T. (2007). (PDF) ORIGINAL ARTICLE: Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *ResearchGate*, 34, 102-117.
- Peterson, A. T., Soberón, J., y Sánchez-Cordero, V. (1999). (PDF) Conservatism of Ecological Niches in Evolutionary Time. *ResearchGate*, 285, 1265-1267. <https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1265>
- Phillips, S. (2005). *A Brief Tutorial on Maxent*. Network of Conservation Educators and Practitioners, Center for Biodiversity and Conservation, American Museum of Natural History. <https://www.amnh.org/content/download/141371/2285439/file/a-brief-tutorial-on-maxent.pdf>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. 190, 231-259.
- Phillips, S. J., y Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Plasencia Vázquez, A. H., y Escalona Segura, G. (2014). Caracterización del área de distribución geográfica potencial de las especies de aves psitácidas de la Península de Yucatán, México. *Revista de Biología Tropical*, 62(4), 1509-1522.
- Polidori, L., y El Hage, M. (2020). Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs12213522>

- QGIS. (2002). *Guía/Manual del servidor QGIS. 28.2.5. Proyecciones ráster— Documentación de QGIS.*
https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/processing_algs/gdal/rasterprojections.html#warp-reproject
- QGIS. (2024). *QGIS overview · QGIS Web Site.* <https://qgis.org/project/overview/>
- Ramirez-Villegas, J., y Jarvis, A. (2010). *Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1.* International Center for Tropical Agriculture, CIAT.
<https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/730cf893-66fa-4ccf-a6f5-7173fb62ae79/content>
- Ramos-Dorantes, D. B., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., y Gernandt, D. S. (2017). Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1), 215-223.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.028>
- Reguerin López, J. (2012). *Distribución Potencial de especies de la familia Araliaceae en la región de Madidi.* [Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andres].
https://madidiproject.weebly.com/uploads/1/8/6/0/18603232/itla_2012.pdf
- Reynoso Santos, R., Pérez Hernández, M. J., López Báez, W., Hernández Ramos, J., Muñoz Flores, H. J., Cob Uicab, J. V., Reynoso Santos, M. D., Reynoso Santos, R., Pérez Hernández, M. J., López Báez, W., Hernández Ramos, J., Muñoz Flores, H. J., Cob Uicab, J. V., y Reynoso Santos, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista*

mexicana de ciencias forestales, 9(48), 47-68.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.114>

Rezayé Álvarez. (2016). *Nicaragua vive la peor crisis ambiental*. La Prensa.

<https://www.laprensani.com/2016/04/22/nacionales/2022786-nicaragua-vive-la-peor-crisis-ambiental>

Ribeiro Barboza, B. (2020). *Modelos de dinâmica espaço-temporal do tripses *Frankliniella**

schultzei em cultivos de tomate usando o CLIMEX [Licenciatura, Universidade Federal de Sergipe].

https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/13242/2/Bruno_Ribeiro_Barboza.pdf

Rivera, C. G., Funes-Hernández, K. T., Merino-Villalta, J. F., y Beltrán-Sánchez, A. V.

(2021). Guía para el modelo de distribución de especies por Máxima Entropía, estudio de caso de la “lora nuca amarilla” *Amazona auropalliata* en El Salvador.

Revista Minerva, 4(2), 125-142. <https://doi.org/10.5377/revminerva.v4i2.12402>

Rosas Ávila, J. C. (2008). *Ecogeografía del género *Pinus* (Linnaeus, 1753) en la subcuenca Tecuantepec—Apulco, México*. [Master]. Instituto Politécnico Nacional.

Sáenz, C. (2015). Efectos potenciales del cambio climático en los recursos forestales. La sabanización de las regiones continentales de México. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 20.

Salazar-Tortosa, D. F., Saladin, B., Castro, J., y Rubio de Casas, R. (2024). Climate

change is predicted to impact the global distribution and richness of pines (genus *Pinus*) by 2070. *Diversity and Distributions*, 30(7), 1-17.

<https://doi.org/10.1111/ddi.13849>

- Salinas, M. (2007). Modelos de regresión y correlación IV: Correlación de Spearman. *Cienc. Trab*, 143-145.
- Sánchez-Cordero, V., Townsend Peterson, A., y Escalante-Pliego, P. (2001). El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad*, 359-379.
- Scheldeman, X., y Zonneveld, M. V. (2011). *Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas*. Bioersivity International.
- Serrada, R., Aroca, M., Roig, S., Bravo, A., y Gómez, V. (2011). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/SECTOR%20FORESTAL_DOCUMENTO%20COMPLETO_tcm30-178472.pdf
- Siles, G., Bastida, J., Rey, P. J., y Alcántara, J. (2005). Modelos predictivos de distribución de especies de vegetación potencial en el incendio del «Puerto de las Palomas, Sierra de Cazorla», Jaen. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 20, Article 20. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i20.9533>
- Soberón, J., y Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *PNAS*, 106(2), 19644-19650.
- Song, Y., Xu, X., Zhang, S., y Chi, X. (2024). Uncertainty Assessment of Species Distribution Prediction Using Multiple Global Climate Models on the Tibetan

- Plateau: A Case Study of *Gentiana yunnanensis* and *Gentiana siphonantha*. *Land*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/land13091376>
- Stevens, W. (1995, 2024). *Introducción-Vegetación*. Flora de Nicaragua. <https://www.mobot.org/mobot/research/nicaragua/vegetacion.shtml>
- Styles, B. T. (2009). Pinaceae *Spreng. Ex Rudolfo*. Flora de Nicaragua. <http://legacy.tropicos.org/Name/42000417?projectid=7>
- Sun, X., Xu, y Lou. (2020). (PDF) A Maximum Entropy Model Predicts the Potential Geographic Distribution of *Sirex noctilio*. *Forests*, 11(175), 12. <https://doi.org/10.3390/f11020175>
- Tórrez, C. (2017). *Menos bosques de pino en el país*. La Prensa. <https://www.laprensani.com/2017/01/10/nacionales/2162595-menos-bosques-pino-pais>
- Treminio, E., y Tinoco, Á. (2014). *Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial de especies de pinos (Pinus sp.) y encinos (Quercus sp.) en Mesoamérica* [Licenciatura]. Universidad Católica del Trópico Seco Pbro. Francisco Luis Espinoza Pineda.
- United Nations. (2024). *Informes | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/reports>
- van Zonneveld, M., Jarvis, A., Dvorak, W., Lema, G., y Leibing, C. (2009). Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management*, 257(7), 1566-1576. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.027>

Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R., y Fernández-González, F. (2014).

Macroecología y ecoinformática: Sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *AEET*, 23(1), 46-53. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-1.07>

Wang, X., Li, Z., Zhang, L., Wang, Y., Liu, Y., y Ma, Y. (2024). The optimized Maxent model

reveals the pattern of distribution and changes in the suitable cultivation areas for *Reaumuria songarica* being driven by climate change. *Ecology and evolution*, 20.

<https://doi.org/10.1002/ece3.70015>

WorldClim. (2022). *Bioclimatic variables*. WorldClim.

<https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>

IX. Anexos

Tabla 7 Variables Bioclimáticas en WorldClim

Variable	Descripción	Unidad de medida
Bio1	Temperatura promedio anual.	°C
Bio2	Oscilación diurna de la temperatura.	°C
Bio3	Isotermalidad= $BIO2/BIO7*100$	°C
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100).	°C
Bio5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido.	°C
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío.	°C
Bio7	Oscilación anual de la temperatura. (BIO5-BIO6)	°C
Bio8	Temperatura media del mes más húmedo.	°C
Bio9	Temperatura media del mes más seco.	°C
Bio10	Temperatura media del cuatrimestre más cálido.	°C
Bio11	Temperatura media del cuatrimestre más frío.	°C
Bio12	Precipitación anual.	mm
Bio13	Precipitación del periodo más húmedo.	mm
Bio14	Precipitación del periodo más seco.	mm
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)	
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo.	mm
Bio17	Precipitación del trimestre más seco.	mm
Bio18	Precipitación del cuatrimestre más cálido.	mm
Bio19	Precipitación del cuatrimestre más frío.	mm

Fuente: (Rivera et al., 2021)

