



Análisis del efecto del cambio climático en la distribución espacial de las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia, para los periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060.

LEIDY ANDREA MÉNDEZ POLO

Código 11952125487

Universidad Antonio Nariño

Maestría en Geomática Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2023

Análisis del efecto del cambio climático en la distribución espacial de las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia, para los periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060.

Leidy Andrea Méndez Polo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Geomática Ambiental

Director:

Doctor Andrés Felipe Carvajal

Línea de Investigación:

Análisis de procesos de cambio global

Universidad Antonio Nariño

Maestría en Geomática Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2023

Contenido

| | Pág. |
|--|------------|
| 1 Resumen | 18 |
| 2 Abstract | 19 |
| 3 Introducción | 20 |
| 4 Objetivos..... | 24 |
| 5 Marco teórico | 25 |
| 6 Estado del conocimiento..... | 44 |
| 7 Metodología..... | 73 |
| 8 Resultados y discusión..... | 82 |
| 9 Conclusiones..... | 137 |
| 10 Recomendaciones..... | 140 |
| 11 Referencias Bibliográficas | 141 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 <i>Áreas de bosque seco tropical en Colombia</i> | 28 |
| Figura 2 <i>Escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)</i> | 33 |
| Figura 3 <i>Emisiones anuales antropogénicas (causadas por el ser humano) durante el periodo 2015 - 2100</i> | 37 |
| Figura 4 <i>Proyección de indicadores seleccionados del cambio climáticos global en los cinco escenarios ilustrativos utilizados en el informe del IPCC 2021</i> | 39 |
| Figura 5 <i>Publicaciones anuales de artículos: cambio climático, distribución de especies y bosques</i> | 45 |
| Figura 6 <i>Artículos por área de conocimiento, cambio climático, distribución de especies y bosques</i> | 46 |
| Figura 7 <i>Artículos por área de conocimiento, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023</i> | 47 |
| Figura 8 <i>Publicaciones de artículos por países, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023</i> | 48 |
| Figura 9 <i>Publicaciones de artículos por títulos, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023</i> | 49 |
| Figura 10 <i>Publicaciones de artículos por organizaciones, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023</i> | 49 |
| Figura 11 <i>Mapa de redes, cambio climático, distribución de especies y bosques</i> | 50 |
| Figura 12 <i>Mapa de redes por años, cambio climático, distribución de especies y bosques</i> | 51 |
| Figura 13 <i>Mapa de calor, cambio climático, distribución de especies y bosques</i> | 52 |
| Figura 14 <i>Localización área de estudio</i> | 74 |
| Figura 15 <i>Descarga de ocurrencia de especies del Servicio de Información sobre Biodiversidad Global</i> | 76 |
| Figura 16 <i>Flujo metodológico para el desarrollo del estudio</i> | 81 |
| Figura 17 <i>Registros de ocurrencias de las tres especies forestales en estudio</i> | 83 |
| Figura 18 <i>Resultados de la probabilidad de distribución de <i>Hymenaea courbaril</i> L. en condiciones bioclimáticas de referencia actual</i> | 91 |
| Figura 19 <i>Resultados de la probabilidad de distribución de <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. en condiciones bioclimáticas de referencia actual</i> | 92 |
| Figura 20 <i>Resultados de la probabilidad de distribución de <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. en condiciones bioclimáticas de referencia actual</i> | 93 |
| Figura 21 <i>Probabilidad en la distribución de la especie de flora <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060</i> | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 22 Probabilidad en la distribución de la especie de flora <i>Hymenaea courbaril</i> L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060. | 97 |
| Figura 23 Probabilidad en la distribución de la especie de flora <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060. | 98 |
| Figura 24 Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060..... | 101 |
| Figura 25 Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie <i>Hymenaea courbaril</i> L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060..... | 107 |
| Figura 26 Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060..... | 113 |
| Figura 27 Registro de áreas de pérdida, ganancia y estabilidad del hábitat por especie analizada..... | 116 |
| Figura 28 Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 121 |
| Figura 29 Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 123 |
| Figura 30 Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Hymenaea courbaril</i> L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 127 |
| Figura 31 Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Hymenaea courbaril</i> L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 129 |
| Figura 32 Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 133 |
| Figura 33 Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 | 135 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1 <i>Estudios que exponen efectos del cambio climático en la distribución de las especies de flora</i> | 53 |
| Tabla 2 <i>Estudios revisados que relacionan la composición y estructura de los bosques secos tropicales en Colombia</i> | 61 |
| Tabla 3 <i>Estudios revisados sobre modelos de circulación general - MCG aplicados en Colombia y Suramérica</i> | 65 |
| Tabla 4 <i>Variables bioclimáticas utilizadas para predecir la distribución actual y futura de tres especies de flora del bosque seco tropical</i> | 77 |
| Tabla 5 <i>Resultados de AUC y contribución de variables bioclimáticas de referencia actuales en la determinación de probabilidad de distribución de las tres especies de flora</i> | 89 |
| Tabla 6 <i>Áreas potenciales de distribución de las especies en estudio en el territorio colombiano en condiciones bioclimáticas de referencia actuales</i> | 94 |
| Tabla 7 <i>Valores de AUC para la repetición seleccionada de las modelaciones realizadas</i> | 99 |
| Tabla 8 <i>Áreas potenciales de distribución espacial de las especies en estudio en condiciones bioclimáticas de futuro 2021 – 2040 y 2041 – 2060 en dos escenarios de cambio climático SPP2-4.5 y SSP3-7.0</i> | 103 |
| Tabla 9 <i>Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060</i> | 117 |
| Tabla 10 <i>Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie <i>Hymenaea courbaril</i> L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060</i> | 125 |
| Tabla 11 <i>Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060</i> | 131 |

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|-----------------------|--|
| <i>AMNH</i> | Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History (en inglés), Centro para la Biodiversidad y la Conservación del Museo Americano de Historia Natural |
| <i>ANLA</i> | Autoridad Nacional de Licencias Ambientales |
| <i>AUC</i> | Area Under of Curve (en inglés), área bajo la curva |
| <i>BIO</i> | Variables bioclimáticas |
| <i>bs-T</i> | Bosque seco tropical |
| <i>CMIP</i> | Proyecto de Intercomparación de Escenarios de Cambio Climático |
| <i>CMIP6</i> | Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados Fase 6 |
| <i>COP 22</i> | Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2016 |
| <i>CP</i> | Patrones de circulación |
| <i>DAB</i> | Diámetro a la altura de la base |
| <i>DAP</i> | Diámetro a la altura del pecho |
| <i>ENM</i> | Modelos de nicho ecológico |
| <i>GBIF</i> | Servicio de Información sobre Biodiversidad Global |
| <i>GEI</i> | Gases efecto invernadero |
| <i>ha</i> | Hectárea |
| <i>IE6</i> | Sexto Informe de Evaluación |
| <i>IPCC</i> | Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático |
| <i>km²</i> | Kilómetros cuadrados |
| <i>mm</i> | Milímetros |
| <i>MCG o GCM</i> | Modelo de circulación general |
| <i>NAO</i> | Oscilación del Atlántico Norte |
| <i>RCP</i> | Ruta de concentración representativa |
| <i>ROC</i> | Curva de características operativas del receptor |
| <i>SAMS</i> | Sistema Monzón Sudamericano |
| <i>SD</i> | Desviación estándar |
| <i>SDM</i> | Distribución potencial de especies |
| <i>SRTM</i> | Shuttle Radar Topography Mission (en inglés), Misión Topográfica de Radar Shuttle |
| <i>SSP</i> | Shared Socioeconomic Pathways (en inglés), Trayectorias socioeconómicas compartidas |
| <i>STSA</i> | Sur Tropical de Sudamérica |
| <i>WOS</i> | Web of Science |
| <i>° C</i> | Grados centígrados |

A Manuela del alma mía,

A mi madre Francisca,

y a mi padre Ángel (Q.E.P.D)

Agradecimientos

Expreso total agradecimiento al profesor Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Coordinador académico de posgrados de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil de la Universidad Antonio Nariño por sus aportes, revisiones, colaboración constante, suministro de insumos y dirección del trabajo. Así mismo, a las profesoras Liliana Corzo Ramírez y Liliana Vanessa Celis Gil, docentes del posgrado en Geomática Ambiental de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil de la Universidad Antonio Nariño por transmitir su conocimiento de forma acertada y clara, por facilitar el acceso a la información para la realización del estudio, por sus valiosos aportes y aclaración permanente de dudas.

1 Resumen

El estudio analiza el efecto del cambio climático en la distribución potencial de las especies (SDM) *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia, para periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060. Inicialmente, se identificó la probabilidad de SDM en condiciones bioclimáticas de referencia actuales y de escenarios de cambio climático en periodos establecidos. Mediante herramientas de procesamiento de información geográfica se determinaron cambios en la SDM en términos de pérdida, ganancia y persistencia de hábitats adecuados. Metodológicamente, se utilizaron registros de ocurrencia de GBIF, 19 variables bioclimáticas disponibles en base de datos WorldClim v.2.1 para el modelo climático global MPI-ESM1-2-HR, algoritmo máxima entropía - MaxEnt v.3.4.4 y herramientas de Spatial Analyst de ArcGIS10.8.

Bursera simaruba (L.) Sarg., presento bajas pérdidas y altas ganancias de hábitat, en general, su hábitat permanece estable y las ganancias redundan en mayores territorios adecuados.

Palabras clave: Cambio climático, bosque seco tropical, MaxEnt, Colombia, distribución potencial de especies.

2 Abstract

The study analyzes the effect of climate change on the potential distribution of species (SDM) *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., and *Bursera simaruba* (L.) Sarg., characteristic of the tropical dry forest in Colombia, for the periods 2021-2040 and 2041-2060. Initially, the probability of SDM under current bioclimatic conditions and climate change scenarios in defined periods was identified. Changes in SDM in terms of habitat loss, gain, and persistence were determined using geographic information processing tools. Methodologically, GBIF occurrence records, 19 bioclimatic variables available in the WorldClim v.2.1 database, the global climate model MPI-ESM1-2-HR, maximum entropy algorithm - MaxEnt v.3.4.4, and ArcGIS 10.8 Spatial Analyst tools were used.

Bursera simaruba (L.) Sarg. showed low habitat losses and high gains, overall, its habitat remains stable, with gains resulting in larger suitable territories.

Keywords: climate change; tropical dry forest; MaxEnt, Colombia, species distribution model.

3 Introducción

El bosque seco tropical (bs-T) en Colombia, se distingue por una combinación de factores climáticos, topográficos y edáficos que influyen en su estructura y funcionalidad (Galeano & Bernal, 2006), presentando también niveles intermedios de endemismo y diversidad beta (Linares-Palomino et al. 2011).

El bs-T en Colombia se encuentra gravemente degradado y distribuido en fragmentos aislados de diversos tamaños desde la región Caribe hasta el enclave del río Patía al Suroccidente del país (Pizano & García 2014), se estima una pérdida del 90% derivada por el desarrollo de actividades antrópicas como la ganadería, la agricultura, la minería y los territorios urbanos (Díaz 2006), características que lo convierten en un ecosistema de gran prioridad para la conservación (Rodríguez et al. 2012).

En los bosques secos, el crecimiento y la supervivencia de las plantas están limitados principalmente por la disponibilidad de agua, mientras que, en los bosques húmedos, la disponibilidad de luz limita el rendimiento. Por lo tanto, las plántulas de bosque seco se caracterizan por rasgos que les permiten maximizar la captura y/o conservación de agua, al tiempo que minimizan la pérdida de agua por transpiración.

La hipótesis del equilibrio funcional (Brouwer 1963) establece que, bajo un régimen dado de estrés, las plantas maximizan su área de superficie para la ingesta del recurso más limitante (Poorter & Nagel 2000). Esta tolerancia a la sequía está respaldada por una alta inversión en biomasa para el sistema radicular, y cumplir con los objetivos de supervivencia.

En Colombia existen pocos estudios enfocados a especies claves del bs-T (Thomas et al. 2017a, Bocanegra-González et al. 2018, Bocanegra-González & Guillemín 2018). Los estudios enfocados en especies clave son esenciales en el actual escenario de cambio climático y el aumento de las presiones antropogénicas sobre las especies tropicales maderables, ya que proporcionan información valiosa para la protección y la gestión adecuada de estas especies en un contexto de cambio ambiental acelerado (Blaser et al. 2011), especialmente cuando el potencial efecto de la fragmentación del bs-T sobre el componente genético de las especies genera una gran preocupación.

La fragmentación de hábitats puede propiciar una serie de efectos adversos en las especies arbóreas, estos efectos incluyen la disminución del tamaño de las poblaciones, la limitación del intercambio genético entre fragmentos aislados, el incremento de la endogamia, la reducción de la vitalidad de las plántulas e, incluso en situaciones extremas, la extinción local de las especies (Kageyama et al. 1998, Aguilar et al. 2006). La reducción del tamaño poblacional como resultado de la fragmentación de hábitats implica que las poblaciones arbóreas sean más susceptibles a la pérdida de variabilidad genética y a los efectos negativos de la deriva genética, a razón de las limitaciones del flujo génico entre fragmentos aislados, lo que dificulta el intercambio de genes y la renovación genética de las poblaciones. De hecho, estos efectos ya han sido registrados en especies nativas de los bs-T de Centro y Sur América.

El uso de modelos de distribución de especies para predecir cambios en las áreas idóneas como hábitat de especies bajo escenarios de cambio climático se está convirtiendo en un tema fundamental en la conservación biológica. El cambio climático influye en los

cambios de los fenómenos y procesos ecológicos, como la distribución de especies y la fenología, acelerando así la tasa de extinción o prosperidad de las especies (Li et al. 2020)

El método de escenarios es una herramienta de investigación común para mejorar la comprensión de las interacciones complejas entre los sistemas naturales y las actividades humanas. Los escenarios proporcionan “descripciones plausibles de cómo podría desarrollarse el futuro” (Moss et al., 2010), el marco de escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas - SSP recientemente introducido (O'Neill et al., 2014, Riahi et al., 2017, van Vuuren et al., 2014) fue desarrollado para facilitar los análisis sobre los impactos del cambio climático, así como su mitigación y adaptación.

A lo largo de la historia, se ha observado un marcado aumento en el consumo de energía durante la transición de una economía agrícola a una economía basada en la manufactura, en el proceso de desarrollo económico. La transformación hacia una economía centrada en servicios y conocimiento modifica nuevamente la dinámica de la demanda de energía, tanto en cantidad como en composición. Algunos argumentan que los países en desarrollo pueden beneficiarse al evitar la etapa de desarrollo económico intensivo en el uso de energía. Aunque hay algunas investigaciones que respaldan esta perspectiva, como el trabajo de Marcotullio y Schulz en 2007, no existe consenso sobre si este es un patrón generalizado.

Bajo estos nuevos escenarios, se proyecta que la temperatura seguirá aumentando en todos los escenarios de emisiones considerados. Además, se estima que el calentamiento global de 1.5°C y 2°C se superará durante el siglo XXI a no ser que se reduzcan los gases de efecto invernadero - GEI a niveles considerables (IPCC, 2021).

Además, se incrementarán la frecuencia e intensidad de los extremos cálidos, olas de calor marinas y fuertes precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones y la proporción de ciclones tropicales intensos (con diferentes niveles de confianza, ver para las regiones Norteamérica y Centro y Sudamérica:

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/resources/factsheets/>).

Para comprender cómo las especies responderán a los cambios en la disponibilidad de agua, es posible identificar dos estrategias clave de adaptación a la sequía basadas en rasgos funcionales: la tolerancia al estrés por sequía y el retraso del estrés por sequía. De esta manera, es importante conocer las distribuciones futuras de especies indicadoras de los bosques secos tropicales de Colombia y bajo escenarios de cambio climático determinar las modificaciones que su distribución pueda tener.

Por lo anterior, es necesario determinar los cambios atribuibles al cambio climático en la distribución de las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia para los periodos de corto plazo 2021 – 2040 y mediano plazo 2041- 2060, considerando los escenarios “Desigualdad marcada” SSP3 (SSP2-4.5) y “Desarrollo sostenible desigual” SSP4 (SSP3-7.0), con el fin de identificar la dinámica de distribución para estas especies conforme a los escenarios de cambio climático mencionados y de manera tangencial, para el bosque seco tropical.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Analizar el efecto del cambio climático en la distribución espacial de las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia, para los periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060.

4.2 Objetivos específicos

Identificar la probabilidad de distribución de las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., a partir de condiciones bioclimáticas de referencia actuales y en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060.

Determinar los cambios en la probabilidad de distribución de las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060.

5 Marco teórico

5.1 Características generales del bosque seco tropical

El bosque seco tropical en Colombia es un ecosistema de gran importancia que se desarrolla en regiones con características ambientales particulares. Se distingue por una combinación de factores climáticos, topográficos y edáficos que influyen en su estructura y funcionalidad (Galeano & Bernal, 2006), ocupa un área intermedia entre los bosques de Centroamérica y los de Suramérica (Sánchez-Azofeifa et al. 2013).

En términos ambientales, el bosque seco tropical se encuentra en áreas con una estación seca prolongada y una estación lluviosa más corta. Las precipitaciones anuales en estas áreas varían entre 500 y 1500 mm, y la mayoría de las lluvias ocurren durante unos pocos meses al año. Durante la estación seca, la disponibilidad de agua es limitada y las temperaturas son altas, con una media anual que oscila entre 24°C y 28°C (León-Yáñez et al., 2012). En consecuencia, la evapotranspiración durante los meses secos excede los valores de precipitación, aproximadamente 100 mm/mes durante tres meses seguidos (Murphy & Lugo, 1986).

Desde el punto de vista ecológico, el bosque seco tropical exhibe una alta biodiversidad y una composición de especies única. Aunque la diversidad de especies puede ser menor en comparación con otros ecosistemas, el bosque seco tropical alberga una gran cantidad de especies adaptadas a las condiciones de sequía y altas temperaturas. Se encuentran adaptaciones como hojas pequeñas, gruesas o caducas, troncos y ramas

espinosas, raíces profundas para acceder a agua subterránea y ciclos de vida cortos que aprovechan rápidamente las condiciones favorables (Gentry, 1995).

La estrategia de tolerancia al estrés por sequía implica que las especies desarrollan rasgos funcionales que les permiten sobrevivir y persistir en condiciones de sequía. En estas especies han evolucionado mecanismos para resistir los efectos negativos de la falta de agua, como sistemas de raíces más profundos para acceder a fuentes de agua más profundas, hojas modificadas que reducen la pérdida de agua a través de la transpiración, la capacidad de cerrar sus estomas para conservar la humedad, reducen la probabilidad de xilema cavitación y mantienen el intercambio de gases, la conductancia hidráulica y la supervivencia celular a potenciales hídricos bajos (Engelbrecht & Kursar 2003). Una forma de retrasar el estrés por sequía es mudando sus hojas (Borchert 1994), pero se produce a expensas de una temporada de crecimiento más corta y una pérdida regular de biomasa.

La estrategia de retraso del estrés por sequía implica que las especies evitan activamente la sequía al modificar su ciclo de vida y su comportamiento en respuesta a las condiciones ambientales. Estas especies pueden ajustar su fenología, como el momento de la germinación, floración o fructificación, para evitar períodos de sequía intensa. Los rasgos asociados con esta forma de retraso de la sequía incluyen altas inversiones de biomasa en el sistema radicular; longitudes de raíces específicas altas, área foliar pequeña y fuerte control de estomas (Slot & Poorter 2007; Poorter & Markesteijn 2008).

De esta manera, las especies buscan asegurar su supervivencia y reproducción en entornos cambiantes y desafiantes en términos de disponibilidad de agua, por lo anterior,

ante la influencia del cambio climático en la distribución de especies es común indicar que el bosque seco tropical en Colombia puede extinguirse.

Los bosques secos tienden a ser resilientes en cuanto a su estructura, es decir, los atributos estructurales de la vegetación tienden a alcanzar rápidamente valores similares a los de bosques maduros (Derroire et al. 2016), se caracterizan por presentar alto endemismo y diversidad beta (Dirzo et al. 2011). En resumen, los bosques secos contienen muchas especies con distribución severamente restringida, alto grado de endemismo (Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa 2010) y procesos de especiación.

Biogeográficamente, el bosque seco tropical en Colombia se distribuye en siete regiones (Kattan GH. et al. 2019). Abarca áreas costeras, valles interandinos, estribaciones montañosas bajas y algunas planicies. Esta distribución está determinada por la combinación de factores climáticos, como la temperatura y la precipitación, junto con la geología, edafología y la topografía de la región (Moreno & Sánchez-Rodríguez, 2008).

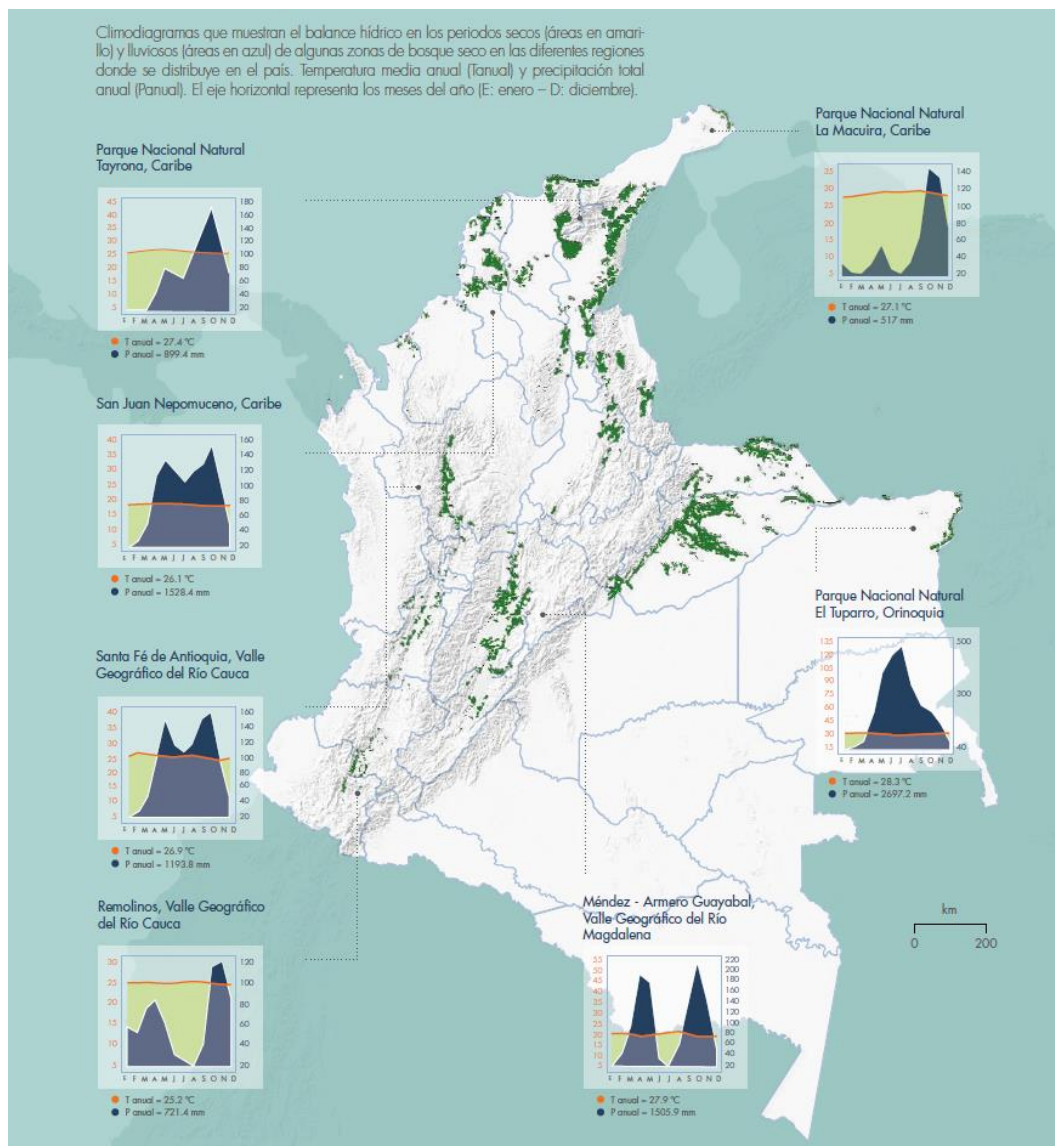
En Colombia, el bosque seco tropical se ha registrado en el Caribe, en los valles geográficos de los ríos Magdalena y Cauca, en el valle del Patía, en la región Norandina, es decir, Norte de Santander y Santander, y al norte de la Orinoquia, esta última donde la precipitación total anual puede ser superior a los 2600 mm pero la sequía (diciembre-abril < 100mm/mes) está determinada por la poca capacidad que tienen los suelos en retener el agua capturada durante el periodo de lluvias (González-M. et al. 2018) (**Figura 1**).

En los bosques secos, el crecimiento y la supervivencia de las plantas están limitados principalmente por la disponibilidad de agua, por lo tanto, las plántulas de bosque seco se caracterizan por rasgos que les permiten maximizar la captura y/o

conservación de agua, al tiempo que minimizan la pérdida de agua por transpiración. Esto es, la hipótesis del equilibrio funcional (Brouwer, 1963) que establece que, bajo un régimen dado de estrés, las plantas maximizan su área de superficie para la ingesta del recurso más limitante (Poorter & Nagel, 2000).

Figura 1

Áreas de bosque seco tropical en Colombia



Fuente: González-M. et al. 2018

En Colombia se han identificado dos grupos florísticos para los bosques secos, el perteneciente a la flora de Centro América y el norte de Suramérica, localizado en la región Caribe (Avella et al. 2019), y el grupo perteneciente al norte de los valles interandinos, conformados por los ríos Magdalena y Cauca (Dryflor et al. 2016). Sin embargo, los bosques secos más estudiados en el país sobre sucesión secundaria de los bosques secos se han desarrollado en la región Caribe (Ruiz et al. 2005, Castellanos-Castro & Newton 2015).

En el estudio “Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia)” (Torres-Rodríguez et al. 2019) se realizó la evaluación multicriterio de la flora de la región compuesta por 290 especies, entre ellas se reportan las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., como especies en proceso de desaparición, y la especie *Hymenaea courbaril* L., asociada a bosques secos tropicales conservados, características que priorizaron su selección para el estudio.

A continuación, se presentan características generales de las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., las cuales hacen parte de estados avanzados sucesionales en bosques secos y sobre las que se fundamentará el análisis del estudio.

5.1.1 *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.

Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb, conocido comúnmente como "guanacaste" u "orejero, oreja de elefante", es un árbol de gran porte que puede alcanzar

alturas de hasta 40 metros que pertenece a la familia Fabaceae. Se caracteriza por su copa amplia y su tronco robusto, con ramas extendidas horizontalmente. Sus hojas son bipinnadas y sus flores son pequeñas y de color blanco cremoso. Produce grandes frutos en forma de medialuna que contienen semillas (Standley & Steyermark, 1946).

Esta especie tiene una distribución amplia en América Central y América del Sur, incluyendo varias regiones de Colombia. Se encuentra comúnmente en bosques secos y deciduos, así como en áreas perturbadas y bosques ribereños. Es una especie pionera que juega un papel importante en la sucesión secundaria y en la restauración de áreas degradadas, debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, mejorar la calidad del suelo y proporcionar sombra a otras especies (Valencia et al., 2004). Sus frutos y semillas son consumidos por una variedad de animales, lo que contribuye a la dispersión de las semillas y a la diversidad del ecosistema (Standley & Steyermark, 1946; Zalamea et al., 2006).

5.1.2 *Hymenaea courbaril* L.

Hymenaea courbaril L., conocido como "jatobá" o "algarrobo", es un árbol de gran tamaño que puede alcanzar alturas de hasta 40 metros que pertenece a la familia Fabaceae. Se caracteriza por su tronco recto y su copa amplia y redondeada. Sus hojas son compuestas y sus flores son pequeñas y de color amarillo. Produce vainas grandes que contienen semillas comestibles (Duke, 1983).

Esta especie se distribuye ampliamente en América Central y América del Sur, incluyendo varias regiones de Colombia. Desempeña un papel importante en la

regeneración del bosque, ya que sus semillas son dispersadas por animales y suelen germinar con éxito en lugares soleados y abiertos (Gentry, 1993). Además, esta especie tiene una relación simbiótica con bacterias fijadoras de nitrógeno en sus raíces, lo que contribuye a la fertilidad del suelo (Kursar et al., 2009).

5.1.3 *Bursera simaruba* (L.) Sarg.

Bursera simaruba (L.) Sarg., conocido comúnmente como "indio desnudo" o "cascara sagrada", es un árbol de tamaño mediano que puede alcanzar alturas de hasta 25 metros. Se caracteriza por su tronco delgado y su corteza lisa y grisácea. Sus hojas son compuestas y sus flores son pequeñas y de color blanco. Produce pequeños frutos que contienen una sola semilla (Stevens, 1974).

Esta especie se distribuye ampliamente en América Central y América del Sur, incluyendo varias regiones de Colombia. Desempeña un papel importante en la sucesión ecológica y en la restauración de áreas degradadas. Además, es una especie de interés para la producción de resinas y aceites esenciales (Díaz & Hinojosa, 2005).

B. simaruba (L.) Sarg., es una especie dominante y de establecimiento rápido que le permite reponerse y resistir en los procesos de pérdida del hábitat del bs-T (Trainer & Will 1984, Gillespie et al. 2000, Vereá & Solórzano 2001).

5.2 Cambio climático y su influencia en la distribución de especies

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos de la Tierra, incluyendo el aumento de la temperatura promedio global, los cambios en los patrones de precipitación y la intensificación de eventos climáticos extremos. Estos cambios son causados principalmente por las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, que liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera (IPCC, 2022a).

El calentamiento global es un fenómeno específico dentro del cambio climático que se refiere al aumento de la temperatura promedio de la Tierra debido a las actividades humanas. Este aumento de temperatura tiene impactos significativos en los sistemas naturales y humanos, como la elevación del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares y la alteración de los ecosistemas (IPCC, 2022a).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) desarrolla escenarios de cambio climático para analizar las posibles trayectorias futuras del clima. El informe del IPCC de 2022 presenta cinco escenarios de emisiones llamados SSP (Shared Socioeconomic Pathways), que representan diferentes combinaciones de cambios sociales, económicos y tecnológicos a nivel mundial (IPCC, 2022b).

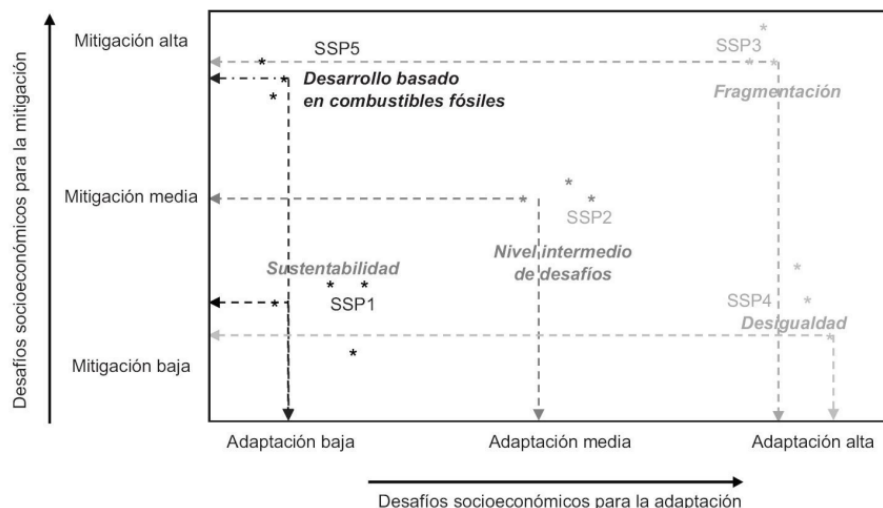
Los escenarios SSP abarcan un amplio rango de futuros posibles, desde un escenario de altas emisiones (SSP5) que resulta en un calentamiento considerable, hasta un escenario de bajas emisiones (SSP1) que limita el calentamiento a niveles más bajos. Estos escenarios proporcionan información para comprender las implicaciones del cambio

climático y ayudan en la toma de decisiones sobre la mitigación y adaptación al cambio climático (IPCC, 2022b).

En el sexto informe de evaluación del IPCC se planteó el uso de escenarios SSP que incorporan las dimensiones del cambio social esperado que podrían afectar tanto los niveles de emisiones como la mitigación y la adaptación al cambio climático (Escoto et al., 2017) (**Figura 2**). Por lo tanto, su enfoque es descriptivo sobre las tendencias socioeconómicas y ambientales a nivel global, cuentan con contenido cuantitativo y cualitativo sobre los supuestos desafíos para la mitigación y adaptación, incorporan información basada en los modelos de circulación general integrativos globales sobre energía, economía y uso actual del suelo a escala mundial, denotan la ausencia de políticas climáticas y variables relacionadas con los efectos del cambio climático (Ruíz – García et al., 2022).

Figura 2

Escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP).



Fuente: Escoto et al., (2017)

El cambio climático tiene un impacto significativo en la distribución de especies. A medida que las condiciones climáticas cambian, los rangos geográficos de las especies se desplazan en busca de climas más adecuados. Algunas especies pueden expandir su distribución hacia latitudes más altas o altitudes mayores, mientras que otras pueden enfrentar dificultades para adaptarse y corren el riesgo de extinción local (IPCC, 2022a).

La distribución de especies también se ve influenciada por factores como la capacidad de dispersión, la disponibilidad de hábitats adecuados y las barreras geográficas. Los cambios en la distribución de especies pueden tener efectos cascada en los ecosistemas, afectando las interacciones entre especies, la dinámica de las comunidades y la provisión de servicios ecosistémicos (Parmesan, 2006).

5.2.1 Escenarios de cambio climático

Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs por sus siglas en inglés) son una serie de escenarios desarrollados por el Proyecto de Intercomparación de Escenarios de Cambio Climático - CMIP del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático - IPCC. Estos escenarios representan diferentes futuros socioeconómicos y tecnológicos posibles, y se utilizan para examinar cómo podrían evolucionar las sociedades y las economías en relación con el cambio climático, esto es, como se adaptan y como lo mitigan (O'Neill et al., 2017).

El marco conceptual de las SSP establece la necesidad de desarrollar escenarios globales que describan la evolución futura de aspectos clave de la sociedad. Estos escenarios plantean una serie de desafíos relacionados con la mitigación y adaptación al

cambio climático, y se centran en la interacción entre factores demográficos, socioeconómicos y tecnológicos para explorar diferentes futuros posibles.

Es así, como los SSP se basan en dos factores clave; el cambio en la estructura demográfica y el cambio en los patrones de desarrollo socioeconómico. Para ello, se han definido cinco SSP diferentes, que representan diferentes combinaciones de desafíos y oportunidades socioeconómicas, tecnológicas y de política climática enmarcados en el corto plazo (2021–2040), medio plazo (2041–2060) y a largo plazo (2081–2100) en relación con el período 1850–1900, salvo que se indique lo contrario (IPCC, 2021).

A continuación, se citan las características más relevantes de las narrativas de las trayectorias socioeconómicas compartidas para generar escenarios climáticos futuros y evaluar los impactos del cambio climático:

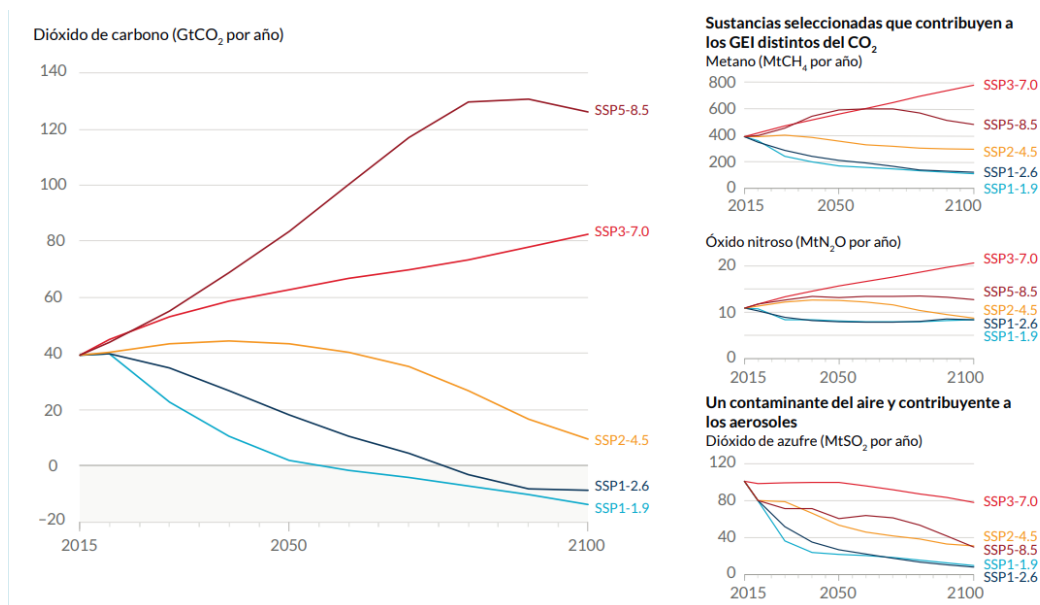
1. SSP1 (SSP1-1.9): Mundo sostenible: Este escenario representa un futuro en el que prevalece la sostenibilidad, con una menor desigualdad y una mayor cooperación global. La inversión en tecnologías limpias y en educación, así como la adopción generalizada de políticas favorables al medio ambiente, conducen a una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero – GEI (**Figura 3**).
2. SSP2 (SSP1-2.6): Mundo intermedio: Este escenario representa un futuro en el que las tendencias actuales continúan sin cambios drásticos. No hay una fuerte orientación hacia la sostenibilidad ni un enfoque significativo en la mitigación del cambio climático. Las emisiones de GEI siguen aumentando a un ritmo moderado (**Figura 3**).
3. SSP3 (SSP2-4.5): Desigualdad marcada: Este escenario representa un futuro en el que prevalecen la desigualdad económica y la fragmentación social. La atención se

centra en los intereses nacionales y regionales, y no hay esfuerzos significativos para mitigar el cambio climático. Las emisiones de GEI continúan aumentando rápidamente (**Figura 3**).

4. **SSP4 (SSP3-7.0): Desarrollo sostenible desigual:** Este escenario representa un futuro en el que hay un enfoque en el desarrollo económico, pero con una orientación limitada hacia la sostenibilidad ambiental. Las emisiones de GEI aumentan significativamente (**Figura 3**) antes de estabilizarse hacia mediados de siglo.
5. **SSP5 (SSP5-8.5): Fossil-fueled Development (Desarrollo basado en combustibles fósiles):** Este escenario representa un futuro en el que el crecimiento económico está impulsado por el uso intensivo de combustibles fósiles. Las emisiones de GEI continúan aumentando rápidamente (**Figura 3**) y no se implementan políticas significativas de mitigación del cambio climático.

Figura 3

Emisiones anuales antropogénicas (causadas por el ser humano) durante el periodo 2015 - 2100.



Fuente: IPCC, 2021

Nota: Emisiones anuales de CO₂ en el futuro (izquierda) y de un subconjunto de fuerzas impulsoras claves distintas del CO₂ (derecha) en los cinco escenarios ilustrativos.

5.2.2 Cambios en el sistema climático

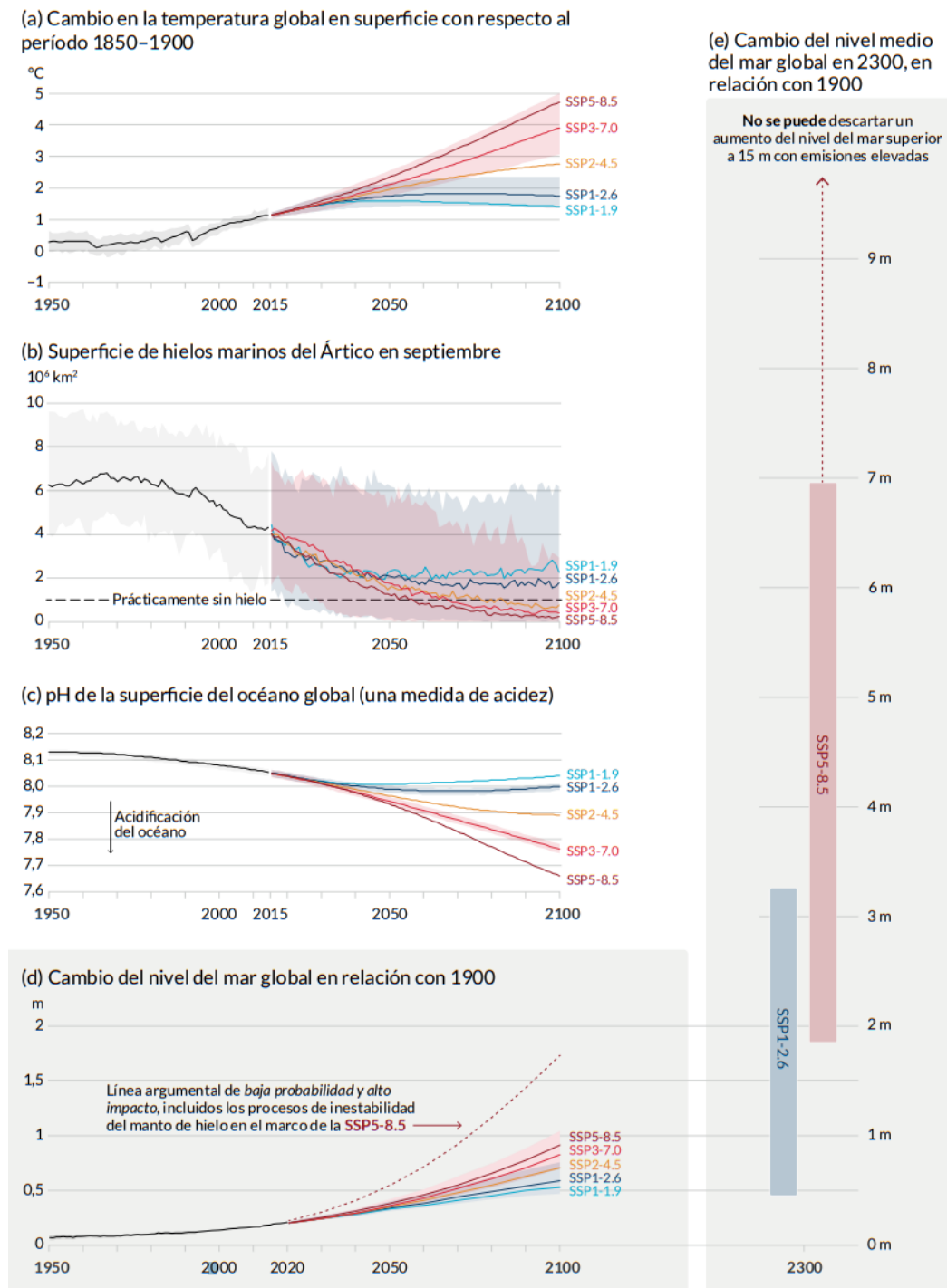
Una de las conclusiones del IPCC (2021) sobre las bases físicas del cambio climático establece que muchos cambios en el sistema climático son mayores en relación directa con el aumento del calentamiento global. Entre ellos se incluyen el incremento de la frecuencia y la intensidad de los episodios de calor extremo, las olas de calor marinas, las precipitaciones intensas y, en algunas regiones, las sequías agrícolas y ecológicas; un aumento de la proporción de ciclones tropicales intensos; y la reducción del hielo marino del Ártico, el manto de nieve y el permafrost.

En el resumen del IPCC 2021, se presentan las proyecciones de las cinco trayectorias socioeconómicas compartidas (líneas de color), los rangos de incertidumbre (sombras), las simulaciones históricas (línea negra) respecto al periodo 1950 a 2015 – 2020, para cinco indicadores de cambio climático (**Figura 4**): cambios en la temperatura global en superficie en °C con respecto al periodo 1850 – 1900; superficie de hielos marinos del Ártico en septiembre en 10^6 km² sobre la base de las simulaciones de los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados Fase 6 - CMIP6; pH de la superficie del océano global sobre la base de las simulaciones de los modelos CMIP6; cambio del nivel medio del mar global en metros, con respecto a 1900; y, cambio del nivel medio del mar global en 2030 en metros, en relación con 1900.

Los indicadores seleccionados muestran rangos probables y muy probables para la SSP1-2.6 y la SSP3-7.0, excepto para el cambio del nivel medio de mar global en 2030 en el que solo se realizaron proyecciones para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (**Figura 4**).

Figura 4

Proyección de indicadores seleccionados del cambio climático global en los cinco escenarios ilustrativos utilizados en el informe del IPCC 2021.



Fuente: IPCC, 2021

5.2.3 *Distribución de especies y nichos ecológicos*

La distribución de especies se refiere a la presencia y abundancia de individuos de especies en diferentes áreas geográficas. Estudiar la distribución de especies es fundamental para comprender cómo los factores ambientales y las interacciones biológicas influyen en la presencia y ausencia de especies en un paisaje determinado. La distribución de especies puede estar determinada por una variedad de factores, como el clima, el hábitat, la disponibilidad de recursos y las interacciones con otras especies (Gaston, 2003; Colwell et al., 2012).

El nicho ecológico, por otro lado, se refiere a la gama de condiciones ambientales en las que una especie puede sobrevivir, crecer y reproducirse. El nicho ecológico incluye los requisitos de hábitat, las tolerancias a factores abióticos y las interacciones con otras especies. El estudio de los nichos ecológicos permite comprender las adaptaciones y las estrategias de las especies para sobrevivir en su entorno (Hutchinson, 1957; Soberón, 2007).

En cuanto a las metodologías implementadas para el estudio de la distribución de especies y los nichos ecológicos, existen diversas aproximaciones. Algunas de las técnicas más comunes incluyen:

1. **Mapeo de distribución de especies:** Se utiliza información de presencia y ausencia de especies para generar mapas de distribución espacial. Se pueden emplear técnicas de modelación estadística y aprendizaje automático para relacionar los datos de presencia con variables ambientales y predecir la distribución de especies en áreas no muestreadas (Elith & Leathwick, 2009).

2. Modelado de nichos ecológicos: Se utilizan modelos estadísticos o algoritmos de aprendizaje automático para relacionar datos de presencia de especies con variables ambientales y determinar los rangos de condiciones ambientales óptimas y toleradas por la especie (Guisan & Thuiller, 2005).
3. Análisis de paisaje: Se examina la estructura y composición del paisaje en relación con la distribución de especies. Se utilizan métricas de paisaje para evaluar la configuración espacial de los hábitats y su influencia en la presencia y abundancia de las especies (McGarigal et al., 2016).

En cuanto a los mejores resultados en la modelación de distribución de especies, varios enfoques han demostrado ser efectivos. Los modelos de distribución de especies basados en el análisis de variables ambientales y técnicas de aprendizaje automático, como los modelos de máxima entropía (MaxEnt) y los modelos de bosque aleatorio (Random Forest), han mostrado un buen desempeño en la predicción de la distribución de especies (Elith et al., 2006; Cutler et al., 2007).

5.2.4 *Modelo de máxima entropía (MaxEnt)*

El modelo de máxima entropía (MaxEnt) es un método utilizado en ecología y biogeografía para predecir la distribución de especies como iniciativa del Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History (AMNH). Este enfoque se basa en el principio de máxima entropía de la teoría de la información, que establece que, dados ciertos conocimientos previos o restricciones, la distribución de probabilidad que mejor se ajusta es aquella que maximiza la entropía (Phillips et al., 2006).

El modelo de máxima entropía utiliza datos de presencia de especies y variables ambientales para estimar la distribución potencial de una especie en un área geográfica determinada. Las variables ambientales pueden incluir factores como el clima (temperatura, precipitación, etc.), la topografía, la vegetación, el suelo, entre otros, que se consideran relevantes para explicar la distribución de la especie (Elith et al., 2006).

Según Phillips et al. (2006), algunas de las ventajas clave de implementar este modelo en los análisis de distribución de especies son las siguientes:

1. Utiliza un enfoque de inferencia estadística basado en principios sólidos: El modelo de máxima entropía se basa en el principio de máxima entropía de la teoría de la información, lo que garantiza que la distribución predicha sea coherente con la información disponible y con las restricciones establecidas.
2. Requiere datos de presencia únicamente: A diferencia de otros modelos que pueden requerir datos de presencia y ausencia, el modelo de máxima entropía puede funcionar con datos de presencia solamente, lo que lo hace particularmente útil cuando los datos de ausencia son difíciles de obtener o están sesgados.
3. Puede manejar múltiples variables ambientales: El modelo de máxima entropía puede incorporar múltiples variables ambientales para predecir la distribución de especies, lo que permite considerar la complejidad y la interacción de factores ambientales relevantes.