Tabla 8 Variables Climáticas de Suelo, DEM, Radiación UV-B y nubosidad

Variable	Descripción	Unidad de medida
DEM	Altitud	msnm
Variables de suelo		
Uso de suelo	Ocupación de un espacio determinado, y se refiere a las actividades que se pueden realizar de él.	----
Contenido de arcilla	Proporción de partículas finas de arcilla en la mezcla de suelo, en comparación con otras partículas.	g/kg
Limo	Partícula del suelo que se encuentra entre la arena y la arcilla en tamaño	g/kg
Volumen de agua	Relación entre el volumen de agua y el volumen del suelo	KPa
Nitrógeno	Nutriente crucial para el crecimiento de las plantas y se encuentra principalmente en forma de materia orgánica.	cg/kg
pH de agua	Medida de su acidez o alcalinidad	pH*10
Carbono orgánico	Carbono que se encuentra almacenado en la materia orgánica del suelo	dg/kg
Capacidad de intercambio catiónico	Capacidad del suelo para retener y liberar iones positivos, o cationes, nutrientes esenciales para las plantas.	mol (c)/kg
Variables de radiación UV-B		
UV-B 1	Promedio anual de radiación UV-B	J/m ² /día
UV-B 2	Estacionalidad de la radiación UV-B	J/m ² /día
UV-B 3	Promedio de UV-B del mes más alto	J/m ² /día
UV-B 4	Promedio de UV-B del mes más bajo	J/m ² /día

UV-B 5	Suma de la media mensual de UV-B durante el trimestre más alto	J/m ² /día
UV-B 6	UVB6 - Suma de la media mensual de UV-I durante el trimestre más bajo	J/m ² /día
Variables de Nubosidad		
Cloud 1 a la 12	Se obtuvieron a partir de las climatologías existentes de luz solar y humedad relativa	

Fuente: Elaboración Propia.

Mapas de distribución Actual por especie.

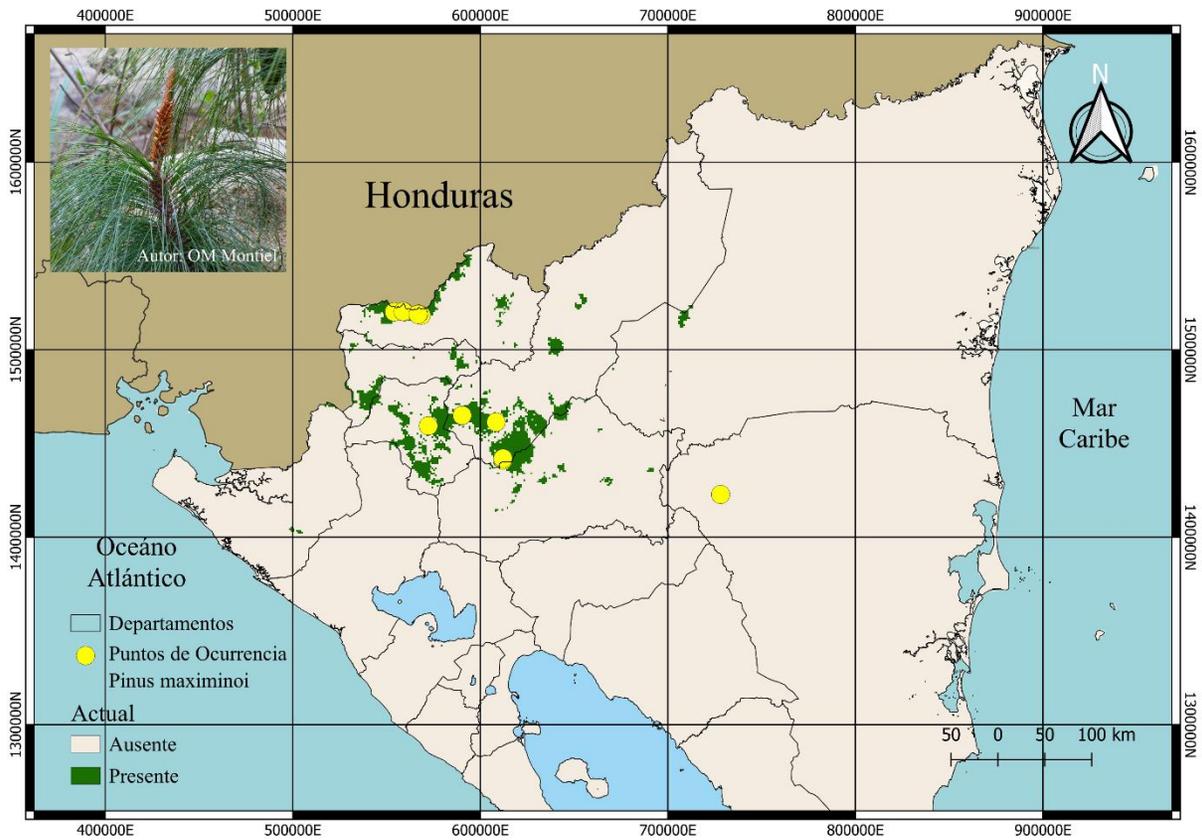


Figura 12 Puntos de Ocurrencia y distribución actual de *Pinus maximinoi*

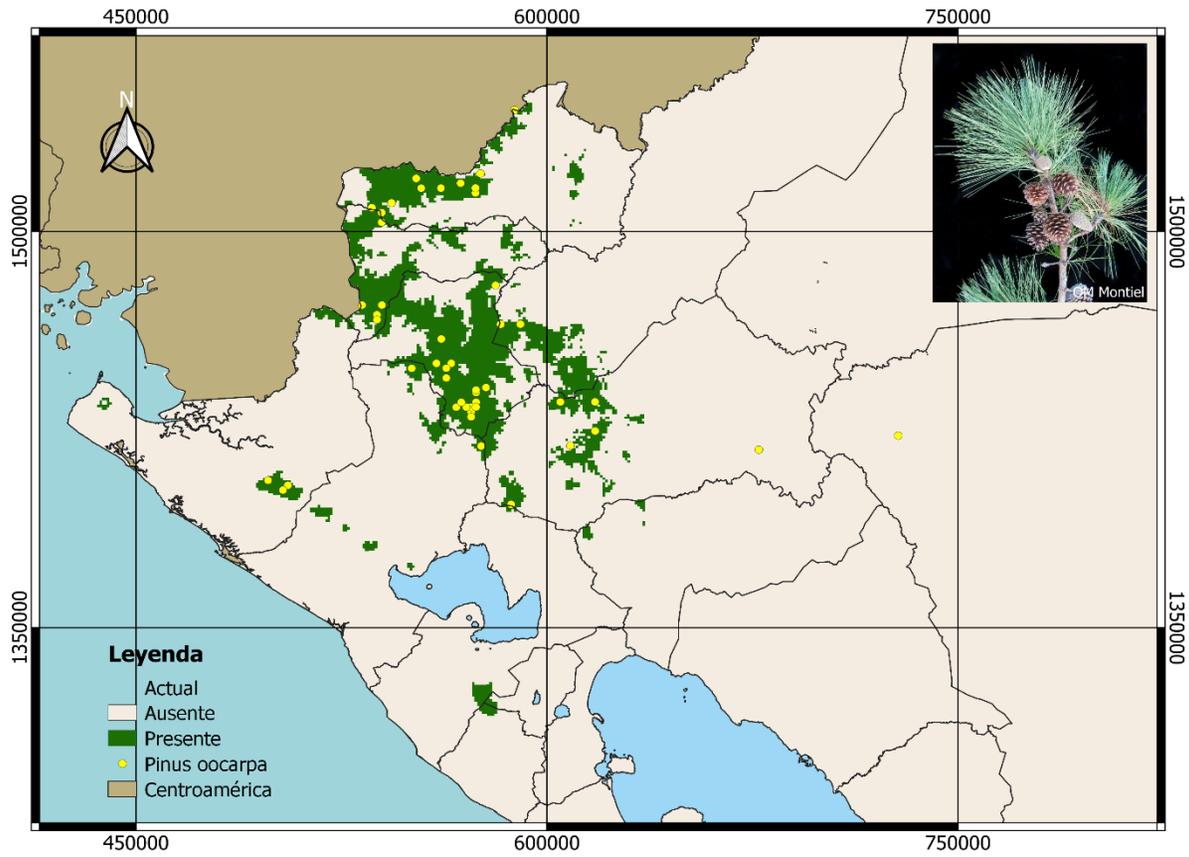


Figura 13 Punto de Ocurrencia y distribución actual de *Pinus oocarpa*

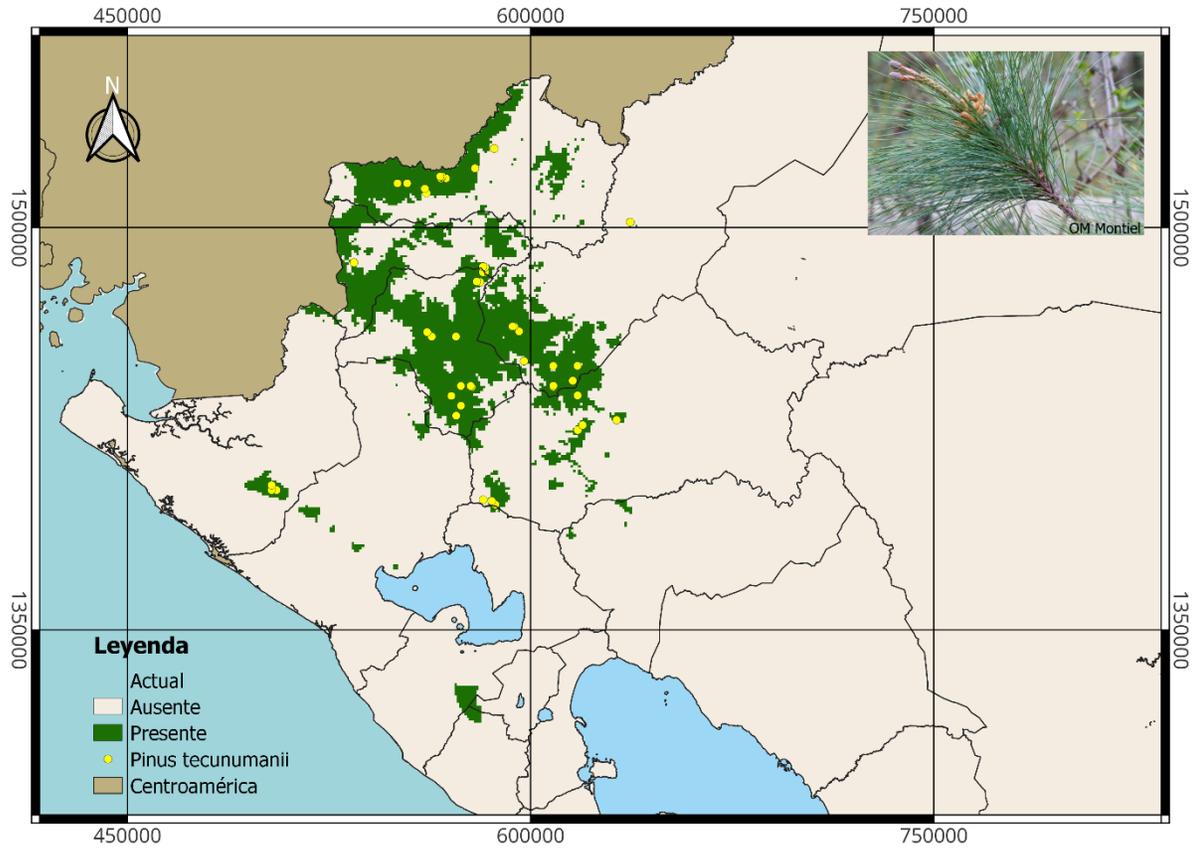


Figura 14 Puntos de Ocurrencia y Distribución Actual de *Pinus tecunumanii*

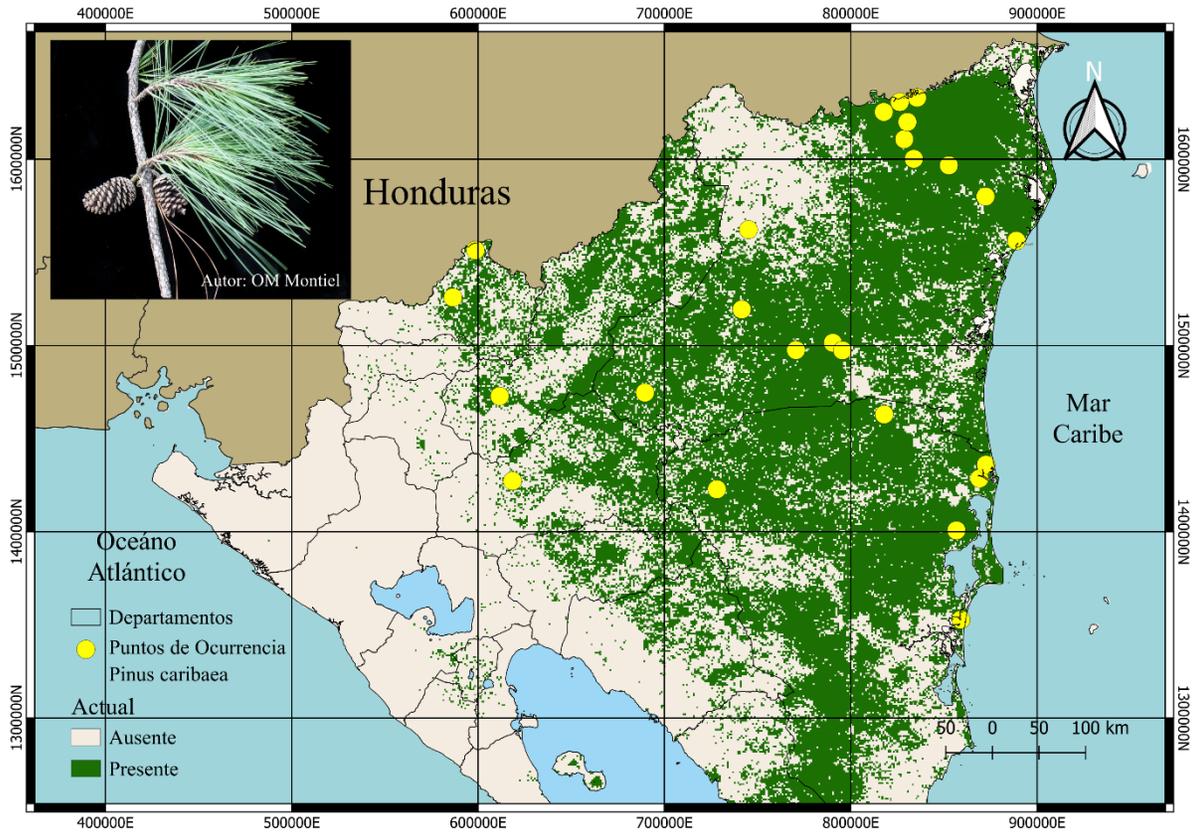


Figura 15 Puntos de Ocurrencia y Distribución Actual de *Pinus caribaea*

Correlación de Spearman con las variables usadas para el Modelo.

Pinus maximinoi H.E. Moore

Tabla 9 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para *Pinus maximinoi*

Correlaciones								
	Bio11	Bio10	Bio7	UVB3	Limo	DEM	Cloud3	Uso de suelo
Bio11	1.000	,738**	-0.158	0.485	0.142	-,748**	-0.275	
N	15	14	12	15	15	15	15	12
Bio10		1.000	0.283	0.308	-0.102	-,707**	-0.349	
N	14	14	12	14	14	14	14	11
Bio7			1.000	-,755**	0.327	-0.422	-,673*	
N	12	12	12	12	12	12	12	10
UVB3				1.000	-0.050	-0.008	0.142	
N	15	14	12	16	16	16	16	13
Limo					1.000	0.147	-0.156	
N	15	14	12	16	16	16	16	13
DEM						1.000	0.349	
N	15	14	12	16	16	16	16	13
Cloud3							1.000	
N	15	14	12	16	16	16	16	13
Uso de suelo								1.000
N	12	11	10	13	13	13	13	13

Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa*

Tabla 10 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para *Pinus oocarpa*