Así mismo, Phillips et al. (2006), indica en cuanto a los resultados obtenidos con el modelo de máxima entropía, los siguientes:

1. Mapas de distribución potencial: El modelo de máxima entropía puede generar mapas que representan la distribución potencial de una especie en un área

geográfica determinada, basándose en las condiciones ambientales presentes en ese lugar.

2. Identificación de factores clave: El modelo de máxima entropía puede revelar qué variables ambientales son las más importantes para explicar la distribución de una especie. Esto puede ayudar a comprender los factores que limitan o favorecen la presencia de la especie en un área determinada.
3. Evaluación de la idoneidad del hábitat: El modelo de máxima entropía también puede proporcionar una estimación de la idoneidad relativa del hábitat en diferentes áreas, lo que puede ser útil para la conservación y la gestión de especies.

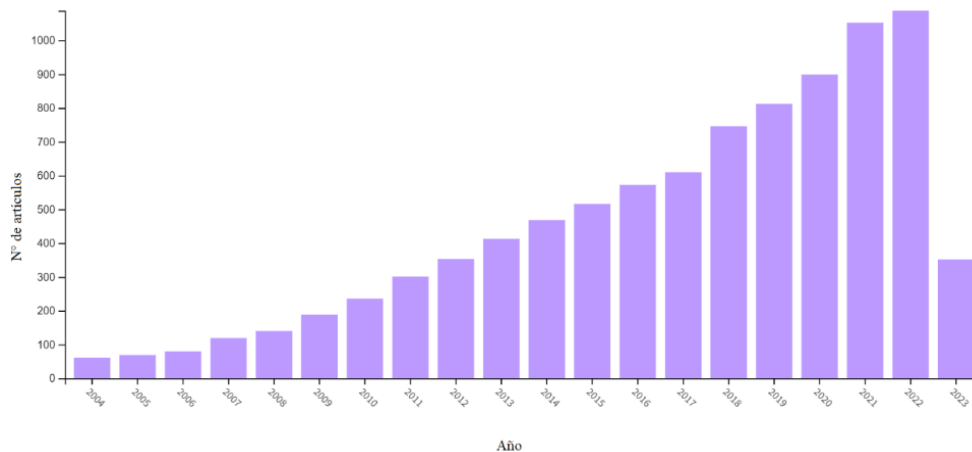
6 Estado del conocimiento

El análisis del estado del conocimiento se realizó con información de artículos científicos referentes a la temática del estudio reportados en la base de datos Web of Science – WOS, consultada el 25 de mayo de 2023, la revisión detallada de algunos de ellos con el objeto de conocer reportes de efectos de cambio climático en la distribución de las especies, especies forestales indicadoras del bosque seco tropical, modelos de circulación general referenciados como apropiados para las condiciones de Suramérica y Colombia, y, finalmente, con el uso de la herramienta de mapas Vosviewer visualizar los resultados de las consultas. La búsqueda inicial en WOS fue “climate change AND species distribution AND forest” que arrojó 9.075 artículos, producidos desde el año 2004.

Los resultados de la búsqueda indicaron que entre los años 2021 y 2022 se publicó la mayor cantidad de artículos (**Figura 5**) relacionados con cambio climático, distribución de especies y bosques, sin embargo, desde el 2004 en el mundo ha sido una temática en estudio creciente. Para los años 2018 y 2021 se evidencia saltos en la tendencia de producción de artículos, como consecuencia del desarrollo de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2016 (COP 22), en la que se dio especial atención a la problemática de la escasez de agua, la calidad del agua y la sostenibilidad del recurso frente a los desafíos del cambio climático; y para el año 2021 a razón de la pandemia de Covid-19.

Figura 5

Publicaciones anuales de artículos: cambio climático, distribución de especies y bosques.

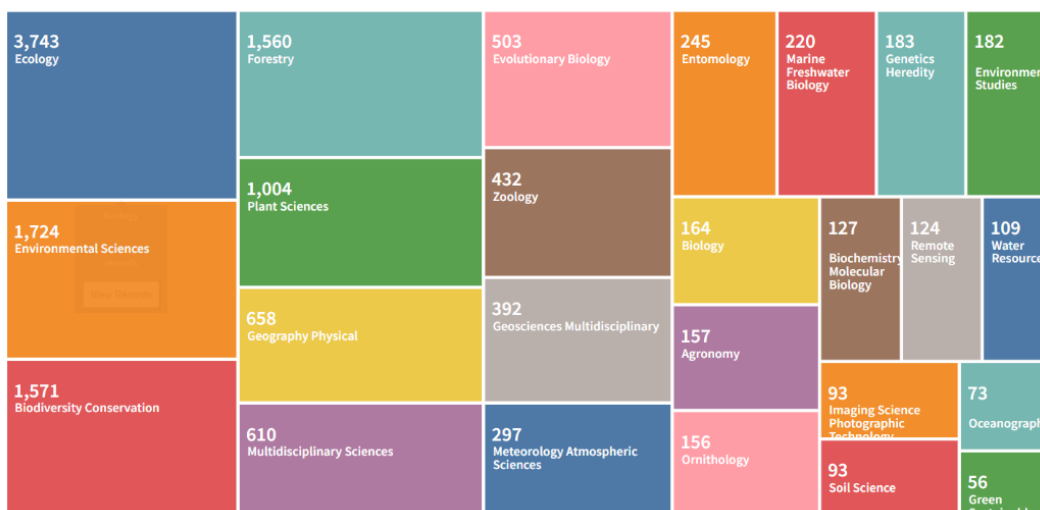


Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

La mayor cantidad de artículos se relacionan con áreas del conocimiento como la ecología, ciencias forestales y ambientales, conservación de la biodiversidad, geografía física y geociencias (**Figura 6**).

Figura 6

Artículos por área de conocimiento, cambio climático, distribución de especies y bosques



Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

La consulta inicial fue refinada bajo la condición de años de publicación desde 2020 a 2023, considerando la publicación de los informes especiales¹ del IPCC de 2018 y 2019 del ciclo del Sexto Informe de Evaluación IE6, donde se consideran los cinco nuevos escenarios ilustrativos de emisiones que sustenta las proyecciones de los modelos climáticos denominados trayectorias socioeconómicas compartidas o “SSP”, sobre las que se fundamenta este estudio.

¹Los tres informes especiales son: El cambio climático y la tierra: (...); Calentamiento global de 1,5°C: (...); y, El océano y la criosfera en un clima cambiante (IPCC, 2021)

Los resultados de la consulta refinada del periodo 2020 a 2023 fue de 3.391 artículos relacionados con áreas como la ecología, las ciencias forestales y ambientales, la conservación de la biodiversidad, la zoología, entre otras (**Figura 7**) cuyas investigaciones provienen principalmente de Estados Unidos, China, Alemania, España, Brasil, Canadá, Inglaterra, y otros (**Figura 8**).

Figura 7

Artículos por área de conocimiento, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023

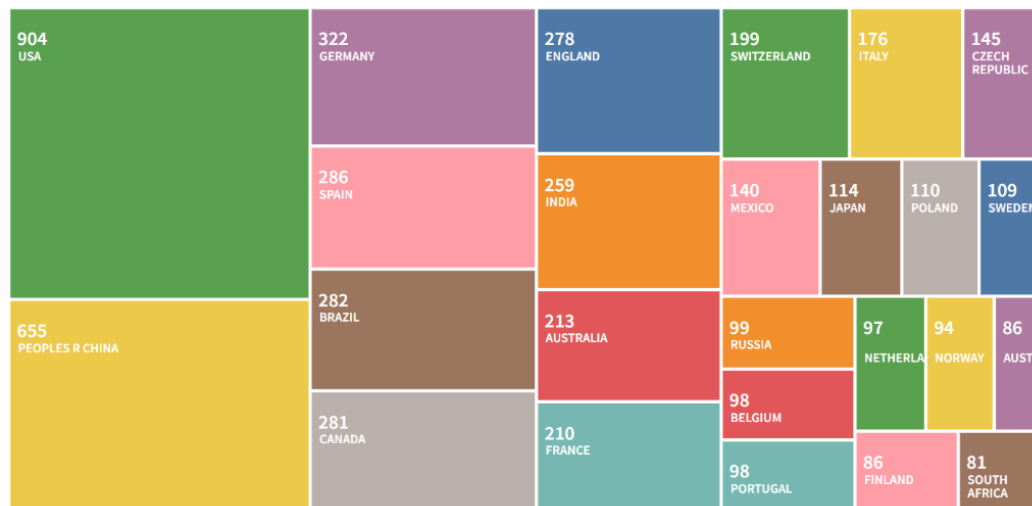


The areas on the chart are not strictly proportional to the values of each entry

Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

Figura 8

Publicaciones de artículos por países, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023



The areas on the chart are not strictly proportional to the values of each entry

Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

Los temas predominantes en los títulos de los artículos publicados son bosques, ecología y manejo forestal, ecología y evolución, biología del cambio global, diversidad y distribución (**Figura 9**). La organización de mayor producción de artículos es la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (**Figura 10**).

Figura 9

Publicaciones de artículos por títulos, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023



The areas on the chart are not strictly proportional to the values of each entry

Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

Figura 10

Publicaciones de artículos por organizaciones, cambio climático, distribución de especies y bosques desde 2020 a 2023

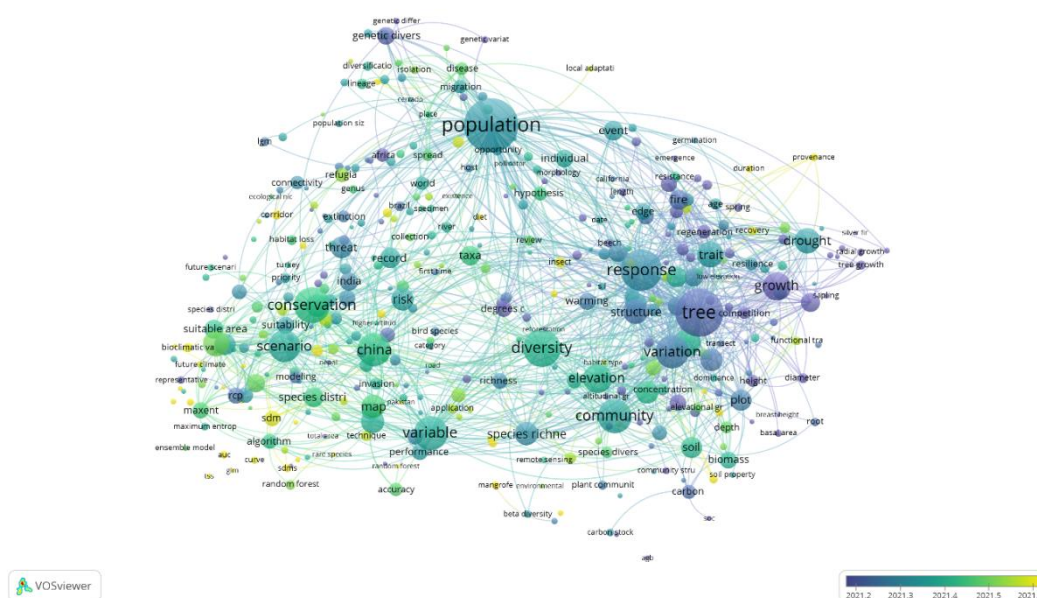


Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

las poblaciones como respuesta a variaciones y eventos que influyen en su estructura y funcionamiento, involucrando al ser humano en la rápida dinámica evolutiva global, en consecuencia, el organismo que no logre la adaptación corre el riesgo de extinción, sin dejar posibilidad al control humano, por ejemplo, los patógenos (**Figura 12**).

Figura 12

Mapa de redes por años, cambio climático, distribución de especies y bosques



Fuente: <https://www-webofscience-com/wos/woscc/summary/8d6812f2-2e05-4f06-bd41-6a77579551ce-8dfd5c0d/times-cited-descending/1>

La influencia de la inteligencia artificial y la democratización de la información se vinculan para identificar dos aspectos fundamentales en el abordaje del cambio climático y la distribución de especies, la respuesta adaptativa de las poblaciones y los escenarios donde se deberán apuntar los esfuerzos de conservación del acervo genético, las oportunidades de migración, especiación y finalmente, evolución (**Figura 13**).

Tabla 1

Estudios que exponen efectos del cambio climático en la distribución de las especies de flora

| AUTOR Y AÑO | TITULO | RESULTADOS |
|--|---|--|
| Stuart J. Davies, Iveren Abiem, Kamariah Abu Salim, (...) Daniel Zuleta - 2021 | ForestGEO: Understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network | Los modelos que predicen la distribución de especies requieren ser sometidos a evaluación a través de datos de referencia relacionados con factores como el tamaño de los árboles, su tasa de crecimiento, la mortalidad y la incorporación de nuevos individuos (reclutamiento). Esta evaluación debe considerar cómo estos parámetros varían en respuesta a las condiciones específicas del entorno y las características propias de las especies. |
| Sarah R. Weiskopf, Madeleine A. Rubenstein, Lisa G. Crozier, (...) Kyle Powys Whyte - 2020 | Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States | Las especies están adaptándose al cambio climático a través de una variedad de mecanismos, que incluyen adaptaciones en su morfología y comportamiento, ajustes en su fenología y desplazamientos en sus rangos geográficos. Estos cambios son el resultado de respuestas tanto plásticas como evolutivas. Estas respuestas de las especies y poblaciones, en combinación con los impactos directos del cambio climático en los ecosistemas, que abarcan desde eventos climáticos extremos hasta cambios graduales, están generando transformaciones de gran alcance en la productividad de los ecosistemas, las interacciones entre especies, la susceptibilidad a las invasiones biológicas y otras propiedades emergentes. |
| Lorenz Walthert, Andrea Ganthaler, Stefan Mayr, Matthias Saurer, Peter Waldner, Marco Walser, Roman Zweifel, Georg von Arx. - 2021 | From the comfort zone to crown dieback: Sequence of physiological stress thresholds in mature European beech trees across progressive drought | El haya europea se encuentra en una situación de vulnerabilidad ante la sequía. Esta vulnerabilidad se debe a que la especie continúa experimentando niveles sustanciales de embolia en su sistema de transporte de agua, y la defoliación que se produce es más una consecuencia de la embolia que una estrategia de prevención contra la misma. En áreas con suelos profundos y una alta capacidad de retención de agua, las reservas de agua en las capas profundas del suelo jugaron un papel fundamental en la mitigación del estrés causado por la sequía en las poblaciones de hayas |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | RESULTADOS |
|---|---|--|
| Cristina Carrillo-García, Lucas Girola-Iglesias, Mercedes Guijarro, Carmen Hernando, Javier Madrigal, Rubén G. Mateo. - 2023 | Ecological niche models applied to post-megafire vegetation restoration in the context of climate change | Los modelos regionales poseen la capacidad de abarcar un porcentaje significativamente mayor del nicho climático de las especies, lo que les permite generar pronósticos de cambio climático con un alto grado de confiabilidad. Al hacer uso de modelos de nicho ecológico (ENM) precisos, se obtiene una representación objetiva de las condiciones potenciales del hábitat de las especies. Además, esta aproximación brinda la oportunidad de analizar detenidamente áreas de vegetación, lo que resulta especialmente valioso en la gestión de la restauración de zonas afectadas por megaincendios en un contexto de cambio climático. |
| Emad Kaky, Victoria Nolana, Abdulaziz Alatawi, Francis Gilbert - 2020 | A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants | El empleo de los modelos MaxEnt y Random Forest (RF) arrojó los niveles de predicción más elevados, evaluados en función de AUC y TSS, mientras que los métodos SVM y CART exhibieron un rendimiento más modesto. La coincidencia en cuanto a la adecuación del hábitat entre MaxEnt y los mapas de pronóstico generados mediante métodos de conjunto se mantuvo constante en los escenarios actuales y futuros de emisiones. Los métodos de modelado que se basan en algoritmos únicos, especialmente MaxEnt, producen mapas de distribución con niveles de precisión comparables a los métodos de conjunto. Además, su facilidad de uso, menor demanda computacional y enfoque simplificado respaldan su empleo cuando los recursos de conocimiento o la capacidad computacional son limitados. |
| Ala A. Hama, Nabaz R. Khwarahm - 2023 | Predictive mapping of two endemic oak tree species under climate change scenarios in a semiarid region: Range overlap and implications for conservation | La disminución del hábitat para las especies supera la expansión de su entorno. Las variables clave que influyen significativamente en la distribución geográfica de estas especies son la temperatura promedio anual, la cantidad de precipitación anual y la temperatura mínima durante el período más frío. |
| Aly Coulibaly, Hospice Gérard Gracias Avakoudjo, Rodrigue Idohou, Eric Jose Vodounnon, Souleymane Diallo, Mamadou Cherif - 2023 | Impact of climate change on the distribution of <i>Bombax costatum</i> Pellegr. & Vuillet in Mali, West Africa | El análisis revela que los hábitats actualmente propicios para las especies de <i>B. costatum</i> abarcan el 10,780% del territorio de Malí. Según los escenarios climáticos, se prevé que el área de distribución de la especie, en particular sus regiones altamente idóneas, se expandirá de cara a los años 2040 y 2060. Asimismo, existe la posibilidad de que la especie se establezca en ciertas áreas de la región sudano-saheliana en el futuro |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | RESULTADOS |
|--|--|--|
| Silvia Pacheco, Lucio R. Malizia, and L. Cayuela - 2010 | Effects of climate change on subtropical forests of South America | Los modelos de proyección futura indican que la selva pedemontana experimentará una disminución de aproximadamente el 40% de su extensión, con una tendencia general de ascender a altitudes más elevadas. Asimismo, la distribución futura de las especies individuales muestra patrones similares, aunque con concentración en áreas específicas. Esto implica que la composición futura de la selva pedemontana podría diferir de la situación actual. En este contexto, la Reserva de Biosfera de las Yungas emerge como un territorio estable y esencial para la protección de este ecosistema. |
| Luca Santin, Ana Benítez-López, Luigi Maiorano, Mirza Čengić, Mark A. J. Huijbregts - 2021 | Assessing the reliability of species distribution projections in climate change research | La mayoría de los estudios sobre Modelado de Distribución de Especies (SDM) se fundamentaron en enfoques de modelado únicos (alrededor del 65%) y utilizaron conjuntos de datos relativamente pequeños, con menos de 50 observaciones (aproximadamente el 62%). Además, la gran mayoría de estos estudios se basaron exclusivamente en datos de presencia de especies (alrededor del 85%), generando resultados de modelos en formato binario (alrededor del 74%). La validación mediante la división de muestras fue el enfoque preferido, utilizado en el 94% de los casos. Es relevante destacar que, en comparación con el rendimiento real, la validación mediante la división de muestras tiende a arrojar resultados excesivamente optimistas. Por otro lado, la validación mediante el uso de bloques espaciales proporciona una estimación más precisa y objetiva del rendimiento del modelo, aunque pueden surgir desafíos cuando los conjuntos de datos presentan sesgos ambientales. |
| Yingchang, Mingyang Li, Chao Li, Zhenzhen Liu - 2020 | Optimized Maxent Model Predictions of Climate Change Impacts on the Suitable Distribution of <i>Cunninghamia lanceolata</i> in China | Las áreas pronosticadas como adecuadas para la distribución de <i>C. lanceolata</i> varían según los períodos contemplados en los distintos escenarios de cambio climático, y se observa un desplazamiento hacia el norte en la ubicación de sus centroides. Este análisis permitió la identificación de las condiciones climáticas necesarias para el mantenimiento de un hábitat adecuado para <i>C. lanceolata</i> en China y también reveló posibles cambios en su patrón de distribución en el futuro. Estos hallazgos brindan una sólida base científica para orientar la gestión, protección y restauración sostenible de los hábitats de esta especie de gran importancia económica. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | RESULTADOS |
|---|---|--|
| Xingang Tang, Yingdan Yuan, Xiangming, Jinchi Zhang - 2021 | Maximum Entropy Modeling to Predict the Impact of Climate Change on Pine Wilt Disease in China | El cambio climático ejerce un impacto significativo en las especies y puede agravar la amenaza de enfermedades forestales, entre las que se incluye el marchitamiento del pino. Se observó que las variables bioclimáticas vinculadas a la temperatura inciden en la distribución de las especies de pino, mientras que aquellas relacionadas con la precipitación desempeñan un papel fundamental en la distribución de <i>B. xylophilus</i> . |
| Lars Markesteijn and Lourens Poorter - 2009 | Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance | Las plántulas de especies que prosperan en bosques secos han desarrollado estrategias para optimizar la adquisición de agua desde las capas más profundas del suelo. Esto se logra mediante una asignación más significativa de biomasa a sus raíces profundas, lo que les permite explorar y acceder a las reservas subterráneas de agua. Además, para mitigar el riesgo de cavitación, estas plántulas desarrollan tallos densos. También minimizan la pérdida de agua al producir una cantidad reducida de tejido foliar, lo que a su vez reduce la transpiración. |
| Dominique Boucher, Sylvie Gauthier, Nelson Thifault, William Marchand, Martin Girardin, Morgane Urli - 2020 | How climate change might affect tree regeneration following fire at northern latitudes: a review | En cuanto a las etapas de regeneración, se aprecia una falta de información en algunas áreas, y se resalta la diversidad en las respuestas de diferentes especies a las condiciones climáticas. En el este de Canadá, las especies de árboles principalmente enfrentarán vulnerabilidades relacionadas con el aumento proyectado de las temperaturas. En contraste, en el oeste de Canadá, los bosques se verán mayormente afectados por la presencia de sequías. En particular, los bosques dominados por coníferas corren el riesgo de experimentar una reducción en su productividad en comparación con su estado actual. Adicionalmente, existe la posibilidad de una disminución en los suministros de madera provenientes de los bosques que están dominados por especies de árboles de hojas caducas en el futuro |
| Paul R. Elsen, William B. Monahan & Adina M. Merenlender - 2020 | Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change | En términos generales, los cambios en la distribución hacia elevaciones más altas llevaron a que las especies modeladas que originalmente se encontraban en zonas de menor altitud se expandieran hacia áreas con una menor influencia humana. Gracias a la topografía compleja, estas especies pudieron acceder a áreas de tierra menos afectadas en comparación con su ubicación inicial. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | RESULTADOS |
|--|--|---|
| K. J. Feeley, C. Bravo-Ávila, B. Fadrique, T. M. Pérez, D. Zuleta - 2020 | Climate-driven changes in the composition of New World plant communities | El incremento en las temperaturas se anticipa que conduzca a un aumento en la predominancia relativa de especies que prosperan en ambientes cálidos o que son resistentes al calor, lo que comúnmente se denomina "termofilización". Además, las modificaciones en los patrones de precipitación están previstas para provocar cambios en la abundancia de especies que tienen altas demandas de agua. En las últimas cuatro décadas (1970-2011), se ha observado el fenómeno de termofilización en las comunidades vegetales en la mayoría de las ecorregiones de América del Norte, América Central y América del Sur. |
| Christopher H. Trisos, Cory Merow & Alex L. Pigot - 2020 | The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change | Bajo un escenario de emisiones elevadas (en consonancia con RCP 8.5), los eventos de exposición abrupta empiezan antes de 2030 en las zonas tropicales oceánicas y se extienden hacia los bosques tropicales y zonas de latitudes más altas para el año 2050. En caso de que el aumento de la temperatura global se mantenga por debajo de los 2 grados Celsius, se proyecta que menos del 2% de las comunidades a nivel global enfrentarán eventos de exposición abrupta que afecten a más del 20% de sus especies constituyentes. No obstante, el riesgo se incrementa significativamente con un mayor calentamiento, poniendo en peligro al 15% de estas comunidades en un escenario de aumento de 4 grados Celsius. |

Fuente: Web of science “climate change AND species distribution AND forest”

En Colombia, las coberturas originales de bosque seco se estimaron en aproximadamente 8.000.000 ha (Etter, McAlpine, & Possingham 2008). Recientemente, se han estimado los relictos de bosques en las unidades biogeográficas del Caribe, Valles interandinos y la Orinoquia en 1.022.632 ha donde la mayoría (78.6%) están representados en fragmentos aislados de vegetación temprana y secundaria (García & González-M 2019).

En estas áreas del ecosistema de bosque seco tropical, las principales tensiones actuales provienen de la ganadería y la implementación de proyectos industriales, como centrales hidroeléctricas y la expansión de infraestructura vial de cuarta y quinta generación. Sin embargo, lo que más inquieta en términos de futuros escenarios son los cambios en los patrones de lluvia y un incremento en la duración de los períodos de sequía (Allen et al. 2017).

La elección de las tres especies forestales del ecosistema de bosque seco tropical sobre las que se realizó el estudio se fundamentó en el análisis en detalle de siete (7) artículos relacionados con estudios de la flora colombiana del bosque seco tropical (**Tabla 2**).