		Correlaciones											
		Bio17	Bio16	Bio7	Bio6	Bio2	pH de agua	UVB4	UVB1	DEM	Cloud8	Cloud1	Intercambio catiónico
Bio17		1.000	0.266	0.117	-,428**	0.123	-0.166	-,374*	-,485**	0.269	0.296	0.323	-,528**
N		38	32	34	36	34	38	38	38	37	38	35	38
Bio16			1.000	-,632**	-,508**	-,791**	-,392*	0.090	-0.079	,402*	-0.031	-0.331	-0.052
N		32	34	34	34	33	34	34	34	34	34	34	34
Bio7				1.000	0.065	,799**	,428**	-0.073	-0.040	-0.316	0.147	,559**	-0.215
N		34	34	36	36	34	36	36	36	36	36	36	36
Bio6					1.000	0.228	0.283	0.064	,418**	-,785**	0.247	0.022	0.205
N		36	34	36	38	35	38	38	38	38	38	36	38
Bio2						1.000	,542**	-0.255	-0.169	-0.237	-0.086	0.319	0.192
N		34	33	34	35	36	36	36	36	36	36	34	36
pH de agua							1.000	0.062	-0.035	-,395*	-,324*	-0.125	,435**
N		38	34	36	38	36	40	40	40	39	40	37	40
UVB4								1.000	,317*	-0.068	-,425**	-,430**	,323*
N		38	34	36	38	36	40	40	40	39	40	37	40
UVB1									1.000	-0.178	0.062	-0.044	0.060
N		38	34	36	38	36	40	40	40	39	40	37	40
DEM										1.000	-0.286	-0.109	-0.209
N		37	34	36	38	36	39	39	39	39	39	36	39
Cloud8											1.000	,758**	-,601**
N		38	34	36	38	36	40	40	40	39	40	37	40
Cloud1												1.000	-,616**
N		35	34	36	36	34	37	37	37	36	37	37	37
Intercambio catiónico													1.000

N	38	34	36	38	36	40	40	40	39	40	37	40
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Pinus tecunumanii F. Schwerdtf. ex Eguluz & JP Perry

Tabla 11 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para *Pinus tecunumanii*

		Correlaciones								
	Bio17	Bio16	Bio6	Bio4	pH de agua	DEM	Cloud10	Cloud8	Cloud1	
Bio17	1.000	0.360	-,513**	0.208	-0.163	,459*		-0.197	0.138	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
Bio16		1.000	-0.083	,616**	0.143	0.187		0.100	,505**	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
Bio6			1.000	-0.160	,462*	-,535**		0.111	-0.167	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
Bio4				1.000	-0.193	0.361		,457*	,595**	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
pH de agua					1.000	-0.360		-,573**	-,536**	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
DEM						1.000		-0.038	0.256	
N	25	25	25	25	25	25	19	25	21	
Cloud10							1.000			
N	23	23	23	23	23	19	23	23	23	
Cloud8								1.000	,596**	
N	30	30	30	30	30	25	23	30	26	
Cloud1									1.000	
N	26	26	26	26	26	21	23	26	26	

Pinus caribaea var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari

Tabla 12 Análisis de correlación de Spearman a Variables bioclimáticas utilizadas para *Pinus caribaea*

	Correlaciones									
	Uso de suelo	pH de agua	Nitrógeno	Carbono orgánico	Limo	Capa de arcilla	Bio17	Bio7	Bio6	Bio4
Uso de suelo	1.000	-0.278	-0.001	0.333	-0.010	-0.078	0.234	-0.182	-0.104	0.036
N	28	26	23	28	28	28	24	25	24	28
pH de agua		1.000	0.032	-0.060	,487*	0.030	-,742**	-0.064	,424*	-0.365
N	26	26	21	26	26	26	24	25	24	26
Nitrógeno			1.000	,572**	0.041	0.055	-0.030	-,617**	,687**	-,708**
N	23	21	23	23	23	23	19	20	19	23
Carbono orgánico				1.000	0.344	-0.186	-0.187	-,795**	,585**	-,535**
N	28	26	23	28	28	28	24	25	24	28
Limo					1.000	-,544**	-,669**	-,611**	,725**	-,576**
N	28	26	23	28	28	28	24	25	24	28
Capa de arcilla						1.000	0.128	0.294	-0.324	0.332
N	28	26	23	28	28	28	24	25	24	28
Bio17							1.000	0.341	-,523**	,659**
N	24	24	19	24	24	24	24	24	24	24
Bio7								1.000	-,788**	,615**
N	25	25	20	25	25	25	24	25	24	25
Bio6									1.000	-,741**
N	24	24	19	24	24	24	24	24	24	24
Bio4										1.000
N	28	26	23	28	28	28	24	25	24	28

Curva de AUC

Pinus maximinoi H.E. Moore

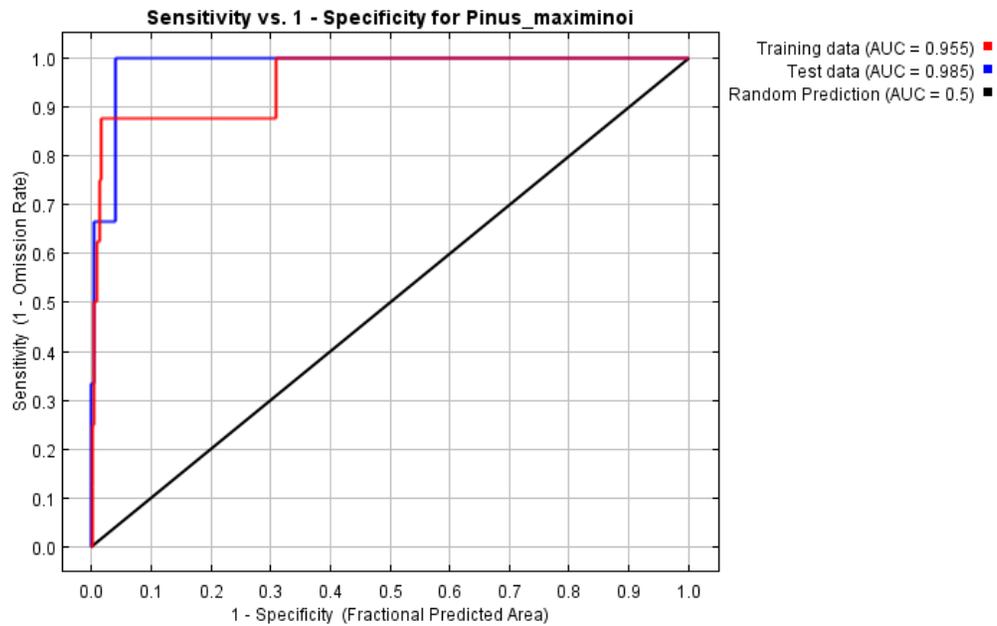


Figura 16 Valores de AUC para *P. maximinoi* Actual.

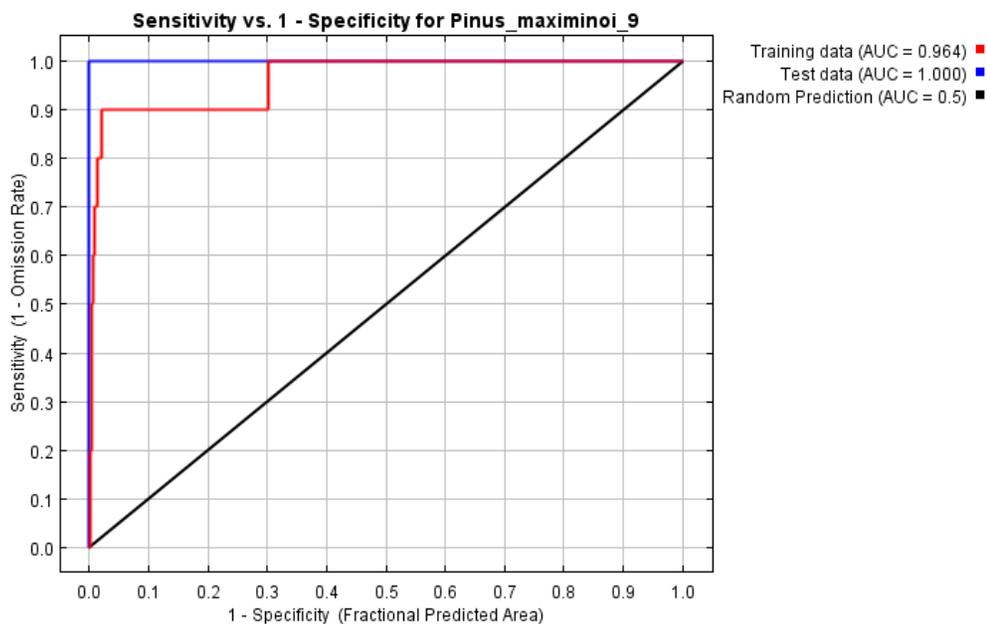


Figura 17 Valores de AUC para *P. maximinoi* en el escenario SSP2-4.5

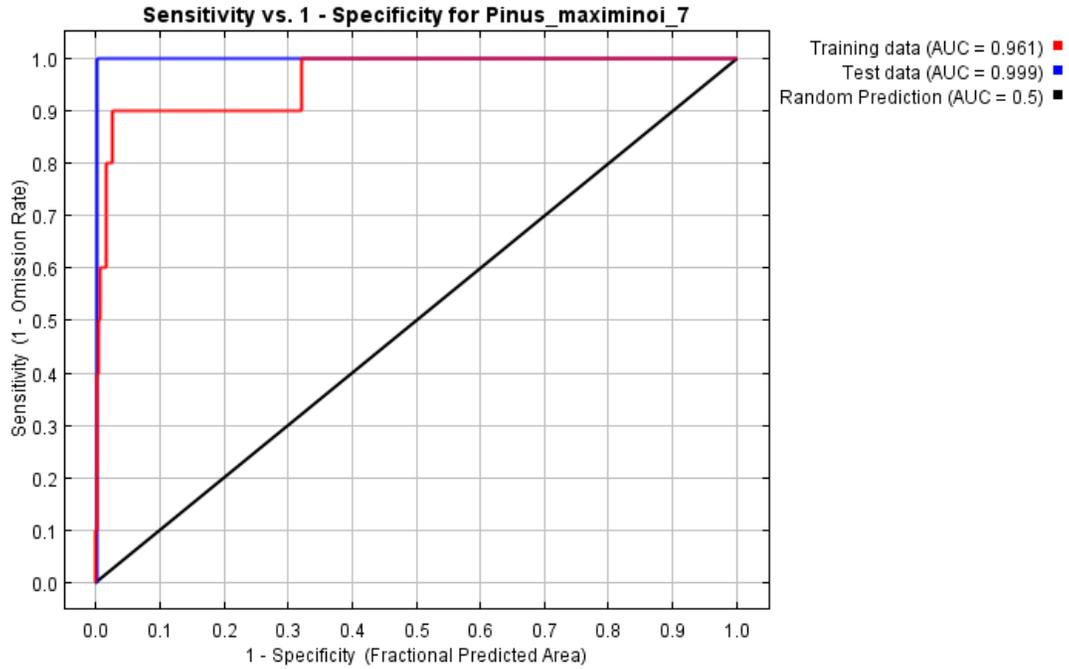


Figura 18 Valores de AUC para *P. maximinoi* en el escenario SSP3-7.0

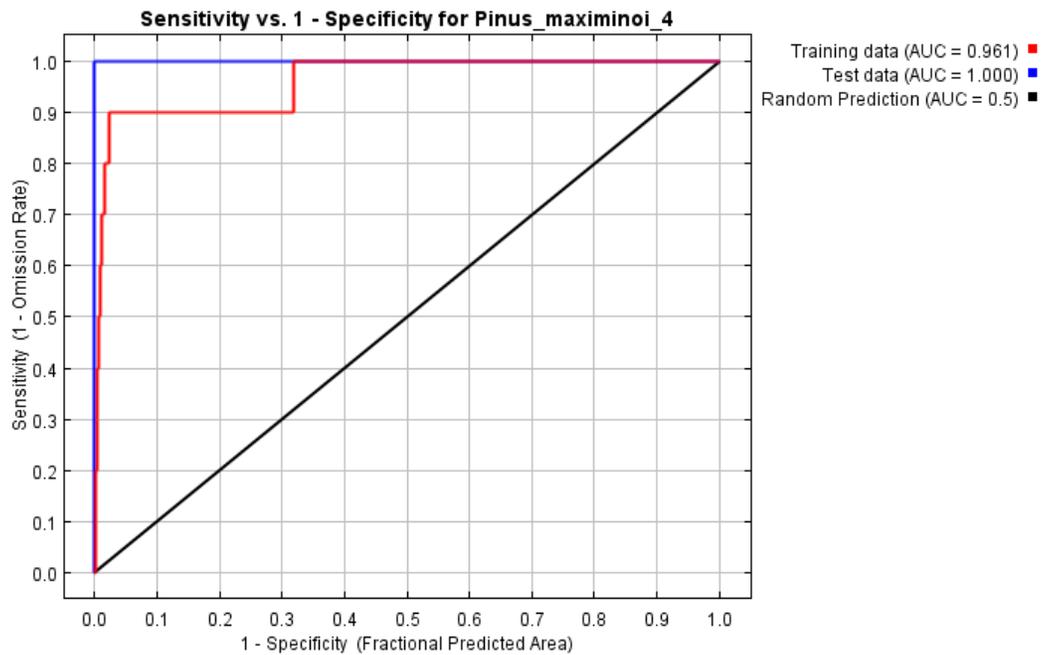


Figura 19 Valores de AUC para *P. maximinoi* en el escenario SSP5-8.5.

***Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari**

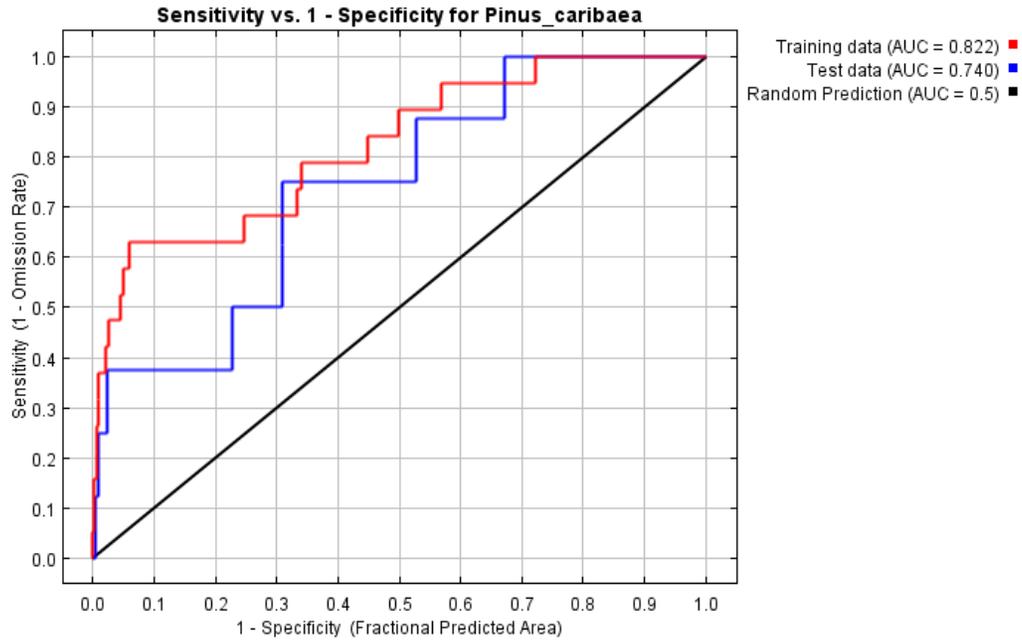


Figura 21 Valores de AUC para *P. caribaea* Actual.