Así mismo, la definición del modelo de circulación general – MCG implementado en el estudio se basó en la selección y análisis detallado de doce (12) artículos relacionados con el uso de MCG de la CMIP6 en Colombia y Suramérica (**Tabla 3**).

Tabla 2

Estudios revisados que relacionan la composición y estructura de los bosques secos tropicales en Colombia

| AUTOR Y AÑO | TITULO | OBJETIVO | RESULTADOS |
|--|--|---|---|
| Gustavo H. Kattan, Camilo E. Sánchez*, Catalina Vélez, Laura Ramírez, Marcela Celis - 2019 | Beta diversity and knowledge gaps of Colombia's dry forests: implications for their conservation | Examinar, a nivel de Colombia, el estado actual del conocimiento acerca de los bosques secos en el país y los desafíos que se plantean para preservar la diversidad biológica. | Se observan marcados niveles de diversificación regional en lo que respecta a las poblaciones de plantas, aves y murciélagos en los bosques secos de Colombia. Además, se destaca que aproximadamente la mitad de las especies de plantas presentes en estos bosques dependen de aves y mamíferos para su dispersión. Sin embargo, es preocupante la ausencia de aves y mamíferos frugívoros de gran tamaño en las áreas de bosque que aún subsisten. Esta falta de especies clave podría tener efectos adversos en los procesos de dispersión de semillas y en la sucesión secundaria de la vegetación. |
| Andrés Avella-M., Nataly García-G., Francisco Fajardo-Gutiérrez, Andrés González-Melo - 2018 | Patrones de sucesión secundaria en un bosque seco tropical interandino de Colombia: implicaciones para la restauración ecológica | Entender los patrones y direcciones de sucesión en los bosques secos tropicales con el propósito de guiar los esfuerzos de restauración en este tipo de ecosistema. | Se documentaron un total de 214 especies pertenecientes a 154 géneros y 59 familias. Se identificaron cuatro direcciones de sucesión: dos en áreas con menor cantidad de precipitación, que transcurren desde la etapa de pastizales hasta la de arbustales y bosques, caracterizadas por una menor riqueza de especies y una estructura menos compleja. Las otras dos trayectorias se observaron en regiones con una mayor cantidad de precipitación, evolucionando desde pastizales sin árboles a zonas arboladas, arbustales y bosques con una mayor riqueza de especies y una estructura más compleja. |
| Silvia Suárez-R., Orlando Vargas-R. - 2019 | Composición florística y relaciones ecológicas de las especies de borde, parches y árboles aislados de un bosque seco tropical en Colombia. Implicaciones para su restauración ecológica | Realizar un análisis de la composición de especies vegetales en un bosque seco, así como de la estructura de sus áreas distintivas y los límites entre ellas, utilizando un enfoque basado en la distribución de categorías. El propósito de este análisis es identificar especies con potencial para actividades de restauración a través de un estudio de la flora presente en el paisaje y las | Las familias con la mayor diversidad de especies fueron Fabaceae y Bignoniaceae, seguidas de cerca por Malvaceae, Moraceae, Anacardiaceae y Euphorbiaceae. La prevalencia de la familia Fabaceae es una característica distintiva de los bosques secos tropicales. La mayoría de las especies de árboles que se registraron tenían diámetros inferiores a 30 centímetros, lo que las clasifica como individuos jóvenes. Se observó un diámetro a la altura del pecho (DAP) significativamente mayor en las áreas o parches del bosque, lo cual se debe a la presencia de especies arbóreas de gran tamaño en estas zonas. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|--|---|---|
| | | interacciones ecológicas que se establecen. | |
| Selene Torres-Rodríguez, Julián Esteban Díaz-Triana, Armando Villota, Wilson Gómez, Andrés Avella-M. - 2018 | Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia) | Formular seis estrategias de restauración | Es necesario finalizar la fase piloto, seguir adelante con un programa de monitoreo a largo plazo y planificar las próximas etapas de la Restauración Ecológica (RE) tomando en consideración tanto la eficiencia en costos como la selección de las Estrategias de Restauración (ER) más adecuadas y adaptables para su implementación en la zona de compensación. También, se deben presentar recomendaciones de especies en función de la cobertura vegetal. |
| Julián Esteban Díaz-Triana, Selene Torres-Rodríguez, Leslye Muñoz-P, Andrés Avella-M-2018 | Monitoreo de la restauración ecológica en un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia): programa y resultados preliminares | Examinar la eficacia de un sistema de seguimiento diseñado para evaluar el impacto de seis estrategias de intervención relacionadas con la vegetación, aplicadas en un entorno de bosque seco tropical. | Se presentan los resultados correspondientes a tres de las seis estrategias analizadas. Durante este estudio, se registró una tasa promedio de supervivencia del 87%, y se observó un aumento gradual en la frecuencia de individuos sin signos aparentes de problemas fitosanitarios. Es digno de mención el desempeño destacado de especies como <i>Albizia saman</i> , <i>Senna spectabilis</i> , <i>Maclura tinctoria</i> y <i>Celtis iguanaea</i> . En relación con la altura de crecimiento, se identificaron tasas superiores a 2.9 centímetros por mes, y el diámetro a la altura del pecho (DAB) presentó un incremento superior a 1 milímetro al mes en las tres estrategias estudiadas, siendo estos incrementos particularmente notables durante el periodo de lluvias. |
| Kelly T. Bocanegra-González, Evert Thomas, Marie-Laure Guillemín, Carolina Alcázar Caicedo, Luis Gonzalo Moscoso Higueta, Maily A. González, Dulcinéia De Carvalho - 2018 | Diversidad y estructura genética de cuatro especies arbóreas clave del Bosque Seco Tropical en Colombia | Se llevó a cabo un análisis de la diversidad genética utilizando marcadores moleculares ISSRs (Repetidos de Secuencia Simple Intermedia) en un total de 251 individuos pertenecientes a cuatro especies fundamentales presentes en el bosque seco tropical colombiano. Estas especies incluyen <i>Bursera simaruba</i> , <i>Platymiscium pinnatum</i> , <i>Hura crepitans</i> y <i>Caesalpinia ebano</i> . El estudio se enfocó en la región del Caribe, el enclave | Se observó que las cuatro especies presentaban una estructura genética, la cual podría estar relacionada con los cambios históricos ocurridos en el bosque seco tropical durante los periodos geológicos del Pleistoceno y el Holoceno. En última instancia, se lograron identificar las fuentes de semillas en cada región para cada especie, resaltando especialmente las zonas del norte del Caribe y el área del enclave del Cañón del Chicamocha, debido a su riqueza y singularidad genética. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|---|---|--|
| | | del Cañón del Chicamocha, el valle del río Cauca y el desierto de La Tatacoa. | |
| Jesús Ballesteros-Correa, Luís Morelo-García, Jairo Pérez-Torres - 2019 | Composición y estructura vegetal de fragmentos de bosque seco tropical en paisajes de ganadería extensiva bajo manejo silvopastoril y convencional en Córdoba, Colombia | El objetivo fue analizar la composición y estructura de fragmentos de bosque seco tropical ubicados en Córdoba. Se llevaron a cabo muestreos en cuatro parcelas de 0.1 hectáreas por fragmento, utilizando una versión adaptada del método de Gentry que incluye a todos los individuos con un diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o mayor a 1 centímetro. Se calculó el Índice de Valor de Importancia por Especie (IVI), el Índice de Valor de Importancia por Familia (IVIF) y se evaluó la tasa de recambio de especies. | Se documentaron 252 taxones pertenecientes a 137 géneros y 55 familias de plantas vasculares. Entre estas, Fabaceae (con 45 especies) y Rubiaceae (con 19 especies) exhibieron la mayor diversidad. La riqueza taxonómica fue notoriamente superior en los fragmentos de bosque seco tropical asociados al sistema silvopastoril (SSP) utilizado en la ganadería extensiva en comparación con los fragmentos bajo el sistema convencional (SC). Se registró una tasa de recambio de especies del 84.5% entre SSP y SC, con una superposición del 30.8%. En el SSP, las familias con mayor Índice de Valor de Importancia por Familia (IVIF) fueron Fabaceae (57.6) y Malvaceae (46.5), mientras que las especies con el IVI más alto incluyeron a <i>Bactris major</i> (40.8) y <i>Guazuma ulmifolia</i> (29.4). En los fragmentos del SC, las familias con un alto IVIF fueron Fabaceae (42.9) y Arecaceae (23.8), y las especies con mayor IVI fueron <i>Cavanillesia platanifolia</i> (31.8) y <i>Ceiba pentandra</i> (28). |

Fuente: Web of science “climate change AND species distribution AND forest”

Tabla 3

Estudios revisados sobre modelos de circulación general - MCG aplicados en Colombia y Suramérica

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|--|---|---|--|
| M. Olmo, J.-c. Espinoza, M. Bettolli, J. P. Sierra, C. Junquas, P. Arias, Vincent Moron, R. Balmaceda-Huarte. 2022 | Circulation Patterns and Associated Rainfall Over South Tropical South America: GCMs Evaluation During the Dry-To-Wet Transition Season | La representación del Sistema Monzón Sudamericano (SAMS) a través de MCG es de gran importancia para avanzar en la comprensión de los recientes cambios climáticos en el Sur Tropical de Sudamérica (STSA) y para proyectar los cambios futuros en un contexto de calentamiento global. Durante las últimas cuatro décadas, el STSA ha experimentado una prolongación de la estación seca, lo cual ha estado relacionado con diversas influencias climáticas. En este estudio, se realizó una evaluación de un conjunto de 16 simulaciones acopladas, correspondientes a la CMIP6, abarcando el período de 1979 a 2014. La evaluación se centró en cuán precisamente estos modelos replicaron la circulación atmosférica sobre el STSA, utilizando un enfoque basado en patrones de circulación (CP). | Este estudio permitió identificar algunos Modelos de Circulación General (MCG) que lograron una representación precisa de los patrones de circulación en el Sur Tropical de Sudamérica (STSA). Entre estos modelos, se destacan CESM2, CMCC-CM2-HR4 y MPI-ESM1-2-HR, lo que sugiere la importancia de avanzar hacia modelos de alta resolución para un análisis más fiable de las proyecciones futuras. Específicamente, los modelos CESM2 y CMCC-CM2-HR4 demostraron un excelente desempeño al replicar no solo los patrones de viento y las pautas de precipitación a nivel del suelo, sino también las circulaciones atmosféricas en diferentes altitudes. Otros modelos, como CanESM5 y NorESM2-MM, también lograron una buena reproducción de estas características, según su capacidad para capturar la variabilidad temporal de los patrones de circulación. Por el contrario, modelos como MPI-ESM1-2-LR y MIROC6 presentaron representaciones espaciales menos precisas de estos patrones de circulación transicionales, lo que se alinea con su desempeño limitado en la reproducción de las variaciones estacionales de los patrones de circulación. Además, la variabilidad en la frecuencia de patrones específicos durante este período de transición, como W3 y T2dw, influyó en la variabilidad de las precipitaciones en el sureste de la Amazonia y la región ZAC. Esto se reflejó de manera general en los diferentes MCG, siendo las representaciones de CESM2 y MPI-ESM1-2-HR las más precisas. |
| Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, | Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its | Modelo del Sistema Terrestre del Instituto Max Planck de Meteorología versión 1.2 (MPI-ESM1.2) | El enfoque principal del desarrollo se centró en la corrección de errores y la mejora de la representación de los procesos físicos, así como en el aumento del rendimiento computacional, la versatilidad y la usabilidad general. Se |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|---------------------------------|----------------------------|--------------|---|
| M., Brokopf, R., et al. (2019). | Response to Increasing CO2 | | <p>realizaron diversas mejoras, incluyendo la implementación de nuevas parametrizaciones para la radiación y los aerosoles atmosféricos. También se abordaron errores de codificación previos, algunos de ellos significativos, que afectaban parcialmente las parametrizaciones de nubes, convección y turbulencia en el modelo. Para perfeccionar la representación de los procesos terrestres, se introdujo un esquema de hidrología del suelo multicapa y se amplió la biogeoquímica terrestre para incluir el ciclo del nitrógeno. Además, se realizó una sustitución del modelo de descomposición del suelo y la basura y se mejoró la representación de los incendios forestales. La biogeoquímica oceánica se mejoró mediante la representación pronóstica de las cianobacterias, lo que permite capturar la respuesta de la fijación de nitrógeno a los cambios climáticos. También se incluyeron mejoras en la sedimentación de detritos y se realizaron varios refinamientos adicionales. Un aspecto novedoso del proceso de ajuste y calibración del modelo fue considerar explícitamente el calentamiento registrado en los instrumentos. Esto se hizo para abordar una alta sensibilidad climática, que se estimó en alrededor de 7 grados Celsius, causada por la presencia de nubes bajas en los trópicos. Esta alta sensibilidad climática se había encontrado en una versión anterior del modelo, y se consideró esencial para concordar con el calentamiento observado. Como resultado, el modelo finalmente logró una sensibilidad climática de 2,77 grados Celsius a una duplicación de los niveles de dióxido de carbono (CO2) en comparación con las condiciones preindustriales. Esto mantuvo la respuesta del modelo altamente no lineal al aumento del forzamiento del CO2, lo cual se logró a través de un modelo simplificado de dos capas.</p> |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|---|--|---|
| Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N. et al. 2021 | Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America | Los datos simulados correspondientes de 38 modelos CMIP6 se obtuvieron de los archivos de Earth System Grid Federation (ESGF) (https:// esgf-node. llnl. gov/search/ cmip6), para el período histórico y cuatro escenarios futuros, a saber, SSP1–2.6. (SSP126), SSP2–4.5 (SSP245), SSP3–7.0 (SSP370) y SSP5–8.5 (SSP585) en tres periodos. | De acuerdo con los mapas normalizados de precipitación en relación con la temperatura en siete subregiones, basados en el período de referencia de 1995-2014, se observa que varios MCG exhiben valores cercanos a los observados en la zona NWS. Entre estos MCG se encuentran FGOALS-f3-L, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM y CESM2-WACCM. Para realizar estas comparaciones, se calculó el promedio de 38 MCG individuales y dos conjuntos de datos de observación en cada región. Luego, se normalizaron 41 puntos de datos con respecto a la media y la desviación estándar en todo el espacio de muestra, considerando la temperatura y la precipitación. |
| Ávila-Díaz A, Torres RR, Zuluaga CF, Cerón WL, Oliveira L, Benezoli V, Rivera IA, Marengo JA, Wilson AB, Medeiros F. 2023 | Current and Future Climate Extremes Over Latin America and Caribbean: Assessing Earth System Models from High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) | <p>Se procedió a la evaluación del rendimiento de un subconjunto de modelos HighResMIP, que son componentes del CMIP6, en su capacidad para simular eventos climáticos extremos de temperatura y precipitación diaria en la región de América Latina y el Caribe durante el período comprendido entre 1981 y 2014. Esta evaluación se basó en la comparación con tres conjuntos de datos de alta resolución (ERA5, CHIRPS y GMFD).</p> <p>Asimismo, se investigó el impacto de incrementar la resolución espacial horizontal en los modelos HighResMIP en términos de la precisión en la estimación de la variabilidad climática extrema a nivel local y regional. Por último, se llevaron a cabo análisis de los cambios proyectados en eventos extremos de temperatura y precipitación para el período de 2021 a 2050, dentro del contexto del escenario SSP5-8.5.</p> | <p>En relación con los tres grupos de resoluciones horizontales empleados, podemos concluir que no se aprecia una correlación sólida entre un aumento en la resolución y un mejor desempeño de los modelos HighResMIP. Este hallazgo está en línea con lo que se ha observado en investigaciones previas, tal como señalan Bador et al. (2020) y Scoccimarro et al. (2022).</p> <p>Vale la pena destacar que, entre los cinco modelos líderes en términos de índices de temperatura, tanto para ERA5 como para GMFD, dos de ellos pertenecen al grupo con resolución de $1,00^\circ \times 1,00^\circ$ (ECMWF-IFS-LR y G 1 L-MME). En cuanto a los índices de precipitación, tres de los cinco modelos superiores al compararlos con el conjunto de datos ERA5 se encuentran en el grupo con resolución de $0,50^\circ \times 0,50^\circ$ (HadGEM3-GC31-MM, ECMWF-IFS-HR y EC-Earth3P), y dos están en el grupo con resolución de $1,00^\circ \times 1,00^\circ$ (CMCC-CM2-HR4 y G 1 L-MME). Por otro lado, al utilizar el conjunto de datos CHIRPS, los resultados se invierten, ya que dos modelos con una resolución de $0,50^\circ \times 0,50^\circ$ (ECMWF-IFS-HR y G 2 I-MME) y tres con una resolución de $1,00^\circ \times 1,00^\circ$ (ECMWF-IFS-LR, CNRM-CM6-1 y G 1 L-MME) figuran entre los mejores.</p> |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|--|--|--|---|
| Arnold Loayza-Huillca, P.Joser Atauchi, A.Townsend Peterson, A.Erick Yabar-Landa | Potential upslope and latitudinal range shifts for Andean potato weevils <i>Premnotrypes</i> species, in the tropical Andes of South America | Para analizar cómo el cambio climático podría afectar la distribución potencial de las especies seleccionadas en los años 2050 y 2090, se emplearon las proyecciones climáticas de tres modelos globales de clima: CNRM-CM6-1, MIROC6 y EC-Earth3-Veg. Estas proyecciones se llevaron a cabo considerando dos diferentes escenarios de concentración representativa, conocidos como SSP245 y SSP585. | Los cambios observados en estas especies claramente no son aleatorios, y su dirección coincide con el aumento previsto de las temperaturas. Sin embargo, no podemos descartar la posibilidad de que estos cambios se deban a factores distintos al calentamiento global. Es importante tener en cuenta que la elección de los MCG utilizados puede introducir incertidumbre y variabilidad en los resultados del modelo. La futura distribución potencial de estas especies puede estar influenciada por la selección específica del MCG, y la incertidumbre proviene de diversas fuentes (Deser et al., 2012; Peterson et al., 2018; Visser et al., 2000). La identificación de los MCG más adecuados para las transferencias de modelos espacio - temporales sigue siendo un desafío y una fuente de incertidumbre en esta metodología. |
| Hongfen Teng, Songchao Chen, Bifeng Hu, Zhou Shi | Future changes and driving factors of global peak vegetation growth based on CMIP6 simulations | Se analizaron ocho modelos CMIP6: IPSL-CM6A-LR, CNRM-ESM2-1, BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CanESM5, MIROC-ES2L, MIROC6, MRI-ESM2-0 | De los ocho modelos CMIP6 analizados en esta investigación, se observó que IPSL-CM6A-LR exhibió el mayor sesgo en comparación con los valores medios proyectados en los escenarios SSP370 y SSP585. Este sesgo fue especialmente notorio en el caso de los bosques mixtos, bosques caducifolios de hojas aciculares y bosques perennes de hojas aciculares. En contraste, CNRM-ESM2-1 presentó el sesgo más bajo entre todos los modelos en lo que respecta a los cambios futuros en la vegetación bajo los escenarios SSP370 y SSP585. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|---|--|---|
| Zhuojin Wu, Tai Gao, Youqing Luo, Juan Shi | Prediction of the global potential geographical distribution of <i>Hylurgus ligniperda</i> using a maximum entropy model | Las variables ambientales empleadas en esta investigación se extrajeron del conjunto de datos WorldClim v2.1 (http://www.worldclim.org/). Estas variables incluyen 19 características bioclimáticas, que abarcan datos sobre la temperatura máxima promedio mensual, la temperatura mínima promedio mensual y la precipitación total mensual. Para proyectar el clima futuro, se utilizaron datos ambientales correspondientes a los períodos de 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 y 2081–2100, considerando cuatro escenarios climáticos: SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585. El modelo climático global empleado fue el BCC-CSM2-MR. | <p>Los invasores biológicos representan una amenaza significativa para los ecosistemas y la biodiversidad. En el estudio, se empleó MaxEnt para proyectar la potencial distribución geográfica global de <i>Hylastes ligniperda</i>. Mediante la combinación de escenarios climáticos actuales y proyecciones para el futuro cercano, se identificaron diversas variables ambientales críticas que influyen en la posible extensión geográfica de <i>H. ligniperda</i>. Bajo condiciones climáticas futuras, se anticipa un incremento en el área total de distribución potencial de esta especie, y se prevén cambios significativos en las regiones de latitudes medias de Europa, Asia occidental y América del Norte que serán propicias para su establecimiento.</p> <p>Este estudio aporta nuevos conocimientos que podrían ser de utilidad en la formulación de estrategias para la gestión y control de <i>H. ligniperda</i>.</p> |
| Gabriela Ferreira Campos Guerra, Mariana Moncassim Vale, Rodrigo Tardin, Daniel Silva Fernandes | Global change explains the neotropical rattlesnake <i>Crotalus durissus</i> (Serpentes: Viperidae) range expansion in South America | Se emplearon variables bioclimáticas y datos relativos al uso de la tierra y a la cobertura del suelo procedentes de la base de datos ecoClimate, que se encuentra disponible en la dirección https://www.ecoclimate.org . Estos datos estuvieron disponibles a una resolución de 0,5 grados para dos períodos temporales: 1900-1949 (previo a 1950) y 1950-1999 (posterior a 1950). ecoClimate se basa en simulaciones climáticas multitemporales que han sido procesadas y generadas por los CMIP6 y el Proyecto de Armonización del Uso de la Tierra (LUH2), ofreciendo información sobre condiciones pasadas, presentes y futuras (Lima-Ribeiro et al., 2015; Vale et al., 2021). | Los resultados sugieren que, a partir de la década de 1950, el rango geográfico de <i>C. durissus</i> ha experimentado un incremento principalmente debido a la expansión de áreas de pastizales y, en segundo lugar, en respuesta a las transformaciones continuas en el clima, como cambios en las isotermas y los patrones de precipitación. Esta extensión en la distribución geográfica de la serpiente de cascabel neotropical ha abarcado regiones previamente no idóneas para su presencia, incluyendo el Chaco argentino y la zona de deforestación en la región del Amazonas, áreas que no eran apropiadas para su hábitat antes de la década de 1950. Este aumento en el rango de distribución de la serpiente de cascabel neotropical plantea preocupaciones desde una perspectiva de salud pública, ya que se trata de una serpiente venenosa con relevancia médica. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|--|--|--|
| Roxana Vásquez-Tobón y Mariano Altamiranda-Saavedra | Evaluación de la influencia del cambio climático en la distribución geográfica potencial de la mosca <i>Calliphora nigribasis</i> Macquart, 1851: (Diptera, Calliphoridae) | Se evaluaron los modelos MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR. | De acuerdo con los hallazgos, <i>C. nigribasis</i> parece ser una especie que se ve influenciada por el cambio climático, ya que su hábitat geográfico óptimo desde una perspectiva ambiental parece ser impactado por el aumento de las temperaturas. |
| Susana Velásquez Fernández | Evaluación de la capacidad de los modelos CMIP6 para simular la evapotranspiración y precipitación en el norte de Suramérica | Se evaluaron los modelos CMIP6: CanESM5, GFDL-ESM4, MIROC6, MPI-ESM1-2 HR, MPI-ESM1-2LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM, NorESM2-MM para simular la evapotranspiración y precipitación | El modelo NorESM2-MM destaca por su representación sobresaliente en comparación con los otros modelos para todas las variables y estaciones del año. |
| Daniela Grajales Cardona | Estimación de curvas Intensidad –Duración – Frecuencia no estacionarias para el departamento de Antioquia | Se estimaron las curvas IDF no estacionarias utilizando los modelos CMIP6: MIROC6, BCC-CSM2-MR y AWI-CM-1-1-MR; y los modelos CMIP5: CMCC-CM, MIROC5 y MRI-CGCM3. | Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) estacionarias y no estacionarias, basadas en la base de datos proporcionada por EPM (1999-2018), se sitúan por encima de las curvas IDF calculadas utilizando los datos de precipitación ajustados del modelo MIROC6. Esto podría deberse a la limitación de los modelos del CMIP en capturar los eventos extremos de precipitación, como se evidenció en la correlación entre los datos observados en el terreno y los datos de los modelos. También se observa una tendencia a la disminución en la magnitud de la precipitación en los modelos del CMIP para el departamento de Antioquia. |

| AUTOR Y AÑO | TITULO | MCG OBJETIVO | RESULTADOS |
|---|---|---|---|
| P. A. Arias, G. Ortega, L. D. Villegas and J. A. Martínez. 2021 | Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements | Se evaluaron 44 modelos CMIP6 y 59 modelos CMIP5. | Los modelos del CMIP6 que ofrecen una representación más precisa de la precipitación estacional en Colombia incluyen SAM0-UNICON, GFDL-CM4, FGOALS-g3, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, MPI-ESM1-1-2-HAM y <u>MPI-ESM1-1-2-HR</u> . Por otro lado, los modelos que mejor reproducen la temperatura de la superficie del aire son GFDL-CM4, GFDL-ESM4, PMI-ESM2-0, NESM3, MPI-ESM-1-2-LR y MPI-ESM-1-2-HAM. Esto sugiere que los modelos GFDL-CM4 y MPI-ESM-1-2-HAM ofrecen simulaciones razonables de la estacionalidad de ambas variables en Colombia. |

Fuente: Web of science “climate change AND species distribution AND forest”, MCG

7 Metodología

7.1 Área de estudio

Colombia se encuentra en la región noroeste de América del Sur, abarcando latitudes entre 13°N en Santa Catalina y 4°S en el Amazonas, y longitudes entre 67°W en Puerto Inírida y 83°W en San Andrés. Limita al norte con el mar Caribe, al este con Venezuela y Brasil, al sur con Perú y Ecuador, y al oeste con el océano Pacífico (**Figura 14**). Tiene una extensión total de 1.141.748 kilómetros cuadrados, incluyendo el área continental como el área marítima (CIA, 2022).

En cuanto al área continental de Colombia, se extiende por aproximadamente 1.038.700 kilómetros cuadrados, comprende regiones montañosas de los Andes, los valles interandinos, las llanuras del Caribe y Orinoco, y la región amazónica (IDEAM, 2018). La extensión marítima que le pertenece a Colombia es de aproximadamente 100.210 kilómetros cuadrados en aguas del mar Caribe como del océano Pacífico, condición que la convierte en un punto clave para el comercio y la navegación (CIA, 2022).

Por su ubicación geográfica y relieve montañoso, Colombia presenta una gran variedad de condiciones climáticas, entre las cuales se distinguen cinco regiones climáticas principales: cálido y húmedo en la costa caribeña, cálido y seco en la región de la Guajira, templado en los valles interandinos, frío en las zonas de alta montaña de los Andes y caluroso en la región amazónica. Estas condiciones climáticas variables dan lugar a una rica diversidad de ecosistemas y especies adaptadas a diferentes climas y microclimas (IDEAM, 2018).

Figura 14

Localización área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Internacionalmente, Colombia es reconocida como uno de los países megadiversos del mundo debido a su excepcional riqueza de especies y ecosistemas. Alberga una amplia variedad de hábitats, que incluyen bosques tropicales, páramos, manglares, llanuras, humedales y selvas amazónicas. Cuenta con aproximadamente el 10% de las especies conocidas en el mundo, con una alta diversidad de aves, anfibios, orquídeas y mariposas, entre otros grupos (Páez-Vacas et al., 2020). Adicional a lo anterior, alberga alta

diversidad de recursos naturales, como petróleo, gas, minerales y biodiversidad, lo que le confiere una importancia económica y ambiental en la región (Mares, 2019).

La posición geopolítica de Colombia es estratégica debido a su ubicación como puerta de entrada a América del Sur, y esta misma posición hace que fenómenos climáticos globales la afecten, como El Niño y La Niña (IDEAM, 2017).

7.2 Registro de ocurrencia de las especies

Los registros de ocurrencia de las tres especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., se recopilieron para el territorio colombiano, y fueron descargados del repertorio del Servicio de Información sobre Biodiversidad Global - GBIF (<https://www.gbif.org/es/species/search?q=>, 2023) (**Figura 15**). La calidad de los datos se controló mediante la identificación y eliminación de registros duplicados.

Figura 15

Descarga de ocurrencia de especies del Servicio de Información sobre Biodiversidad Global

The screenshot shows the GBIF Occurrences search results for *Enterolobium cyclocarpum* in Colombia. The search results are displayed in a table format, and the 'DOWNLOAD' tab is selected. The download options table is as follows:

| | Raw data | Interpreted data | Multimedia | Coordinates | Format | Estimated data size |
|------------------------------|----------|------------------|------------|------------------|--|-------------------------------------|
| ± SIMPLE | X | ✓ | X | ✓ (if available) | Tab-delimited CSV (for use in Excel, etc.) | 11 MB (3 MB zipped for download) |
| ± DARWIN CORE ARCHIVE | ✓ | ✓ | ✓ (links) | ✓ (if available) | Tab-delimited CSV (for use in Excel, etc.) | 35 MB (8 MB zipped for download) |
| ± SPECIES LIST | X | ✓ | X | X | Tab-delimited CSV (for use in Excel, etc.) | |

Below the download options, a 'DOWNLOAD REPORT' is provided:

Total: 21,019
Licence: CC BY-NC 4.0
Year range: 1898–2023
With year: 99.7 %
With coordinates: 100 %
With taxon match: 100 %

Fuente: Recuperado de <https://www.gbif.org/> 2023

7.3 Variables bioclimáticas

Los datos de las 19 variables bioclimáticas para el periodo de referencia (actual) se descargaron de la base de datos WorldClim versión 2.1 del periodo 1970 a 2000 (www.worldclim.org/current) para una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km) y con sistema de referencia espacial WGS84. Así mismo, a partir de la base de datos WorldClim se modeló la distribución futura de las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., utilizando dos escenarios de cambio climático SSP2 – 4.5: +4.5 W·m⁻², denominado Desigualdad marcada, y, SSP3-7.0: +7.0 W·m⁻², titulado Desarrollo sostenible desigual; se consideraron dos períodos 2021-2040 y 2041-2060, y se

implementó el modelo climático global (GCM) MPI-ESM1-2-HR proporcionado por el modelo CMIP6 como las futuras variables bioclimáticas (**Tabla 4**).

Tabla 4

Variables bioclimáticas utilizadas para predecir la distribución actual y futura de tres especies de flora del bosque seco tropical

| Nomenclatura | Descripción | Unidades |
|--------------|--|----------|
| BIO1 | Temperatura media anual | °C |
| BIO2 | Rango medio diario (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima)) | °C |
| BIO3 | Isotermalidad (BIO2/BIO7) ($\times 100$) | - |
| BIO4 | Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$) | °C |
| BIO5 | Temperatura máxima del mes más cálido | °C |
| BIO6 | Temperatura mínima del mes más frío | °C |
| BIO7 | Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6) | °C |
| BIO8 | Temperatura media del trimestre más húmedo | °C |
| BIO9 | Temperatura media del trimestre más seco | °C |
| BIO10 | Temperatura media del trimestre más cálido | °C |
| BIO11 | Temperatura media del trimestre más frío | °C |
| BIO12 | Precipitación anual | mm |
| BIO13 | Precipitación del mes más húmedo | mm |
| BIO14 | Precipitación del mes más seco | mm |
| BIO15 | Estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de Variación) | - |
| BIO16 | Precipitación del trimestre más húmedo | mm |
| BIO17 | Precipitación del trimestre más seco | mm |
| BIO18 | Precipitación del trimestre más cálido | mm |
| BIO19 | Precipitación del trimestre más frío | mm |

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

Adicionalmente, se utilizó la variable de elevación cuyos datos se derivan del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con datos topográficos sobre casi el 80% de las superficies terrestres de la Tierra, creando el primer conjunto de datos casi global de elevaciones terrestres (Fick et al. 2017).

El modelo climático global MPI-ESM1-2-HR es la versión acoplada de mayor resolución del modelo del sistema terrestre del Instituto Max Planck y es la base para la fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados y las predicciones climáticas estacionales y decenales actuales (Müller et al. 2018). El MPI-ESM1.2-HR emplea el doble de resolución horizontal en su componente atmosférico (T127, ~100 km) que mejora las trayectorias de las tormentas en el Atlántico Norte, la frecuencia de bloqueo atmosférico y la representación de la Oscilación del Atlántico Norte – NAO.

Según Arias et al. (2021) el modelo MPI-ESM1-1-2-HR es uno de los siete (7) modelos CMIP6 con mejores simulaciones de precipitación estacional en Colombia, característica que comparte con modelos como SAM0-UNICON, GFDL-CM4, FGOALS-g3, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, MPI-ESM1-1-2-HAM, mientras que los modelos con mejor representación de la temperatura de la superficie del aire son GFDL-CM4, GFDL-ESM4, PMI-ESM2-0, NESM3, MPI-ESM-1-2-LR y MPI-ESM-1-2-HAM. Arias et al. (2021) sugiere que los modelos GFDL-CM4 y MPI-ESM-1-2-HAM exhiben simulaciones razonables de la estacionalidad de ambas variables en Colombia, sin embargo, no se encuentran disponibles en la base de datos de datos meteorológicos y climáticos globales de alta resolución espacial consultada para el estudio (WorldClim).

7.4 Método de modelación

La predicción de la distribución geográfica potencial actual y futura de las especies se realizó utilizando el algoritmo máxima entropía - MaxEnt versión 3.4.4, y para la preparación de la información el software ArcGis 10.8 con su extensión Spatial Analyst.

El algoritmo máxima entropía combina los datos de ocurrencia con las características bioclimáticas actuales en los puntos de observación para dibujar un mapa global de los hábitats potenciales de la especie en el área de estudio y el mapa de la distribución futura de sus hábitats favorables de acuerdo con las proyecciones climáticas.

La teoría de la entropía máxima se propuso por primera vez en 1957 (Phillips et al., 2006). El modelo Java MaxEnt, que se desarrolló en base a esta teoría, se ha convertido en el modelo de distribución de especies (SDM) más utilizado en estudios conexos (Phillips et al., 2006). Se ha utilizado en investigaciones sobre diseño de reservas naturales, estudios de especies en peligro de extinción, evaluación de riesgos de especies exóticas e impacto del cambio climático (Khanum et al., 2013; Padalia et al., 2014; Liu et al., 2015).

Además, se utilizó la curva de características operativas del receptor (ROC) del método de la navaja para evaluar la confiabilidad del modelo (Dorfman et al., 1992). El área bajo la curva ROC (Area Under of Curve AUC) se utilizó para evaluar el potencial SDM (Li et al., 2020). El valor AUC, que va de 0 a 1, se correlaciona positivamente con la precisión de predicción del modelo; cuanto mayor sea el valor de AUC, mayor será su fiabilidad (Wiley et al., 2003). El valor AUC superior a 0,9 indica robustez de SDM (Howell et al., 2011; Buckman-Sewald et al., 2014).

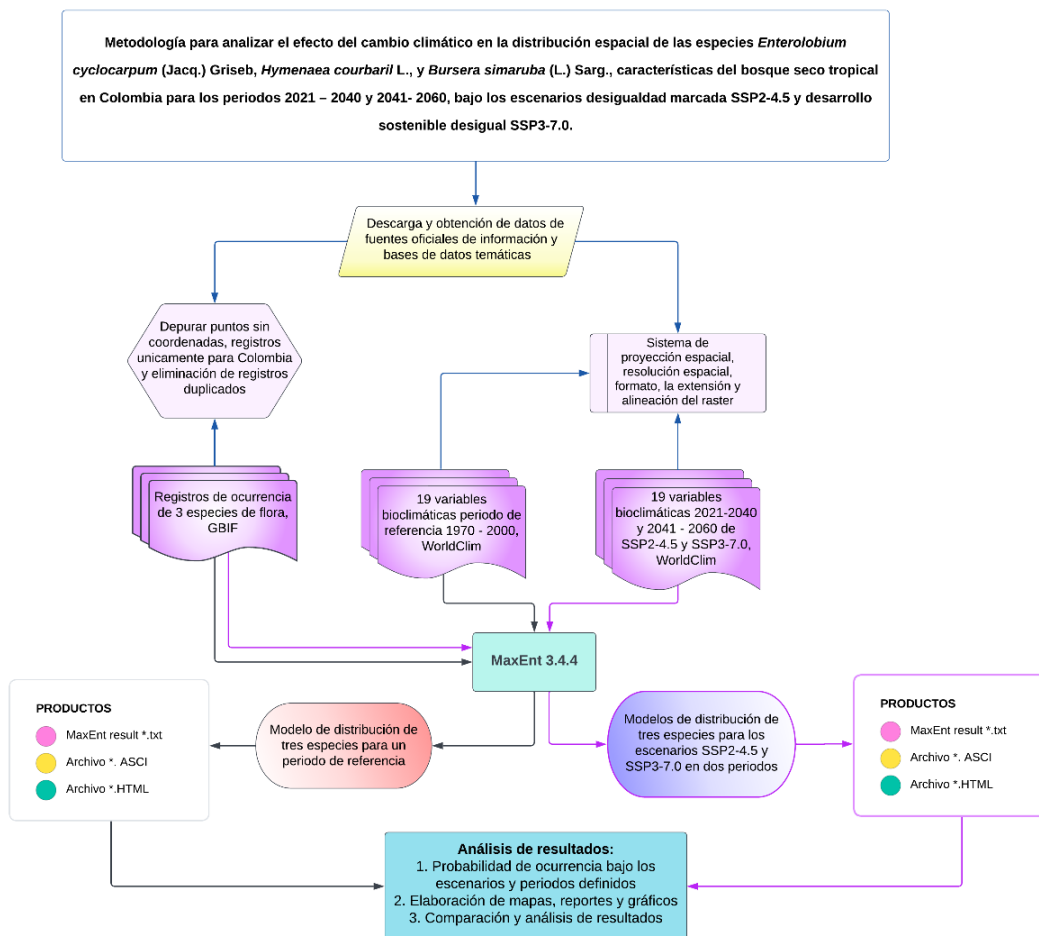
Los mapas de distribución potencial de especies en el modelo MaxEnt se realizaron en el formato logístico. Las probabilidades de existencia de las especies entre 0 y 1 se reclasificaron a través de la función de reclasificación de ArcGIS 10.8, y se definieron dos categorías de acuerdo con probabilidad de existencia: hábitat adecuado e inadecuado.

Finalmente, mediante análisis espacial y cálculo de áreas de pérdidas, ganancias y estabilidad de hábitat con relación a los resultados de la distribución en condiciones bioclimáticas de referencia actuales, así como, la determinación de las áreas de hábitat inadecuado o con ausencia de las especies de acuerdo con los registros de ocurrencias obtenidos de la base de datos Gbif, se analizó la dinámica espacial de las especies en los periodos y escenarios abordados.

A continuación, se presenta el flujo de trabajo a desarrollar para analizar el efecto del cambio climático en la distribución espacial de las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., características del bosque seco tropical en Colombia para los periodos 2021 – 2040 y 2041- 2060, bajo los escenarios desigualdad marcada y desarrollo sostenible desigual (**Figura 16**).

Figura 16

Flujo metodológico para el desarrollo del estudio



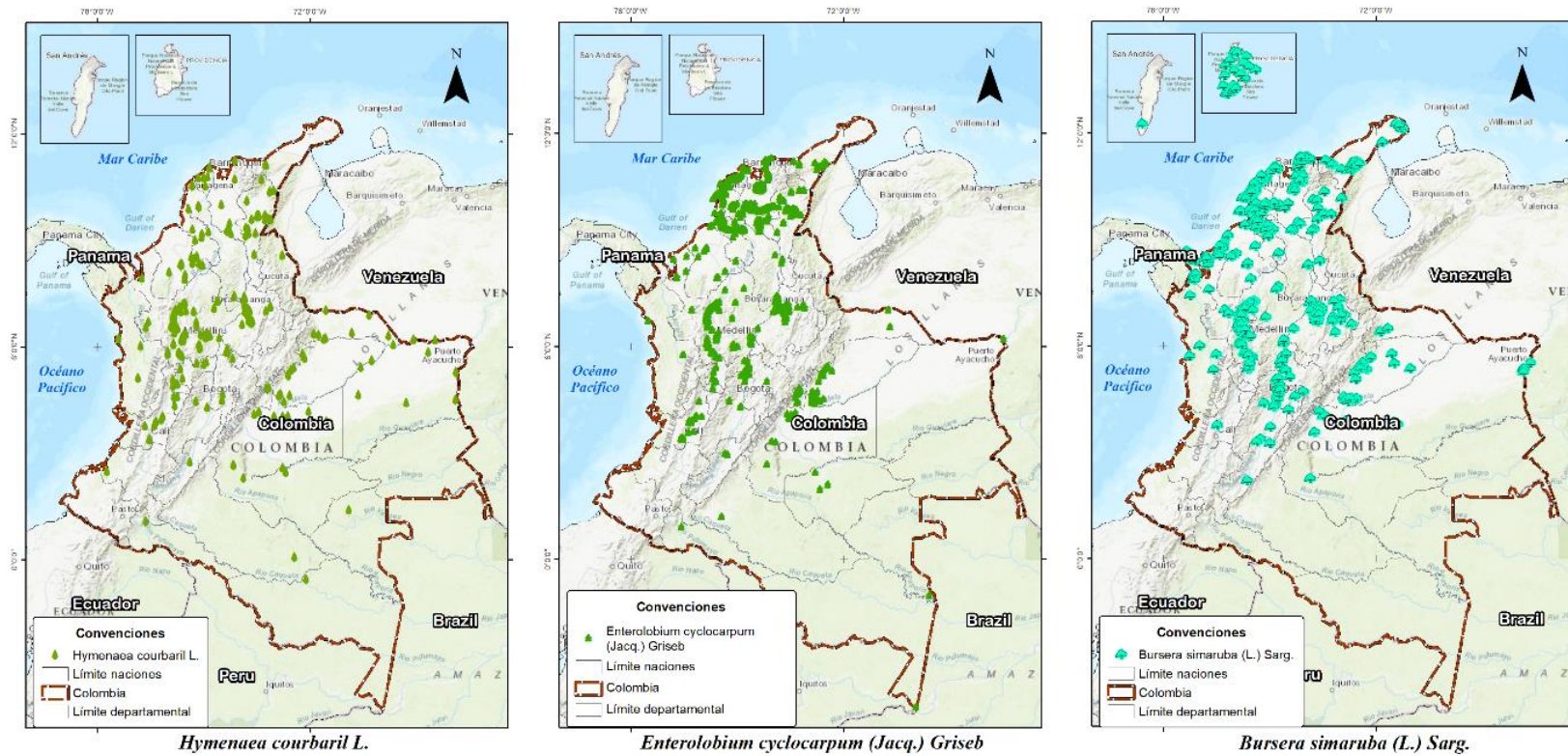
Fuente: Elaboración propia

8 Resultados y discusión

Se obtuvieron 21.019 registros de ocurrencias de la especie de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, 3.478 para la especie *Hymenaea courbaril* L., y 85.809 de *Bursera simaruba* (L.) Sarg., distribuidos en el territorio nacional en las regiones del Caribe, en los valles geográficos de los ríos Magdalena y Cauca, en el valle del Patía, en la región Norandina, y al norte de la Orinoquia donde se han identificado áreas con formaciones vegetales de bosque seco tropical (**Figura 17**). *Bursera simaruba* (L.) Sarg., cuenta con registros en el archipiélago de San Andrés y especialmente, en Providencia. Los datos de ocurrencias fueron depurados por cada especie eliminando duplicados y registros sin coordenadas.

Figura 17

Registros de ocurrencias de las tres especies forestales en estudio



Fuente: Elaboración propia

Nota: Consultas de registros de ocurrencias por especie: *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb GBIF.org (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.n9x4c5>; *Hymenaea courbaril* L. GBIF.org (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.bgez7b>; *Bursera simaruba* (L.) Sarg. GBIF.org (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.xuhgtf>.

8.1 Rendimiento del modelo

Las pruebas de validación para las tres (3) especies indicaron que los modelos tienen una buena capacidad predictiva. El análisis de las curvas ROC de las especies arrojaron valores elevados del AUC, superiores a 0,9 por lo que se asume que los modelos fueron lo suficientemente robustos como para proyectar la presencia de especies en el área de estudio. En cuanto a los resultados de las variables climáticas, se observó que en las condiciones actuales las variables que no contribuyen en la distribución de las especies son BIO9: Temperatura media del trimestre más seco para *Hymenaea courbaril* L., y BIO10: Temperatura media del trimestre más cálido para las otras especies analizadas.

La variable BIO15: Estacionalidad de las Precipitaciones (Coeficiente de Variación) ocupa el primer lugar de porcentaje de contribución para los modelos de las tres especies, por lo que se considera la variable bioclimática más influyente para el estudio; las variables BIO3: Isotermalidad ($BIO2/BIO7$) ($\times 100$); y BIO4: Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$), son variables que en todos los casos presentaron importantes contribuciones, pero en diferente nivel.

En los siguientes apartes, se presentan los resultados de la distribución de referencia actual de los hábitats adecuados o inadecuados para las tres especies analizadas y la contribución de las variables bioclimáticas en ellos, con el fin de determinar las áreas potenciales o hábitats ecológicos adecuados de las especies.

8.2 Hábitat ecológico adecuado actual

Para modelar la SDM de las tres (3) especies para el periodo de referencia actual se utilizaron datos de entrenamiento al 80% y datos de validación al 20% con 10 repeticiones, sobre las cuales se eligió el ráster de la repetición con el mayor valor de AUC. En el modelo de distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L., para el periodo de referencia actual el valor de la máxima sensibilidad y especificidad de entrenamiento (Umbral logístico) para clasificar los archivos ráster de salida de MaxEnt en hábitats adecuados o inadecuados es de 0,1449, el AUC resultado fue de 0,945 y las variables bioclimáticas que mayor contribución porcentual tienen sobre el modelo fueron la estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de Variación) con el 29,1%, isothermalidad con 21,2%, precipitación del trimestre más frío con 7,9%, la temperatura máxima del mes más cálido con 7,4%, la estacionalidad de la temperatura con 7,1%, y el rango anual de temperatura con 5,3% (**Tabla 5**).

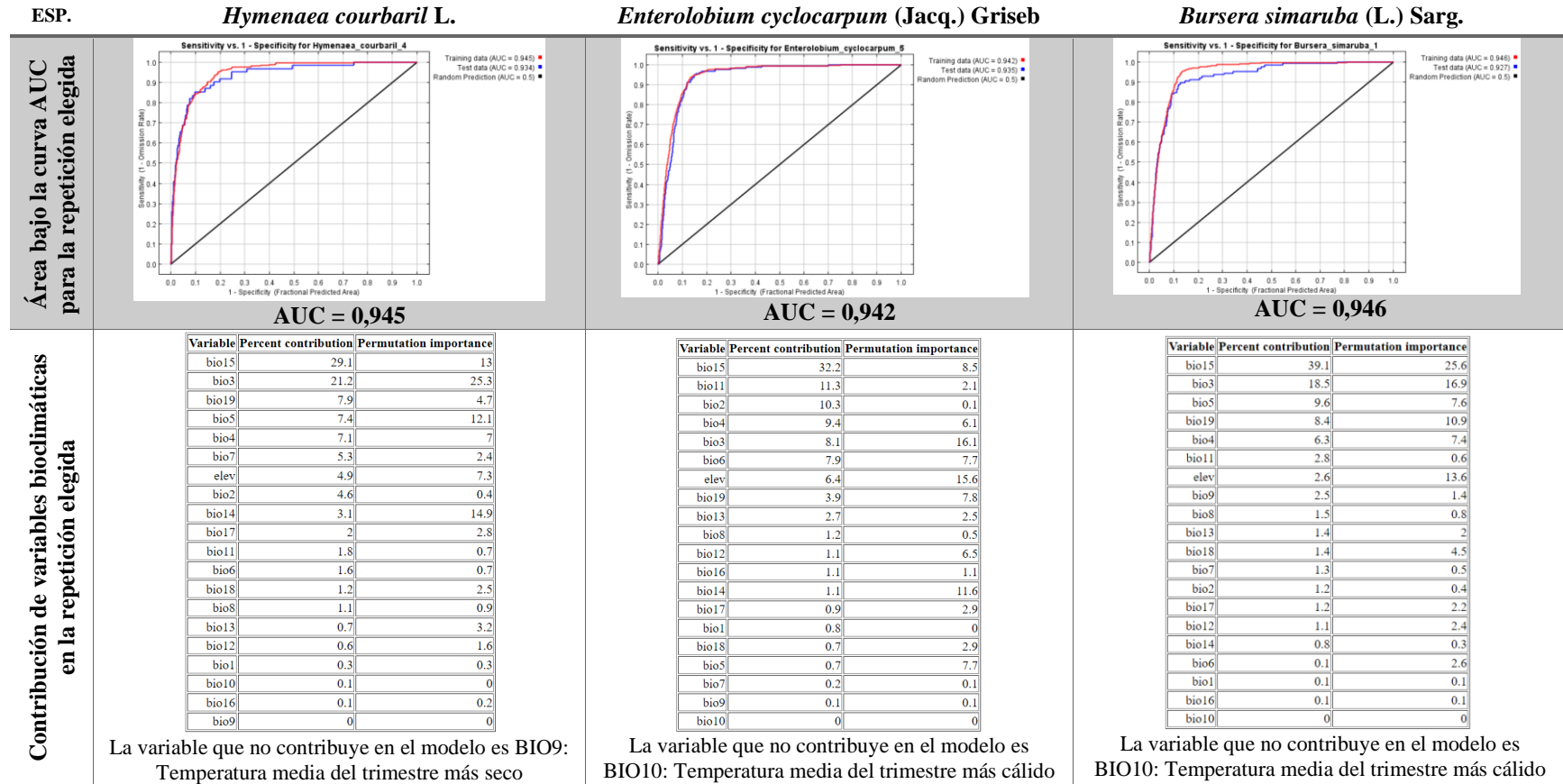
En el modelo de distribución de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., el valor de la máxima sensibilidad y especificidad de entrenamiento es de 0,246 y el AUC de 0,942; las variables bioclimáticas que mayor contribución porcentual presentaron en la modelación fueron la estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de Variación) 32,2%, la temperatura media del trimestre más frío con 11,3%, el rango medio diurno (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima)) con 10,3%, la estacionalidad de la temperatura con 9,4%, la isothermalidad con 8,1%, y la temperatura mínima del mes más frío con 7,9%.