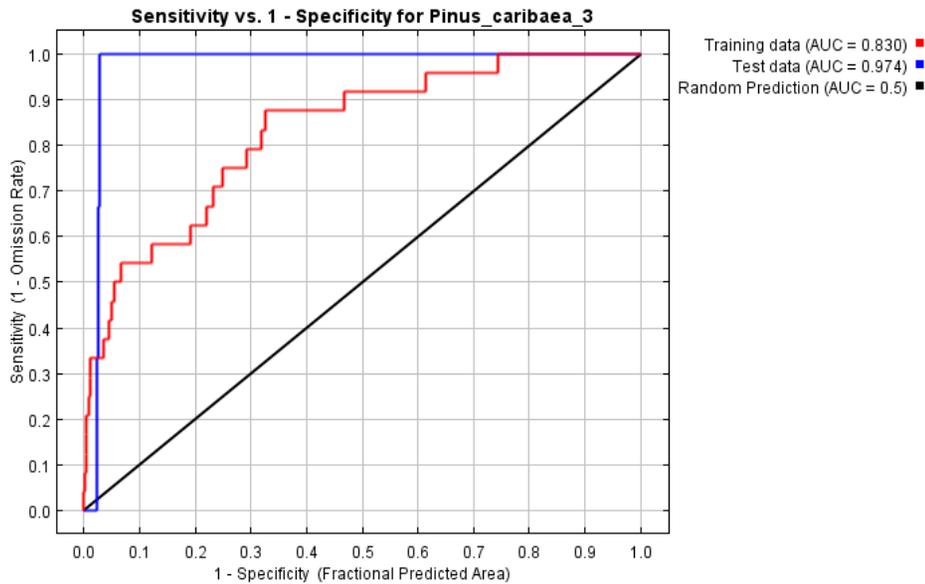


Figura 20 Valores de AUC para *P. caribaea* en el escenario SSP2-4.5

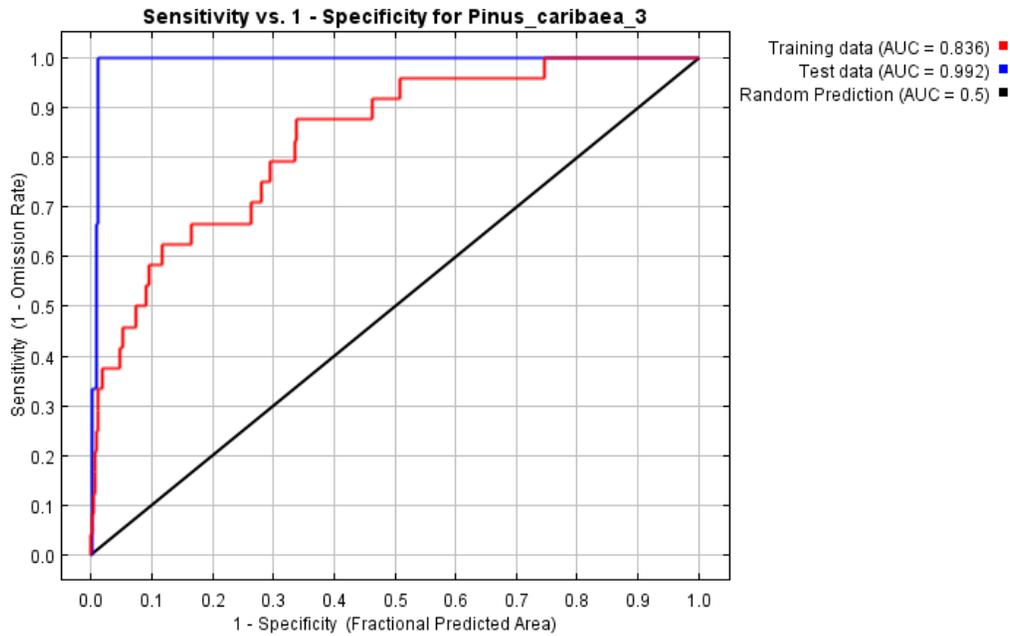


Figura 22 Valores de AUC para *P. caribaea* en el escenario SSP3-7.0

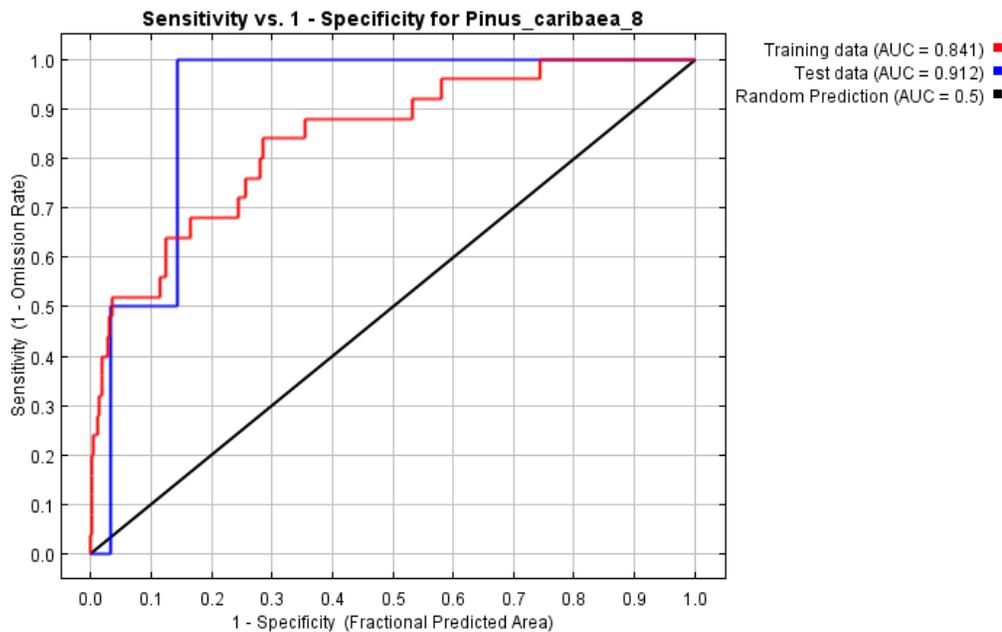


Figura 23 Valores de AUC para *P. caribaea* en el escenario SSP5-8.5

Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. var. *oocarpa

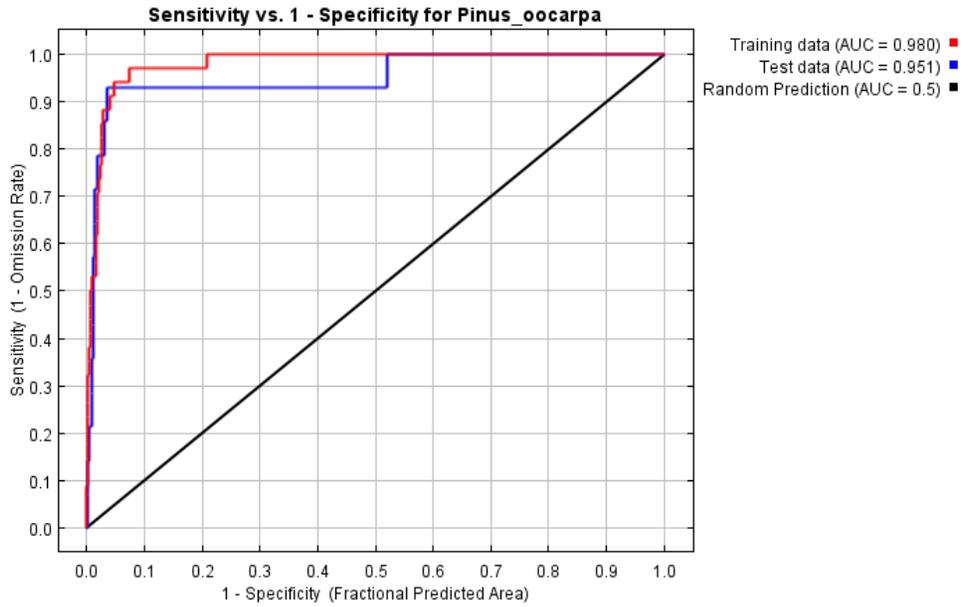


Figura 25 Valores de AUC para *P. oocarpa* Actual