En el modelo de SDM de *Bursera simaruba* (L.) Sarg., para el periodo de referencia actual el Umbral logístico es de 0,2767, el AUC de 0,946 y las variables bioclimáticas que mayor contribución porcentual presentaron sobre el modelo fueron la estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de Variación) 39,1%, isothermalidad con 18,5%, la temperatura máxima del mes más cálido con 9,6%, la precipitación del trimestre más frío con 8,4%, la estacionalidad de la temperatura con 6,3%, y la temperatura media del trimestre más frío con 2,8% (**Tabla 5**).

Conforme a las figuras resultantes para determinar la probabilidad de distribución de las especies bajo las condiciones de referencia actuales (**Figura 18, Figura 19, Figura 20**), se confirma que el ecosistema de bosque seco tropical al cual están asociadas las tres especies en estudio, se distribuye en siete regiones, como lo expreso Kattan et al., (2019) en áreas costeras, valles interandinos, estribaciones montañosas bajas y algunas planicies. Estas áreas de distribución limitadas suponen las condiciones medio ambientales para comprender las adaptaciones y las estrategias de estas especies para sobrevivir.

Tabla 5

Resultados de AUC y contribución de variables bioclimáticas de referencia actuales en la determinación de probabilidad de distribución de las tres especies de flora

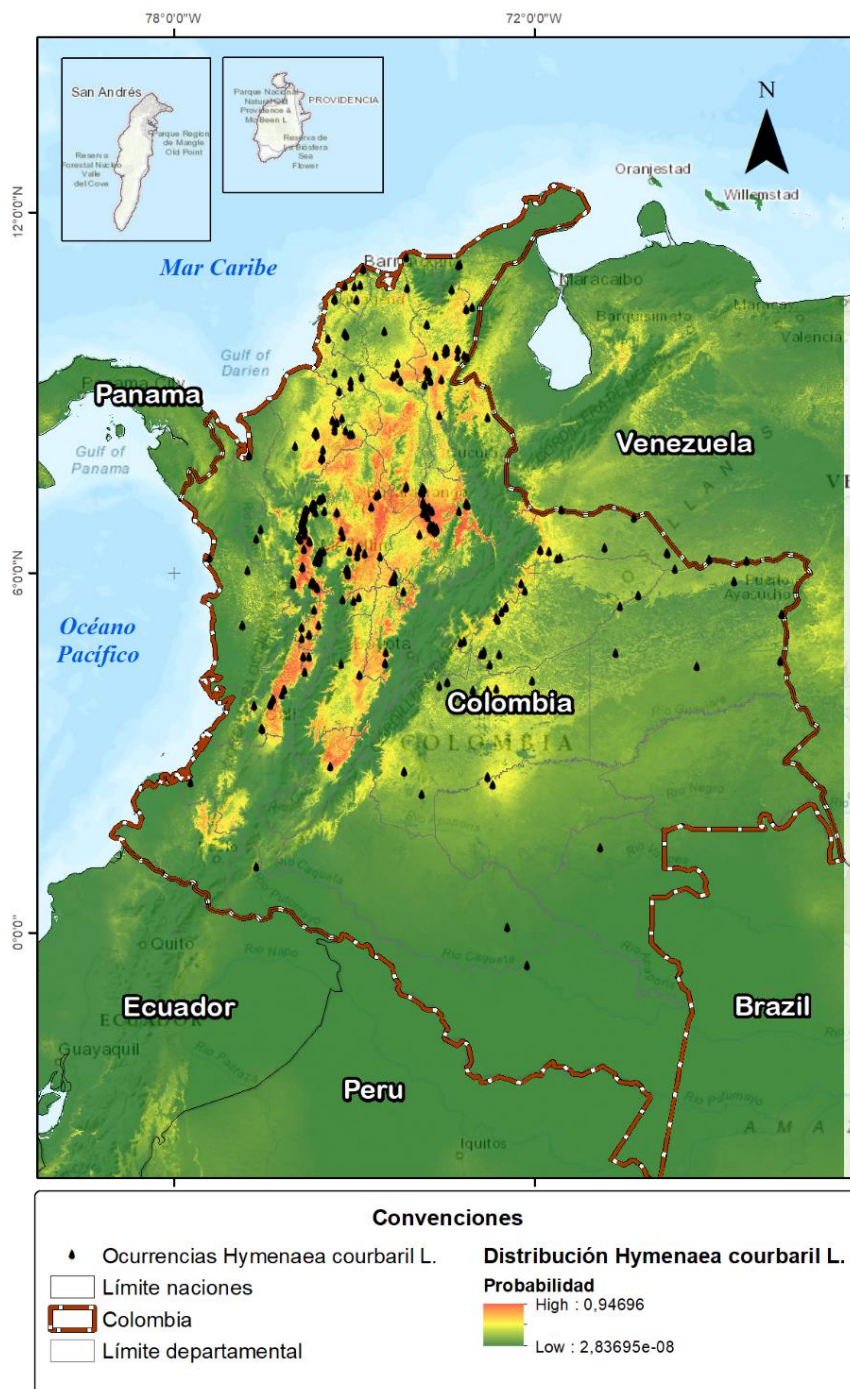


Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Resultados de la probabilidad de distribución de *Hymenaea courbaril* L. en condiciones bioclimáticas de referencia actual

Periodo de referencia actual - Hymenaea courbaril L.

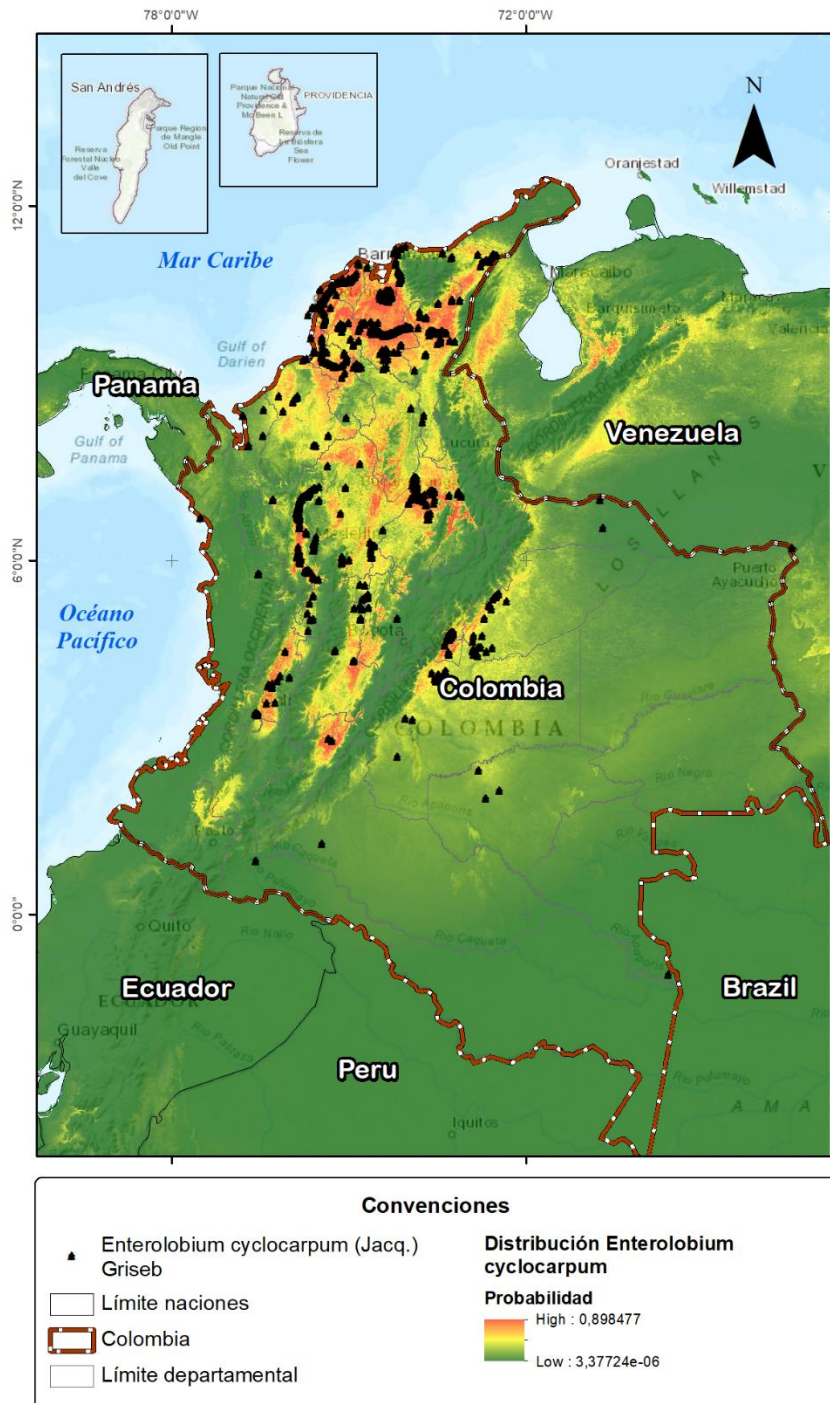


Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Resultados de la probabilidad de distribución de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. en condiciones bioclimáticas de referencia actual

*Periodo de referencia actual -
Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb*

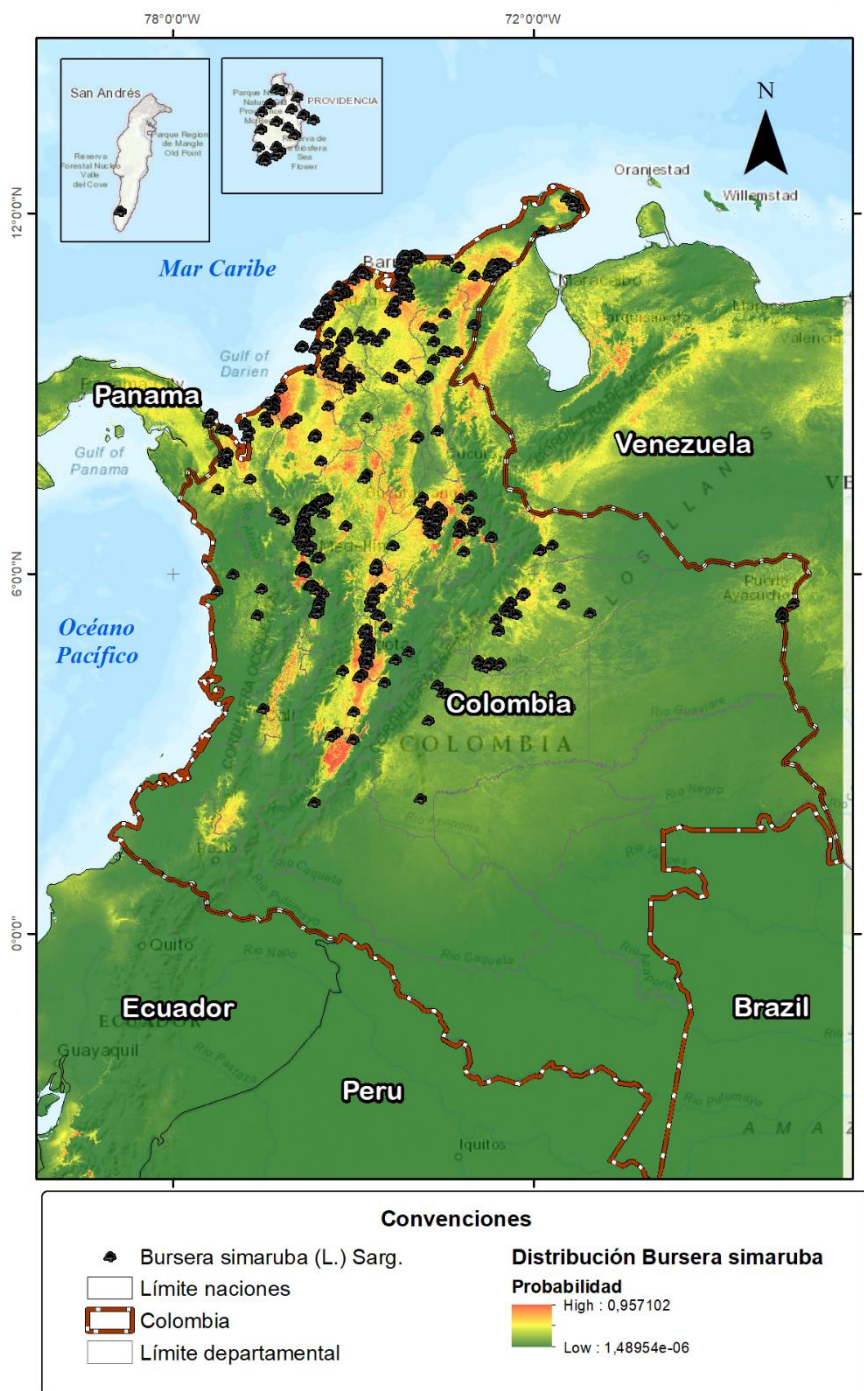


Fuente: Elaboración propia

Figura 20

*Resultados de la probabilidad de distribución de *Bursera simaruba* (L.) Sarg. en condiciones bioclimáticas de referencia actual*

Periodo de referencia actual - *Bursera simaruba* (L.) Sarg.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con Hutchinson (1957) y Soberón (2007) el nicho ecológico incluye las condiciones ambientales en las que una especie puede sobrevivir, crecer y reproducirse, es decir, que, para las especies en estudio características del bosque seco tropical, el nicho ecológico es restringido en el territorio nacional principalmente para *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., de acuerdo con los resultados obtenidos, su nicho ecológico no alcanza al 15% del territorio del país (**Tabla 6**).

Tabla 6

Áreas potenciales de distribución de las especies en estudio en el territorio colombiano en condiciones bioclimáticas de referencia actuales

| ESPECIE | ÁREAS POTENCIALES DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES | | | |
|--|---|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | Hábitat inadecuado | | Hábitat adecuado | |
| | Área (km ²) | % de área del país | Área (km ²) | % de área del país |
| <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb | 969.586,60 | 85,26 | 167.654,52 | 14,74 |
| <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg | 974.745,75 | 85,71 | 162.495,70 | 14,29 |
| <i>Hymenaea courbaril</i> L. | 825.647,84 | 72,60 | 311.596,61 | 27,40 |

Fuente: Elaboración propia.

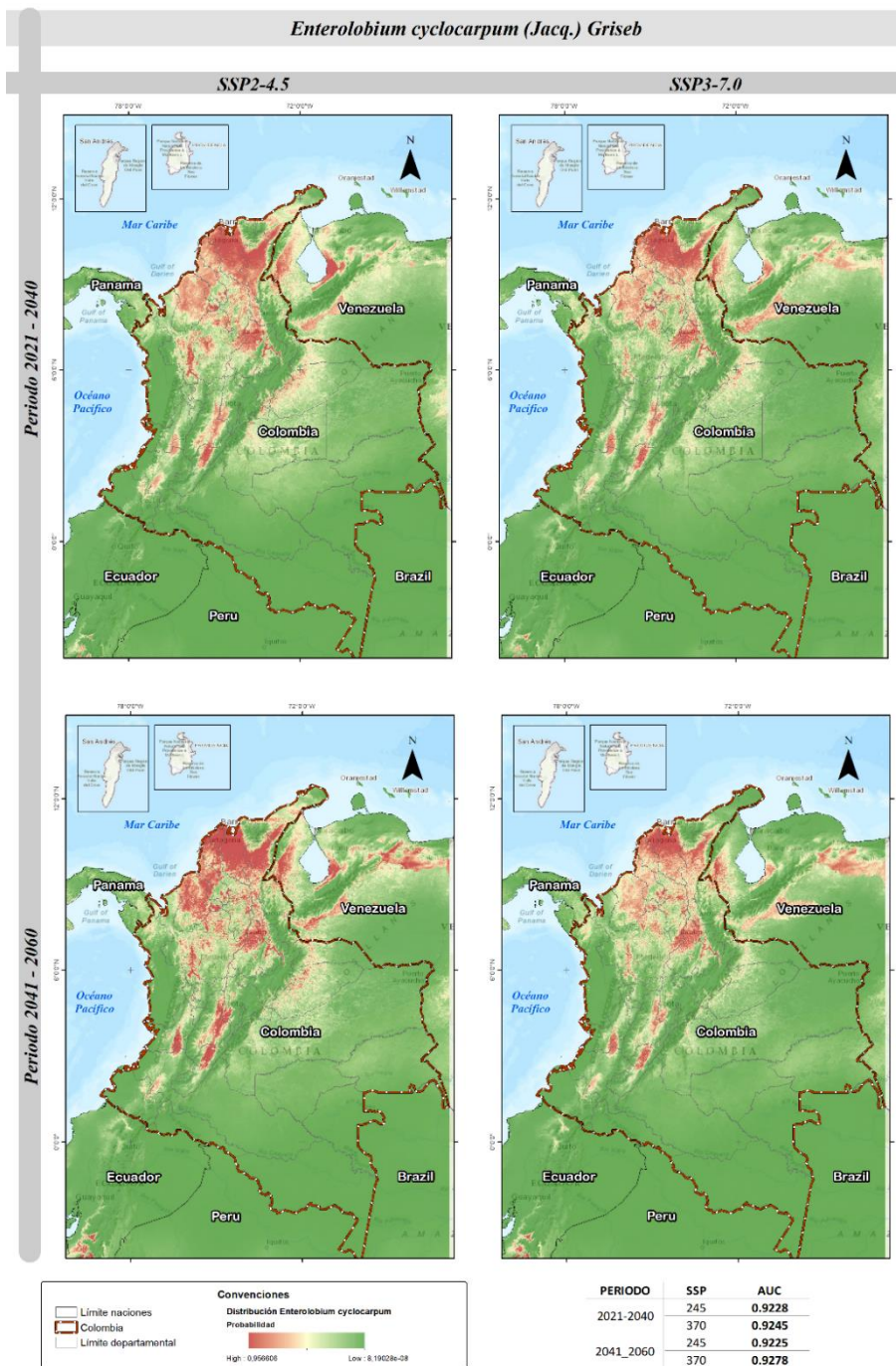
Por su parte, la especie *Hymenaea courbaril* L., tiene un mayor rango de distribución espacial alcanzando el 27% del territorio continental de Colombia (**Tabla 6**), lo que se refleja en un rango de distribución un poco más amplio, especialmente en los valles interandinos, al norte y occidente de la Orinoquia, al noroccidente del piedemonte amazónico y en los departamentos de Sucre, Bolívar y Cesar.

8.3 Hábitats ecológicos adecuados futuros

Para determinar la probabilidad de la SDM de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (**Figura 21**), *Hymenaea courbaril* L. (**Figura 22**), y *Bursera simaruba* (L.) Sarg. (**Figura 23**), bajo los dos escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 en los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 en Colombia, se realizó el procesamiento en MaxEnt de los registros geográficos observados de las especies y las variables bioclimáticas conforme a los escenarios propuestos, utilizando datos de entrenamiento al 80% y de validación al 20% con 10 repeticiones, sobre las cuales se seleccionó el ráster de la repetición con el mayor valor de AUC.

Figura 21

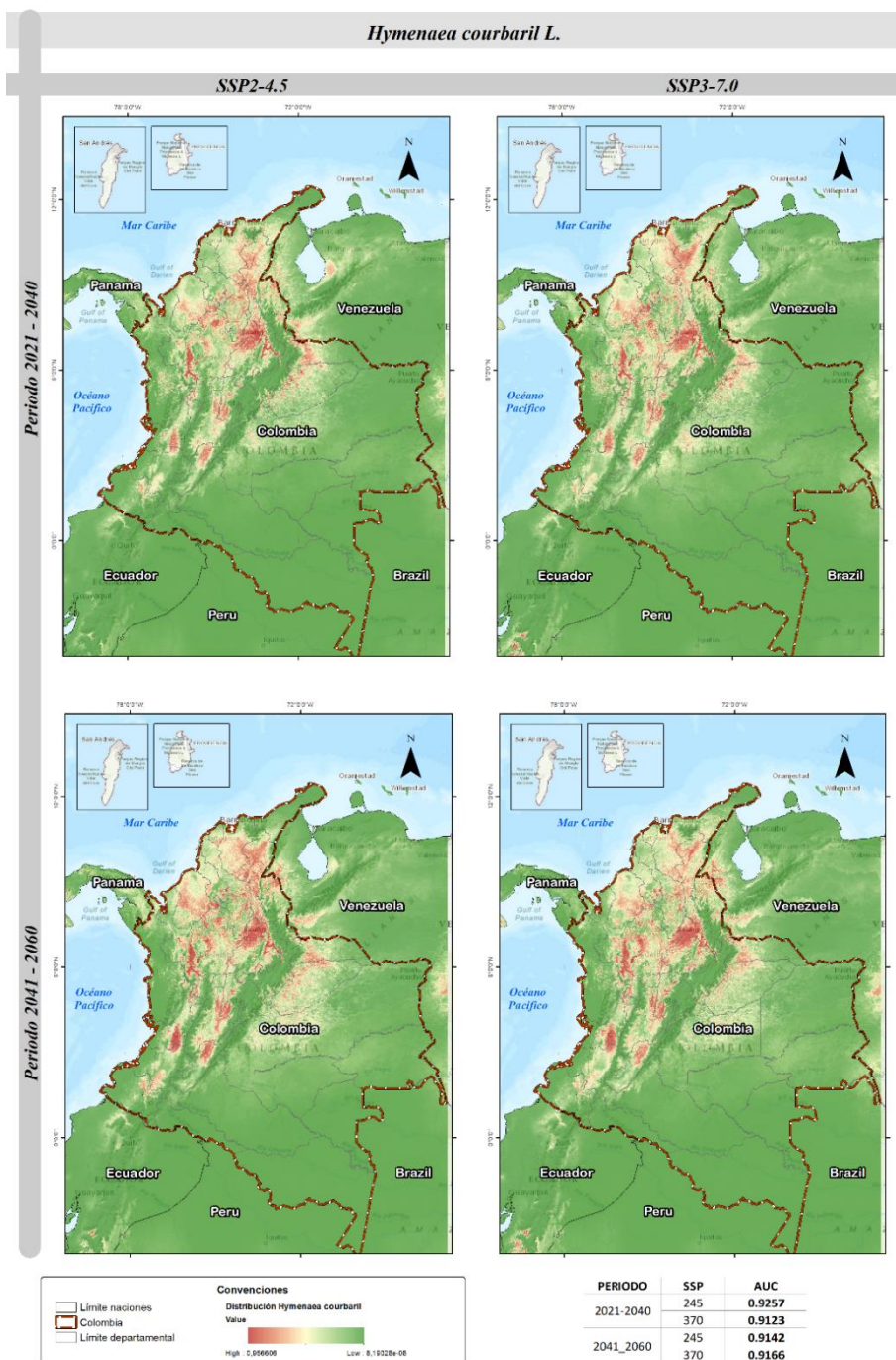
Probabilidad en la distribución de la especie de flora Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