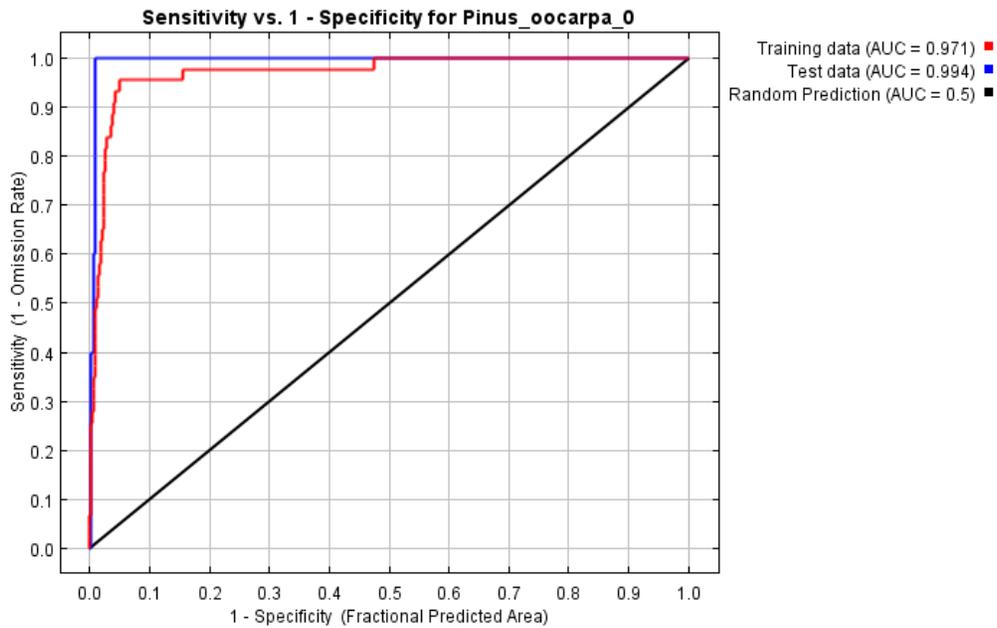


Figura 24 Valores AUC para *Pinus oocarpa* en el escenario SSP2-4.5

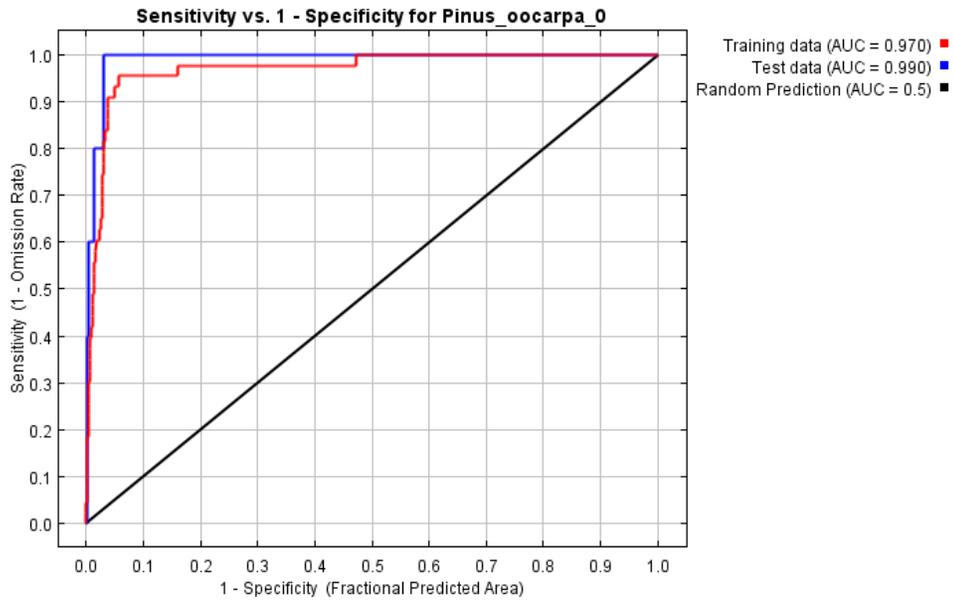


Figura 27 Valores AUC para *Pinus oocarpa* en el escenario SSP3-7.0.

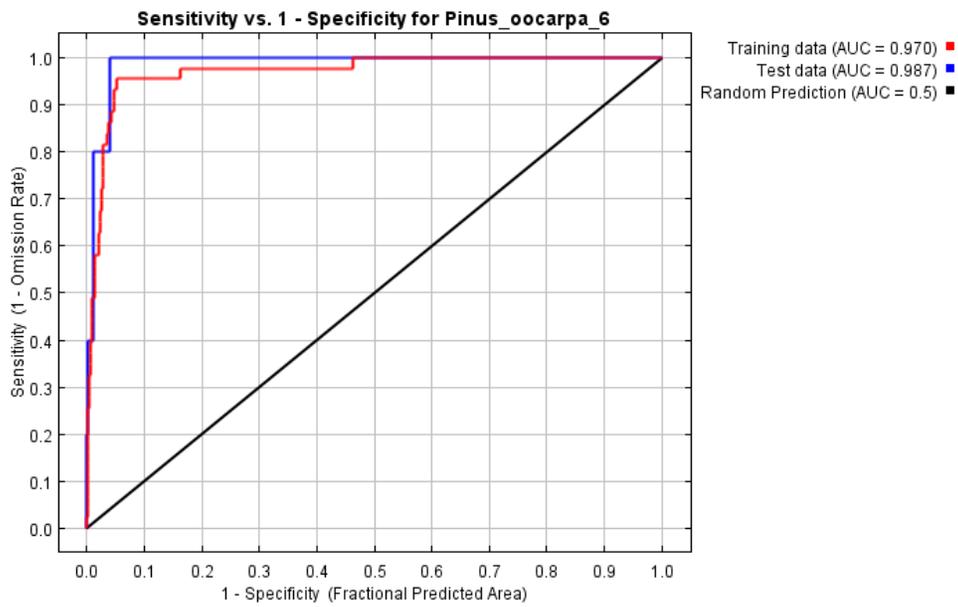


Figura 26 Valores AUC para *Pinus oocarpa* en el escenario SSP5-8.5

***Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & JP Perry**

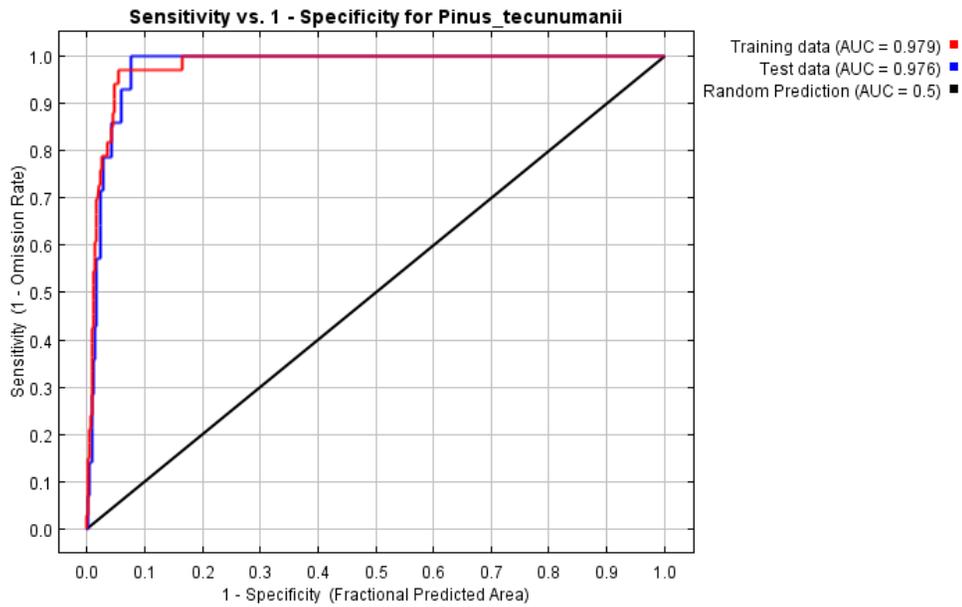


Figura 28 Valores de AUC para *P. tecunumanii* Actual.