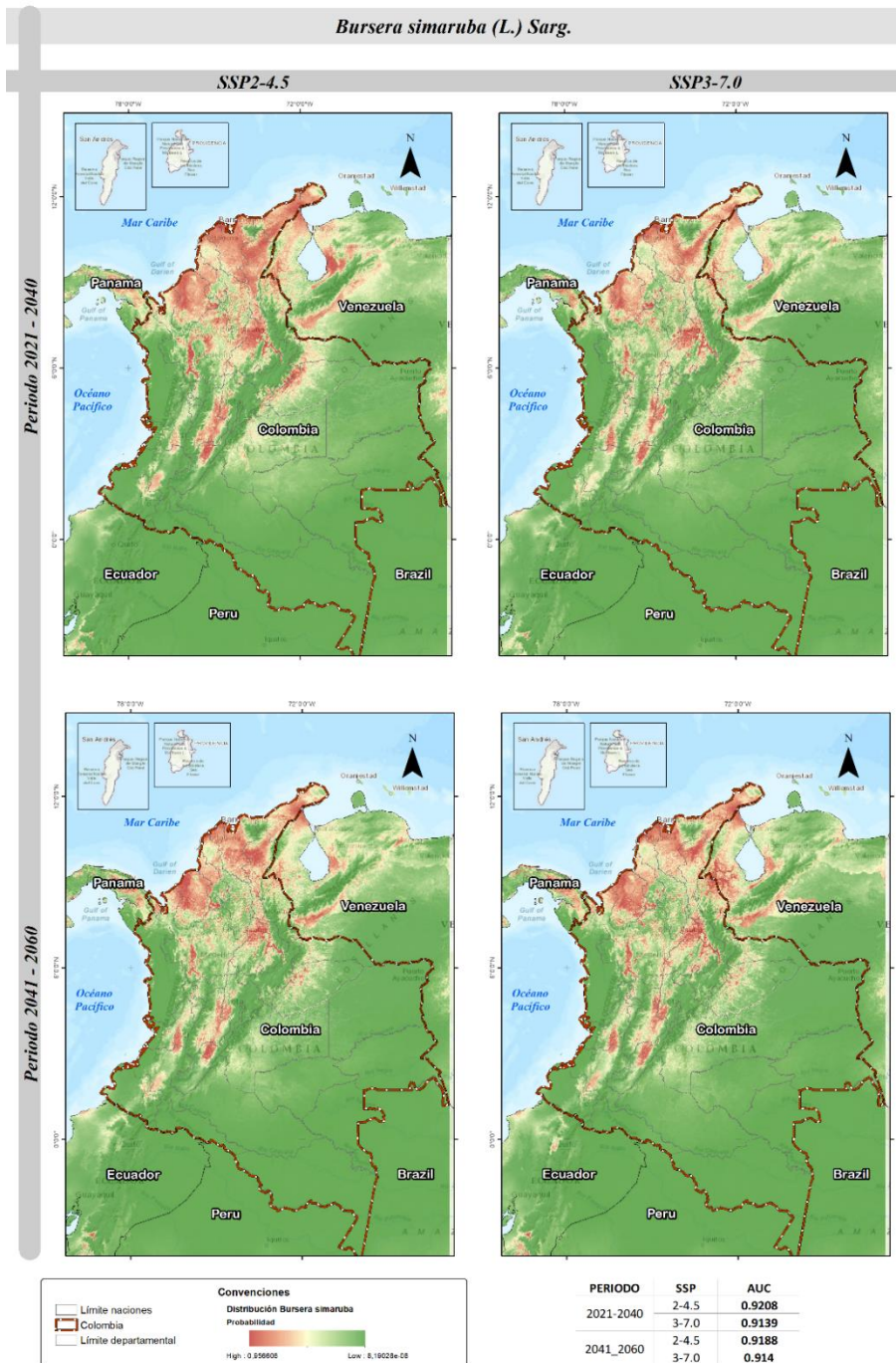
*Probabilidad en la distribución de la especie de flora *Hymenaea courbaril* L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060.*



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

*Probabilidad en la distribución de la especie de flora *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060.*



Fuente: Elaboración propia

Todos los modelos de distribución seleccionados para los escenarios climáticos futuros tienen un AUC excelente, superior a 0,9 (**Tabla 7**).

Tabla 7

Valores de AUC para la repetición seleccionada de las modelaciones realizadas

| ESPECIE | PERIODO | SSP | REPETICIÓN SELECCIONADA | AUC |
|---|-------------|-------|----------------------------|--------|
| <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. | 2021 - 2040 | 2-4.5 | Bursera_simaruba_2 | 0,9208 |
| | | 3-7.0 | Bursera_simaruba_9 | 0,9139 |
| | 2041 - 2060 | 2-4.5 | Bursera_simaruba_5 | 0,9188 |
| | | 3-7.0 | Bursera_simaruba_8 | 0,9140 |
| <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. | 2021 - 2040 | 2-4.5 | Enterolobium_cyclocarpum_5 | 0,9228 |
| | | 3-7.0 | Enterolobium_cyclocarpum_7 | 0,9245 |
| | 2041 - 2060 | 2-4.5 | Enterolobium_cyclocarpum_4 | 0,9225 |
| | | 3-7.0 | Enterolobium_cyclocarpum_9 | 0,9278 |
| <i>Hymenaea courbaril</i> L. | 2021 - 2040 | 2-4.5 | Hymenaea_courbaril_0 | 0,9257 |
| | | 3-7.0 | Hymenaea_courbaril_2 | 0,9123 |
| | 2041 - 2060 | 2-4.5 | Hymenaea_courbaril_4 | 0,9142 |
| | | 3-7.0 | Hymenaea_courbaril_5 | 0,9166 |

Fuente: Elaboración propia.

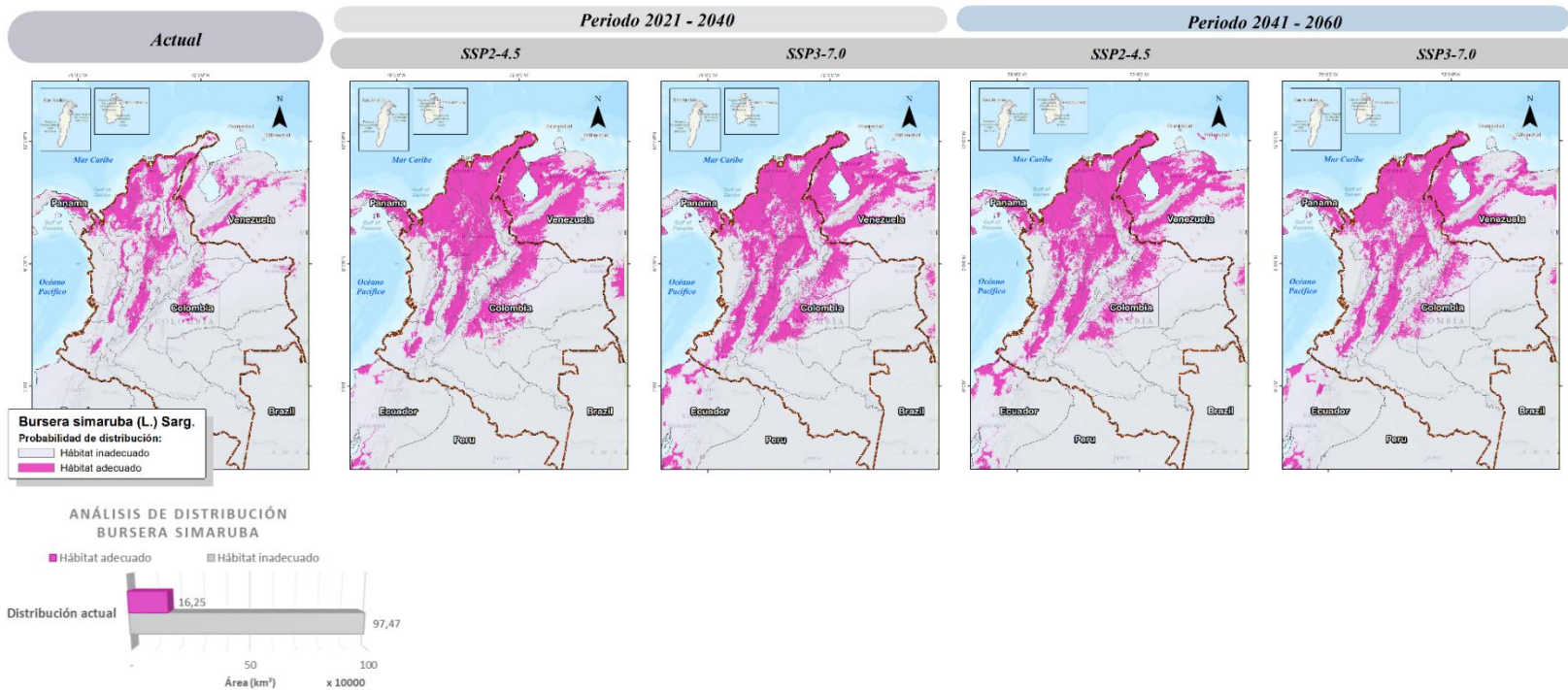
En línea con lo formulado por Moss et al. (2010) “el objetivo de trabajar con escenarios no es predecir el futuro, sino comprender mejor las incertidumbres para tomar decisiones que sean sólidas en una amplia gama de futuros posibles”, se presume que la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., bajo cualquiera de los escenarios proyecta incrementar el área de distribución con referencia a la actual (**Figura 24**), lo que indica que otras áreas (del 7 al 13% aproximadamente del territorio nacional) pueden reunir las condiciones ambientales para el desarrollo de la especie bajo los dos escenarios de cambio climático evaluados, entre ellas la Alta y Media Guajira, el oriente de Norte de Santander y el Meta, norte del Cauca, occidente antioqueño, y los departamentos de Cesar y Bolívar.

Así mismo, en el corto plazo 2021 – 2040 bajo el escenario SSP3-7.0, se generaría la mayor área con óptimas condiciones para la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., es decir, aproximadamente el 28% del área continental del país se configura como hábitat adecuado (**Tabla 8**); no obstante, en el periodo 2041 – 2060 el área decrece al 23% aproximadamente, perdiendo alrededor de 5% de área principalmente en los departamentos de Meta, Caquetá, Nariño, Cauca, Casanare y Bolívar.

Para el escenario SSP2-4.5 en el corto plazo 2021 – 2040, se incrementa el área potencial de distribución espacial de *Bursera simaruba* (L.) Sarg., a un 27% del país con referencia a la distribución actual (**Figura 24**), empero, en el mediano plazo 2041 – 2060 experimentará la reducción de su área en un punto porcentual relativo el periodo anterior (**Tabla 8**), lo cual, no representa un cambio drástico como si se evidenció para el escenario SSP3-7.0.

Figura 24

*Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Áreas potenciales de distribución espacial de las especies en estudio en condiciones bioclimáticas de futuro 2021 – 2040 y 2041 – 2060 en dos escenarios de cambio climático SPP2-4.5 y SSP3-7.0

| ESPECIE | PERIODO | ESCENARIO | ÁREAS POTENCIALES DE DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES | | | |
|--|-------------|-----------|---|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | | Hábitat inadecuado | | Hábitat adecuado | |
| | | | Área (km ²) | % de área del país | Área (km ²) | % de área del país |
| <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. | 2021 - 2040 | SSP2-4,5 | 826.895,86 | 72,71 | 310.363,22 | 27,29 |
| | | SSP3-7,0 | 815.003,50 | 71,66 | 322.254,60 | 28,34 |
| | 2041 - 2060 | SSP2-4,5 | 839.623,32 | 73,83 | 297.635,98 | 26,17 |
| | | SSP3-7,0 | 876.745,24 | 77,09 | 260.514,45 | 22,91 |
| <i>Hymenaea courbaril</i> L. | 2021 - 2040 | SSP2-4,5 | 793.087,78 | 69,74 | 344.166,21 | 30,26 |
| | | SSP3-7,0 | 825.276,64 | 72,57 | 311.967,43 | 27,43 |
| | 2041 - 2060 | SSP2-4,5 | 857.953,23 | 75,44 | 279.354,32 | 24,56 |
| | | SSP3-7,0 | 898.670,57 | 79,02 | 238.583,20 | 20,98 |
| <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb | 2021 - 2040 | SSP2-4,5 | 914.378,45 | 80,40 | 222.876,75 | 19,60 |
| | | SSP3-7,0 | 934.220,06 | 82,14 | 203.076,50 | 17,86 |
| | 2041 - 2060 | SSP2-4,5 | 942.241,27 | 82,85 | 195.007,92 | 17,15 |
| | | SSP3-7,0 | 885.635,95 | 77,88 | 251.612,57 | 22,12 |

Fuente: Elaboración propia.

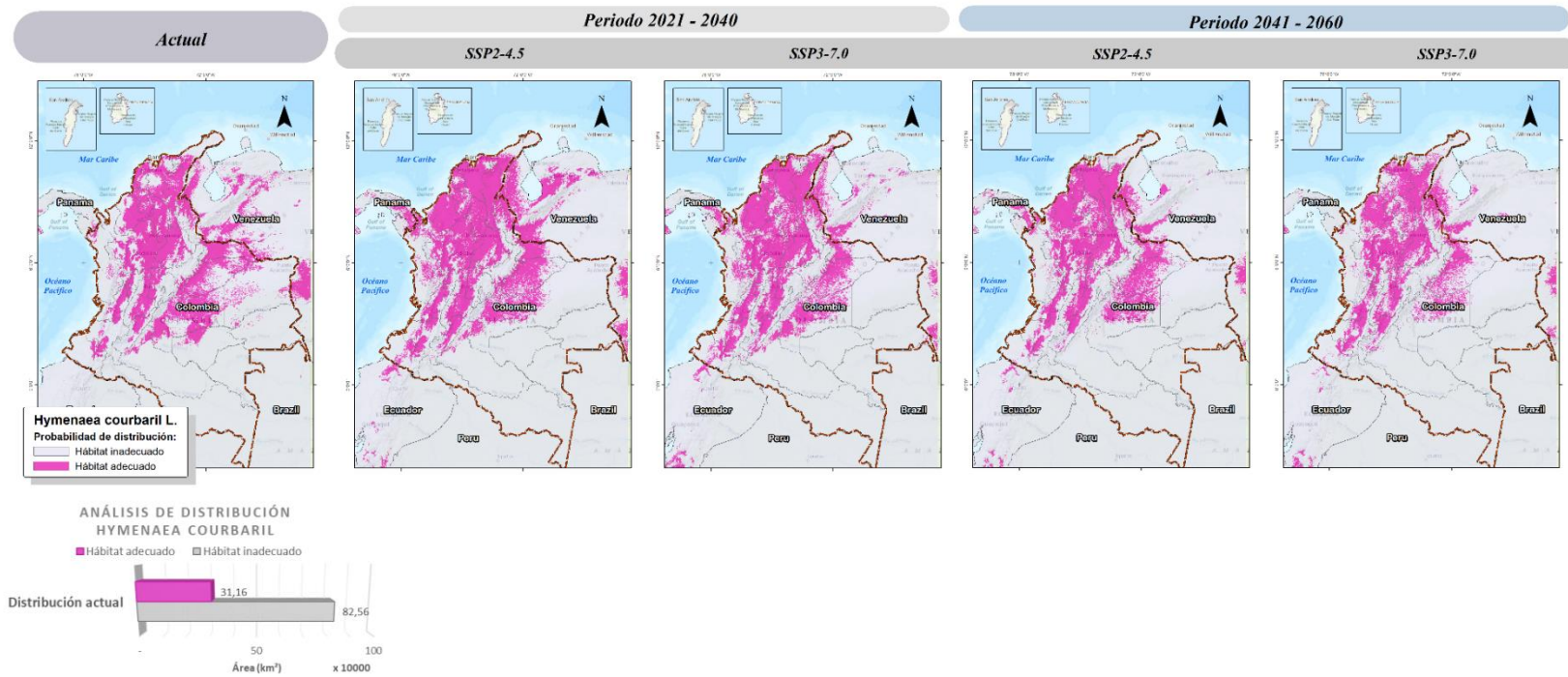
De acuerdo con los resultados obtenidos, el periodo de corto plazo 2021 – 2040 para cada escenario modelado presenta una distribución espacial de *Bursera simaruba* (L.) Sarg., con incremento de áreas en relación con el periodo actual, y reducción en el mediano plazo 2041 – 2060, siendo más abrupta dicha reducción en el escenario SSP3-7.0.

Para analizar la probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie *Hymenaea courbaril* L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 (

Figura 25), basándose en la distribución espacial de referencia actual en el territorio nacional correspondiente al 27%, la mayor de las tres especies analizadas, lo que denota ser una especie de distribución geográfica más amplia en zonas de bajas altitudes, de 0 a 700 metros sobre el nivel del mar.

Figura 25

Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie Hymenaea courbaril L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060



Fuente: Elaboración propia

En el periodo 2021 – 2040, para el escenario SSP2-4.5 se obtuvo un incremento de 3 puntos porcentuales en el área con relación a la distribución de referencia actual, mientras que para el SSP3-7.0 se mantuvo el área. Caso contrario, para los resultados del periodo 2041 – 2060 relativo al periodo anterior, en donde, para los dos escenarios las áreas de hábitat adecuado se redujeron entre el 6 y 7%, alcanzando para SSP2-4.5 el 25% aproximadamente del territorio continental, y de 21% aproximadamente para el SSP3-7.0; ambos valores de área de distribución muy por debajo de las proyecciones de la época actual, cuya diferencia se evidencia visualmente en la desaparición de áreas de distribución en los departamentos del Meta, Caquetá, Vichada, Guaviare, oriente de Arauca y Casanare, y sur de La Guajira (

Figura 25).

En consecuencia, la probabilidad de SDM de *Hymenaea courbaril* L., es influenciada de manera negativa en el mediano plazo (2041 – 2060) para cualquiera de los dos escenarios de cambio climático estudiados, siendo el que proyecta mayor área de distribución en el tiempo el escenario SSP2-4.5.

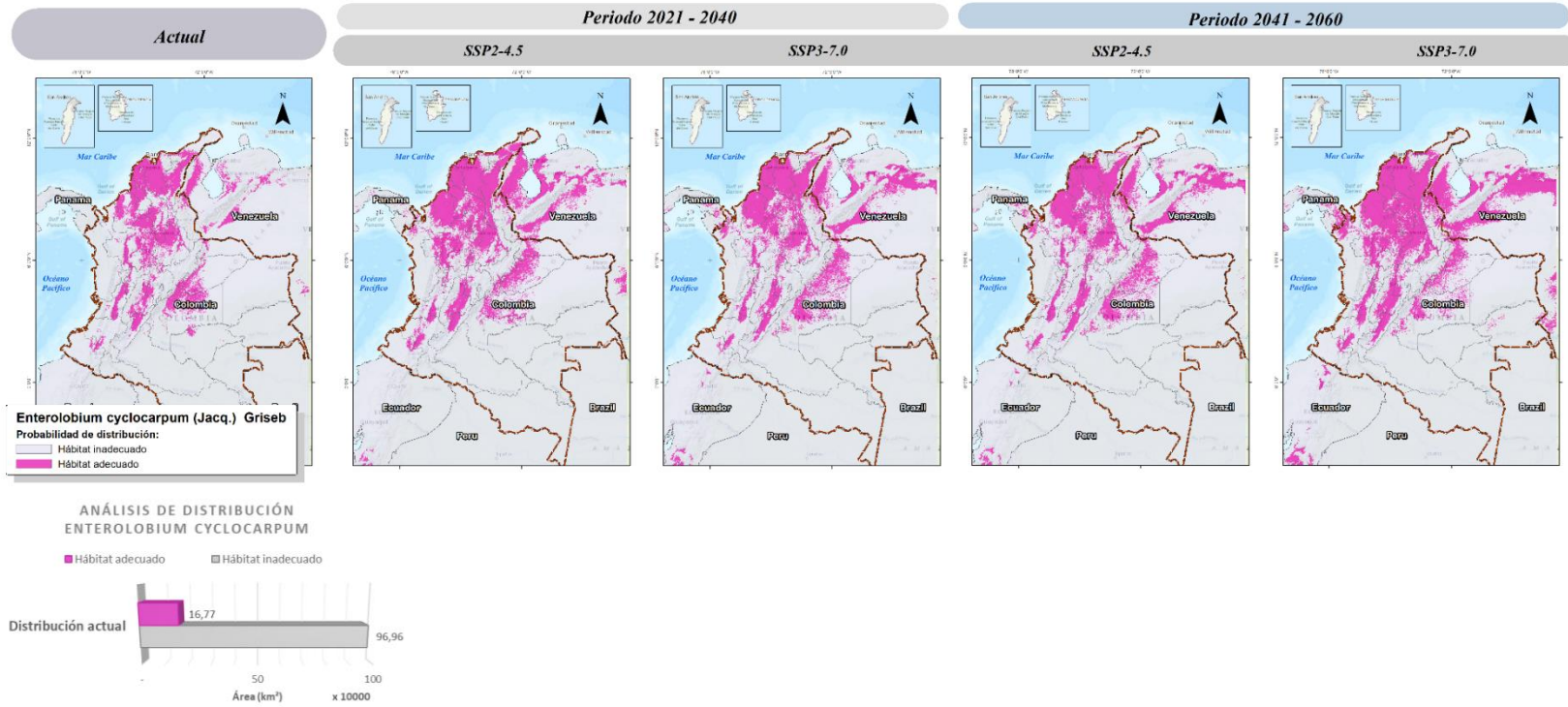
Finalmente, la probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 en Colombia, presentó un comportamiento distinto al de las dos especies analizadas anteriormente. En este caso, para el periodo 2021 – 2040 se obtuvo incremento en el porcentaje de área de distribución bajo los dos escenarios analizados con relación a la distribución de referencia actual; para el escenario SSP2-4.5 aumento aproximadamente 3% y para el escenario SSP3-7.0 aumento un punto porcentual (**Tabla 8**).

Es el periodo de mediano plazo el que marcó la diferencia en la dinámica de probabilidad de distribución de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. Para el escenario SSP2-4.5 retorna al valor de área inicial pero su distribución en el territorio varía (**Figura 26**), por ejemplo, se amplían las áreas de los valles interandinos, en los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Huila, Tolima, occidente de Antioquia; en la región Caribe especialmente en La Guajira y en el departamento de Córdoba; al norte de Chocó, al sur de Santander y se extiende hacia el oriente de Arauca y Casanare, prácticamente migrando el área que ocupaba en el departamento del Meta hacia estas latitudes.

Para el escenario SSP3-7.0 en el mediano plazo (2041 – 2060) la probabilidad de distribución de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., aumenta 4 puntos porcentuales con relación al periodo 2021 – 2040 cuyo porcentaje de área de distribución fue de 18% pasando a 22% (**Tabla 8**), dominando el territorio de la región Caribe, consolidándose en los departamentos de Córdoba, Sucre, Magdalena y Cesar, el norte del Chocó, y gran parte del territorio de Casanare y Arauca; abandonando las áreas de distribución de La Guajira, el Meta, el oriente antioqueño y Guaviare.

Figura 26

Probabilidad de distribución de hábitat adecuado para la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060



Fuente: Elaboración propia

8.4 Análisis de cambios en la probabilidad de distribución de las especies: pérdida, ganancia y persistencia de hábitats

El análisis de cambios en la probabilidad de distribución de las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060 se fundamentó en el análisis espacial y cálculo de áreas de pérdidas, ganancias y estabilidad de hábitat con relación a los resultados de la distribución en condiciones bioclimáticas de referencia actuales, así como, la determinación de las áreas de hábitat inadecuado o donde no existe presencia de las especies de acuerdo con los registros de ocurrencias obtenidos de la base de datos Gbif.

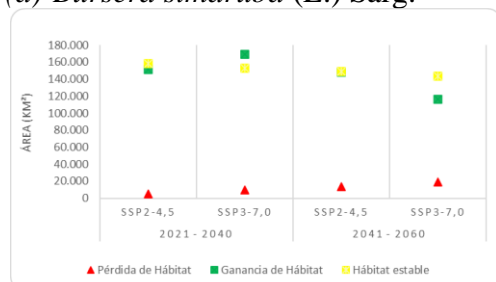
De manera general, la pérdida del hábitat es una tendencia creciente para las tres especies analizadas en los dos escenarios de cambio climático en el corto y mediano plazo, 2021 – 2040 y 2041 – 2060, respectivamente, excepto en el periodo 2041 – 2060, donde el cambio en la probabilidad de distribución de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., en el escenario SSP3-7.0 demostró que la pérdida de hábitat disminuye y se refleja un pico de ganancia de hábitat (**Figura 27c**).

A continuación, se presentan los resultados del análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución por especie.