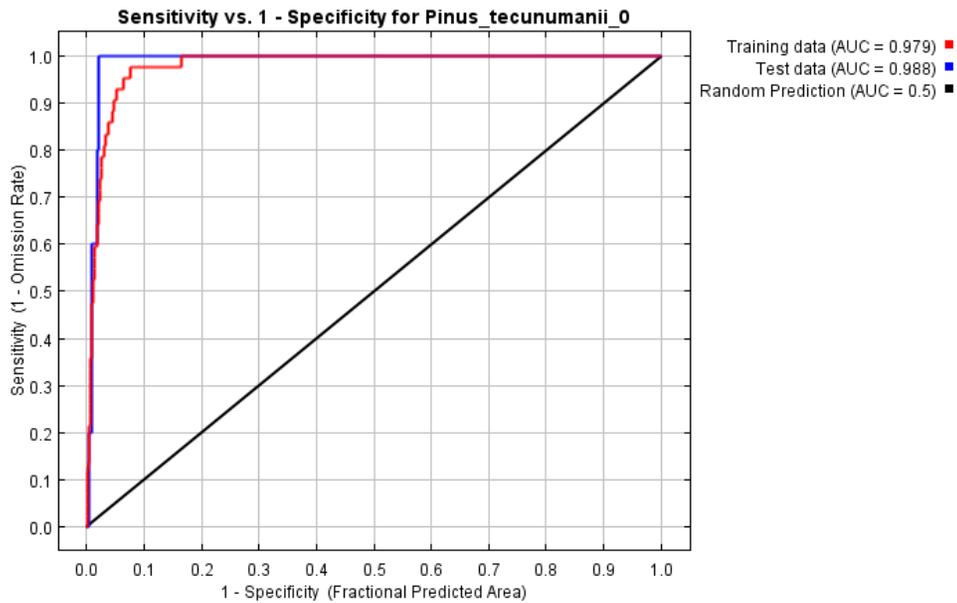


Figura 29 Valores de AUC para *P. tecunumanii* en el escenario SSP2-4.5.

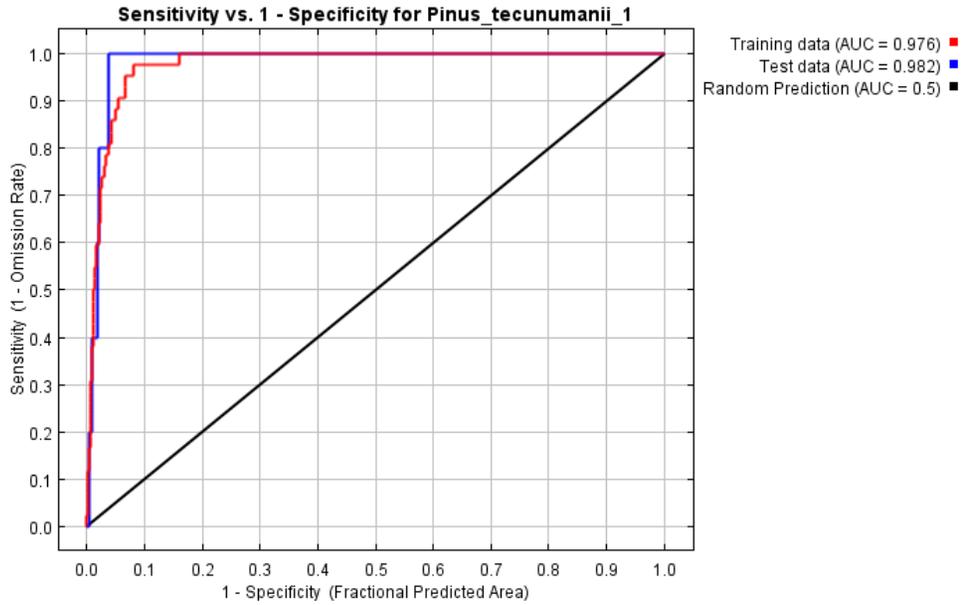


Figura 30 Valores de AUC para *P. tecunumanii* en el escenario SSP3-7.0.

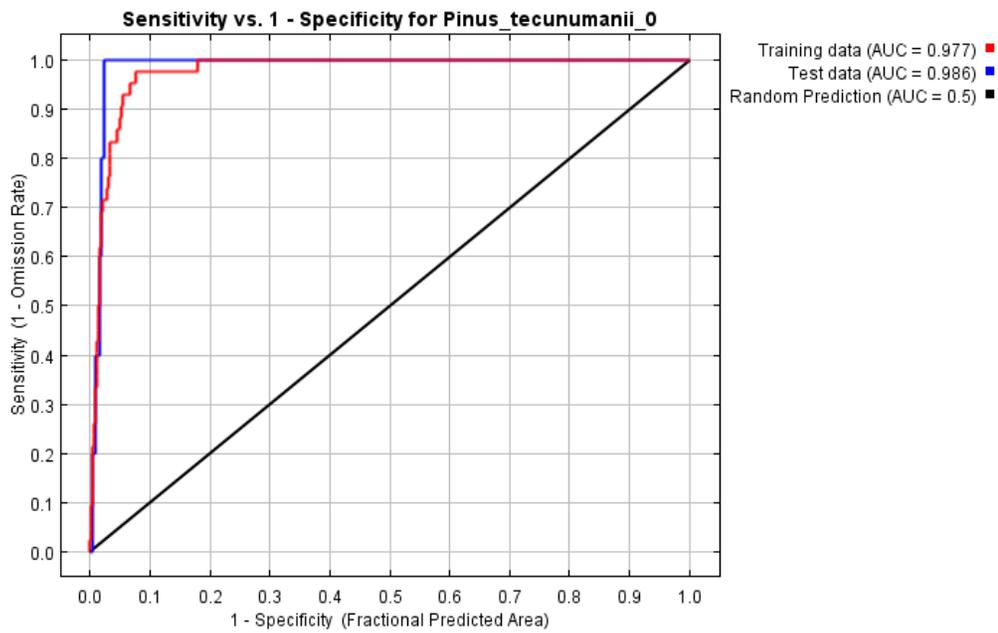


Figura 31 Valores de AUC para *P. tecunumanii* en el escenario SSP5-8.5.

Contribución porcentual de las variables

Tabla 13 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de *P. maximinoi*

<i>Pinus maximinoi</i>				
Variables	Contribución Porcentual Actual	Contribución Porcentual SSP2-4.5	Contribución Porcentual SSP3-7.0	Contribución Porcentual SSP5-8.5
DEM	94.9	82.8	85.6	84.6
Bio7	2.3	0	1.4	0.5
Bio11	0.7	12	6.4	5
Uso de suelo	2.1	1.8	1.2	1.4
Bio10	0	1.9	4.4	5.9
Cloud3	0	1.4	0.7	2.2
UV-B3	0	0.1	0.3	0.5

Tabla 14 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de *P. caribaea*

<i>Pinus caribaea</i>				
Variables	Contribución Porcentual Actual	Contribución Porcentual SSP2-4.5	Contribución Porcentual SSP3-7.0	Contribución Porcentual SSP5-8.5
Bio17	28.2	38.5	43.2	21
Capa de arcilla	0.3	1.2	4.4	3.6
Bio6	0.1	0	0	0
Uso de suelo	9	26.4	8.2	17.1
Limo	9.6	4.3	3.7	4.2
Bio7	22.1	17.3	22.4	29.7
Bio4	14.4	7.1	9.9	4.8

Carbono orgánico	0.3	3.1	0.9	2
Nitrógeno	8.8	1.3	3.9	1.9
pH de agua	7.3	0.8	3.4	3.9

Tabla 15 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de *P. oocarpa*

<i>Pinus oocarpa</i>				
VARIABLES	Contribución Porcentual Actual	Contribución Porcentual SSP2-4.5	Contribución Porcentual SSP3-7.0	Contribución Porcentual SSP5-8.5
DEM	77.3	79.6	78.1	79.3
Bio17	4.5	7	7.1	3.6
Cloud 8	5.8	7	8.8	8.8
Bio6	2.4	2	2.4	1.3
Intercambio catiónico	0.6	1.3	0	1.4
UV-B4	2.9	1.2	0.5	1.6
Cloud 1	2.2	1	1.5	1.9
Bio2	0.2	0.6	0.5	0.3
UV-B1	3	0.3	0.3	1.5
Bio16	0.2	0.1	0.7	0.2
pH de agua	0.1	0	0	0
Bio7	0.7	0	0	0

Tabla 16 Valores de Contribución Porcentual de las Variables usadas en el Modelo de *P. tecunumanii*.

<i>Pinus tecunumanii</i>				
VARIABLES	Contribución Porcentual Actual	Contribución Porcentual SSP2-4.5	Contribución Porcentual SSP3-7.0	Contribución Porcentual SSP5-8.5
DEM	85.6	86.5	90.7	88.9
Bio17	6.5	2.9	0.8	1.5
Bio6	2.9	5.1	1.9	2.9
Cloud 1	2.8	4.3	5.5	4.6
Bio4	1.5	0.7	0.1	1.1
Bio16	0.6	0.5	0	0.5
Cloud 8	0	0	0.1	0.2
pH de agua	0	0	0.8	0.2
Cloud 10	0	0	0	0