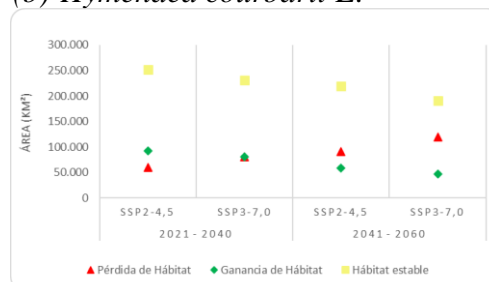
Figura 27

Registro de áreas de pérdida, ganancia y estabilidad del hábitat por especie analizada

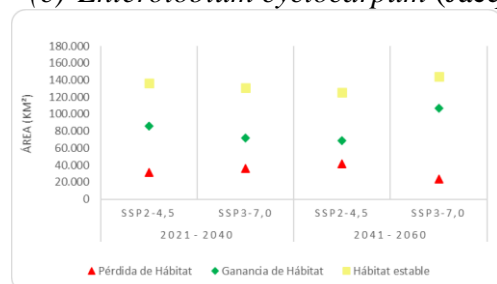
(a) *Bursera simaruba* (L.) Sarg.



(b) *Hymenaea courbaril* L.



(c) *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.



Fuente: Elaboración propia

8.4.1 *Bursera simaruba* (L.) Sarg.

Producto de este análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y persistencia de áreas de distribución de la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., se obtuvo que la pérdida de hábitat en el escenario SSP2-4.5 para el mediano plazo 2041 – 2060 triplica el área perdida en el corto plazo 2021 – 2040, representado en el 0,4% del territorio nacional; y que para el escenario SSP3-7.0 en 2041 – 2060 se duplica (1,7% del país) con relación a la pérdida de corto plazo (**Tabla 9**), por lo tanto, las condiciones bioclimáticas proyectadas bajo el escenario SSP2-4.5 son las desfavorables para esta especie.

Tabla 9

*Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*

| ESPECIE | | <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. | | | |
|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------|-------------|------------|
| PERIODO | | 2021 - 2040 | | 2041 - 2060 | |
| ESCENARIO | | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 |
| Pérdida de Hábitat | Área (km ²) | 4.815,41 | 9.883,77 | 13.711,28 | 19.103,41 |
| | % de área del país | 0,42 | 0,87 | 1,21 | 1,68 |
| Ganancia de Hábitat | Área (km ²) | 151.601,35 | 168.790,53 | 148.249,35 | 116.502,73 |
| | % de área del país | 13,33 | 14,84 | 13,04 | 10,24 |
| Hábitat estable | Área (km ²) | 158.208,90 | 153.046,77 | 149.043,56 | 143.710,44 |
| | % de área del país | 13,91 | 13,46 | 13,11 | 12,64 |
| Hábitat inadecuado | Área (km ²) | 822.624,90 | 805.528,76 | 826.246,59 | 857.934,83 |
| | % de área del país | 72,33 | 70,83 | 72,65 | 75,44 |

Fuente: Elaboración propia

Espacialmente las pérdidas de hábitat más evidentes en el escenario SSP2-4.5 para el mediano plazo 2041 – 2060 corresponden a los territorios de los departamentos de Vichada, Meta, Casanare y Bolívar. Bajo este mismo escenario, para el periodo 2041 – 2060 las pérdidas de hábitat se localizan en los departamentos del Vichada, Meta, Casanare, Bolívar, Sucre, Antioquia y de manera dispersa Santander (**Figura 28**).

En cuanto a la ganancia de hábitat, el escenario SSP2-4.5 modelado en los dos periodos mantiene un porcentaje de área nacional similar con valores de 13,3% para 2021 – 2040 y de 13,0% para 2041 – 2060. Para el escenario SSP3-7.0 el periodo con las condiciones más favorables corresponde al 2021 – 2040 donde se obtuvo un área aproximada de ganancia de hábitat del 15% del país, no obstante, en el siguiente periodo de 2041 – 2060 la ganancia obtenida fue solo del 10% aproximadamente (**Tabla 9**).

Para todos los casos de escenarios vs. periodos las ganancias de hábitat son muy superiores a las pérdidas; y similares a las áreas de hábitat estable; su distribución geográfica corresponde a la ampliación de las áreas cercanas a la distribución actual, en consecuencia, las ganancias se localizan en toda la región Caribe, en la Alta Guajira, la Sierra Nevada de Santa Marta, los departamentos de Cesar, Bolívar, Magdalena, Córdoba, Sucre, nororiente Antioqueño; parte de la región de la Orinoquia, al occidente de los departamentos de Arauca, Casanare y Meta; los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Norte de Santander y Santander (**Figura 28**).

El área de hábitat estable se mantiene en los dos escenarios evaluados para los dos periodos 2021 – 2040 y 2041 – 2060 (**Tabla 9**). La distribución espacial de las áreas de hábitat estable predominan en la región Caribe, especialmente en los departamentos de Magdalena, Córdoba, Atlántico y la sección de Santander que hace parte de esta región; seguido de la región Andina donde predominan los departamentos de Tolima, Huila, Cauca, Valle del Cauca y Antioquia; y finalmente, las áreas del occidente del Meta, Casanare y Arauca para la participación de la región Orinoquia en la distribución de la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg. (**Figura 28**).

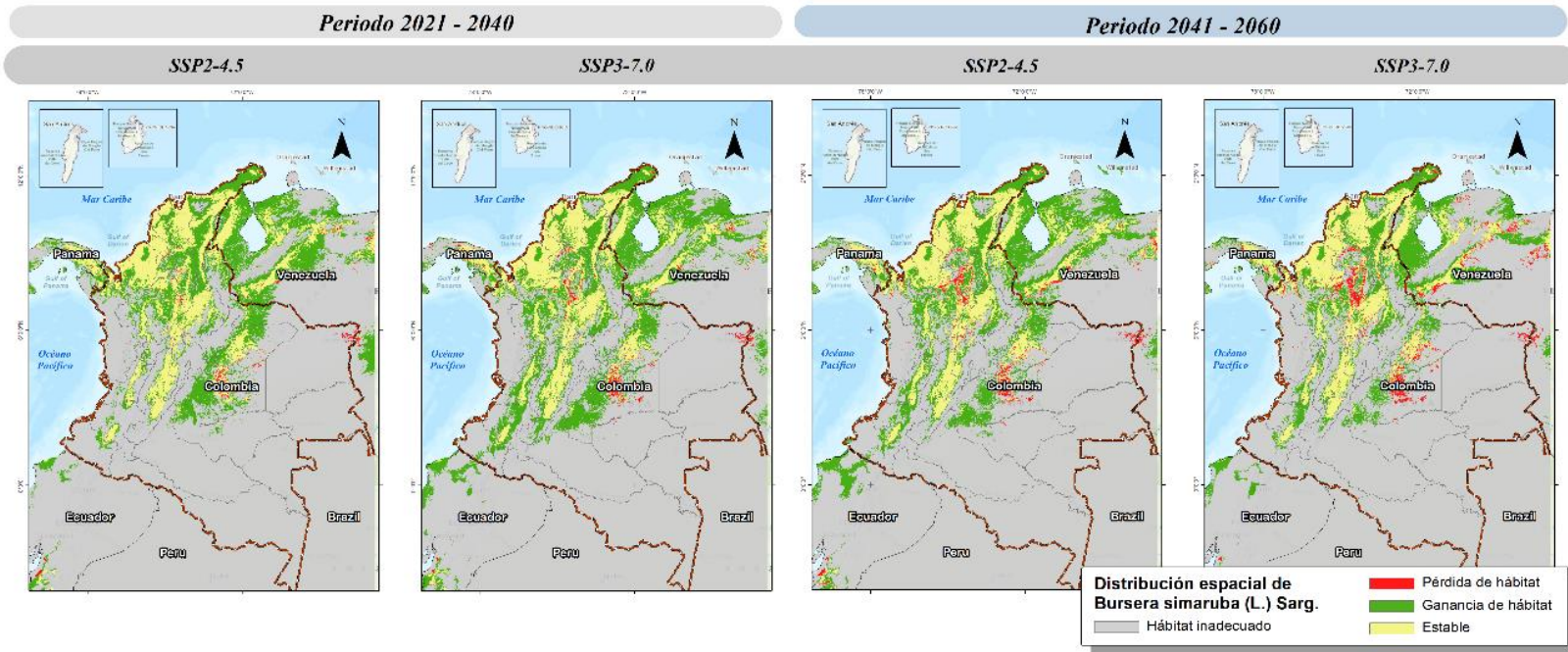
Lo anterior, permite identificar que bajo los escenarios y periodos analizados para la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., solo una pequeña porción del país, 14% ofrece actualmente las condiciones bioclimáticas para su distribución (**Figura 29**), y que conforme a dicha distribución la proyección del escenario más favorable en el corto plazo es el SSP3-7.0 y para el periodo 2041 – 2060 el que promueve mejores condiciones para la especie es el escenario SSP2-4.5 (**Tabla 9**), en los que se proyectan las más altas

ganancias de área para distribución de la especie y las pérdidas menos significativas relativas a la distribución actual.

Finalmente, las proyecciones de distribución de hábitats inadecuados para la especie permite corroborar que se reducen conforme a la distribución de referencia actual, por ende, los escenarios de cambio climático evaluados en este estudio únicamente considerando variables bioclimáticas aumentan las áreas donde probablemente la especie puede desarrollarse en el país, no obstante, existen otras variables del suelo, topografía, actividades antrópicas, dinámicas bióticas, etc., que se requieren estudiar para reducir la incertidumbre.

Figura 28

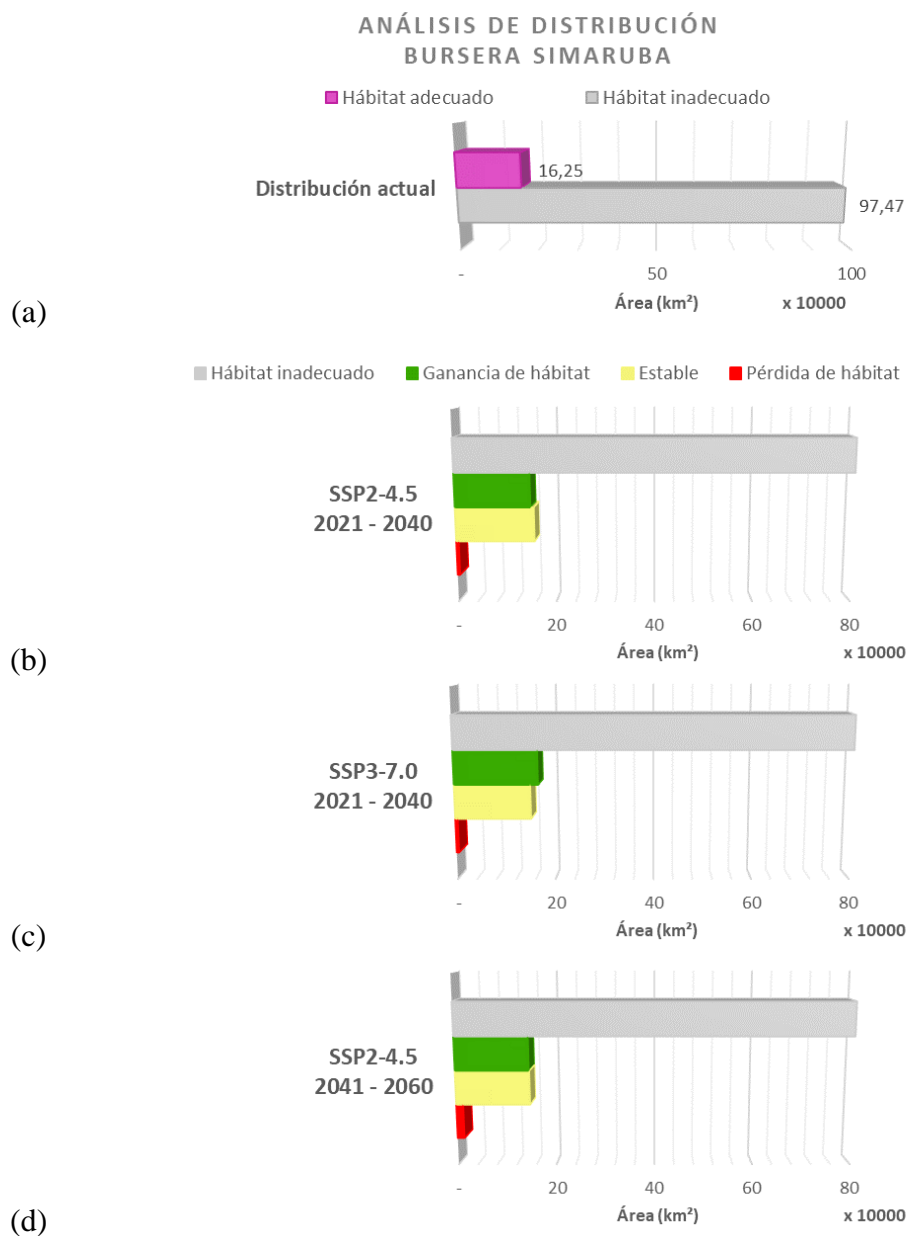
*Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*

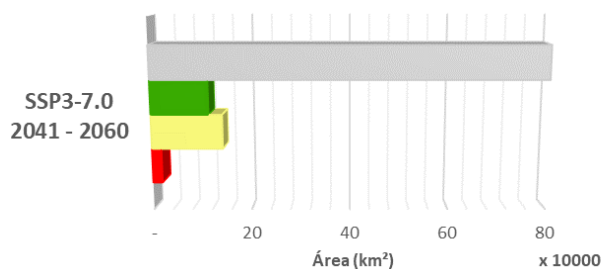


Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Bursera simaruba* (L.) Sarg., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060





(e)

Fuente: Elaboración propia

Nota: Área en kilómetros cuadrados de: (a) distribución de hábitat adecuado e inadecuado en condiciones bioclimáticas de referencia actual. (b) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2021 – 2040. (c) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2021 – 2040. (d) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2041 – 2060. (e) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2041- 2060.

8.4.2 *Hymenaea courbaril* L.

Para la especie *Hymenaea courbaril* L. las modelaciones resultantes indican que en el escenario SSP2-4.5 se generan áreas de pérdida de hábitat cercanas, en el corto plazo 2021 – 2040 se pierden 5% del área del país y en el mediano plazo 2041 – 2060 la pérdida es del 8% del territorio nacional. En el caso del escenario SSP3-7.0 la diferencia entre los dos periodos es de 4 puntos porcentuales, siendo superior el porcentaje de pérdida en el 2041 – 2060 (**Tabla 10**).

Tabla 10

*Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*

| ESPECIE | | <i>Hymenaea courbaril</i> L. | | | |
|----------------------------|-------------------------|------------------------------|------------|-------------|------------|
| PERIODO | | 2021 - 2040 | | 2041 - 2060 | |
| ESCENARIO | | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 |
| Pérdida de Hábitat | Área (km ²) | 60.002,39 | 80.434,53 | 91.554,34 | 120.060,35 |
| | % de área del país | 5,28 | 7,07 | 8,05 | 10,56 |
| Ganancia de Hábitat | Área (km ²) | 91.956,49 | 80.437,10 | 59.391,73 | 47.579,68 |
| | % de área del país | 8,09 | 7,07 | 5,22 | 4,18 |
| Hábitat estable | Área (km ²) | 251.783,50 | 231.229,47 | 219.885,47 | 191.264,50 |
| | % de área del país | 22,14 | 20,33 | 19,33 | 16,82 |
| Hábitat inadecuado | Área (km ²) | 733.504,55 | 745.135,60 | 766.414,58 | 778.342,10 |
| | % de área del país | 64,50 | 65,52 | 67,39 | 68,44 |

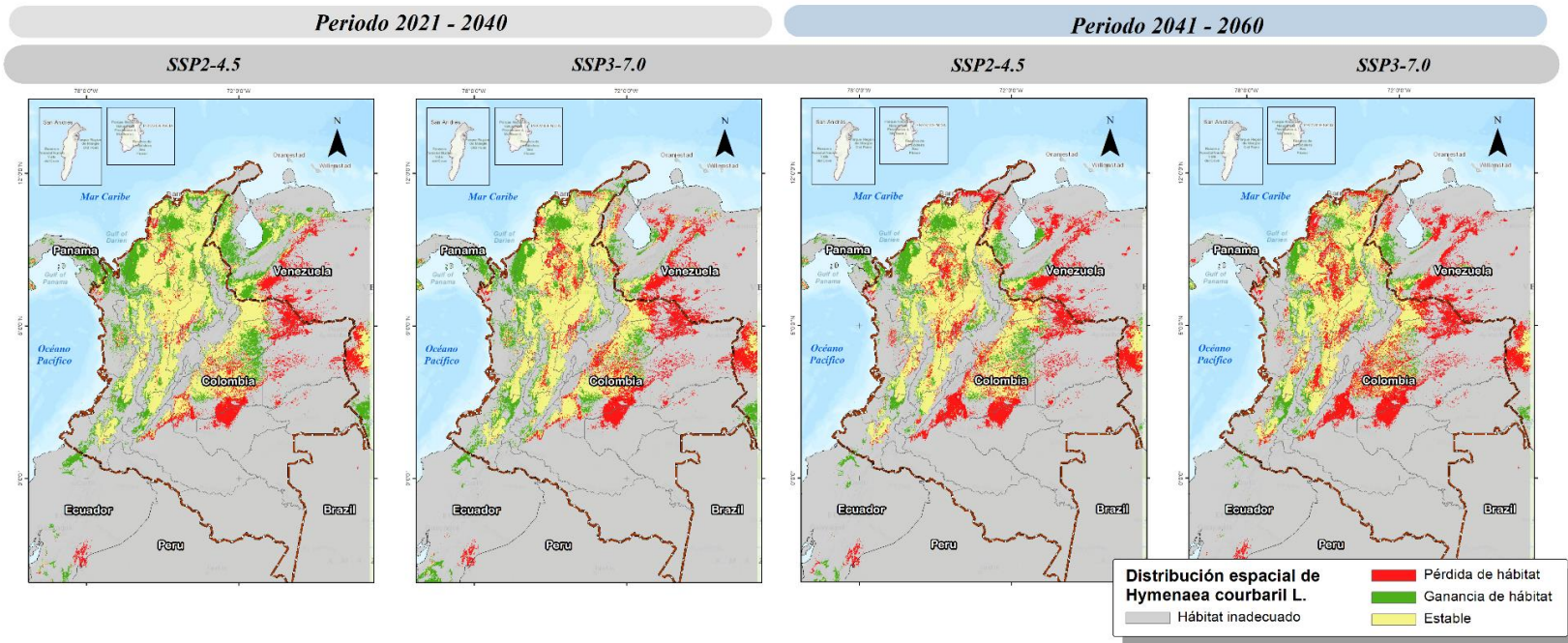
Fuente: Elaboración propia

Espacialmente, la pérdida de área de distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L., en el escenario SSP2-4.5 en el corto plazo se genera principalmente en la región de la Orinoquia, en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada, Meta, Guaviare y Caquetá. En el mediano plazo, adicional a los departamentos precitados se evidencia pérdida de hábitat en la región Caribe y los valles interandinos. En la región Caribe, se obtuvo pérdida de hábitat al sur de La Guajira, Atlántico, Bolívar, Sucre y el norte de Antioquia. En los valles interandinos en los departamentos de Santander, Boyacá, Tolima Valle del Cauca, Chocó y sur de Antioquia (**Figura 30**).

De las especies analizadas en el estudio es la que presenta mayores tasas de pérdida en los dos escenarios y en los dos periodos, sin embargo, es importante destacar que también es la especie que presentó una mayor área de distribución en condiciones bioclimáticas de referencia actual.

Figura 30

*Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*



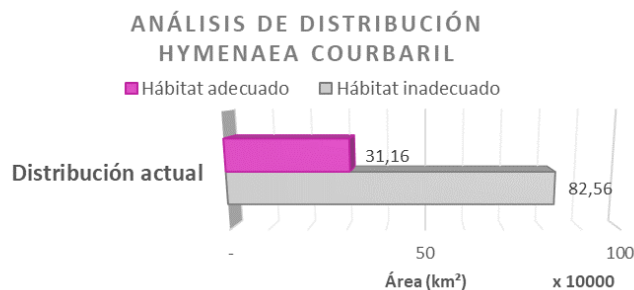
Fuente: Elaboración propia

En relación con a la ganancia de hábitat, el comportamiento es decreciente en los dos periodos, para el escenario SSP2-4.5 pasa de 8% en el corto plazo a 5% en el mediano plazo, y para el escenario SSP3-7.0 pasa de 7% en 2021 – 2040 a 4% en 2041 - 2060 (**Tabla 10**). La ganancia de hábitat de la especie *Hymenaea courbaril* L. geográficamente es coincidente en ambos escenarios y periodos, por lo que las áreas ganadas se localizan principalmente en los departamentos de Antioquia, Córdoba, Magdalena, Cauca y Casanare (**Figura 30**).

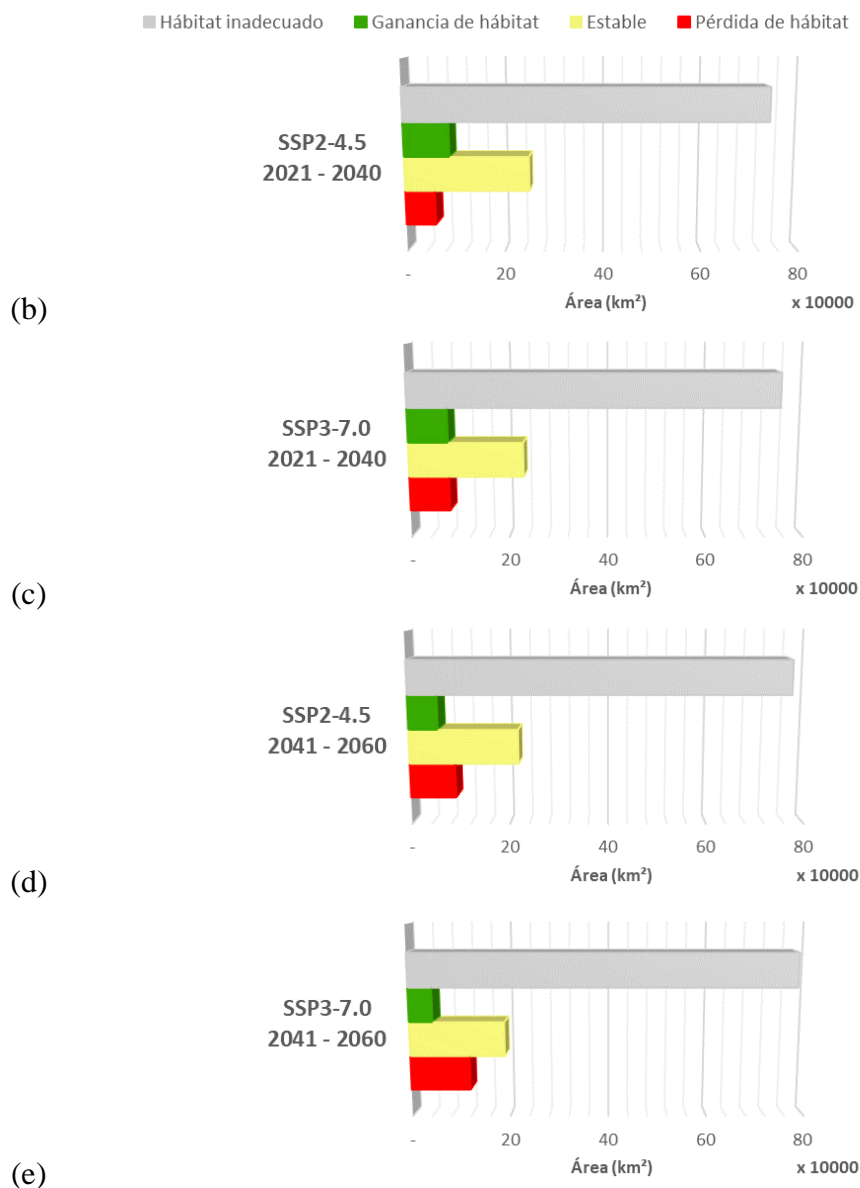
Las áreas de hábitats estables decrecen en el tiempo en cada escenario, sin embargo, el escenario SSP3-7.0 reportó el porcentaje de área más bajo, alrededor del 17% del país para el periodo 2041 – 2060. Las áreas de hábitat estable predominan en los valles interandinos y en la región Caribe (**Figura 30**). En el periodo 2041 – 2060 se obtuvieron los resultados más bajos en ganancia de hábitat y en hábitat estable (**Figura 31**), lo cual denota en el periodo condiciones desfavorables para la distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L.

Figura 31

Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Hymenaea courbaril* L., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060



(a)



Fuente: Elaboración propia

Nota: Área en kilómetros cuadrados de: (a) distribución de hábitat adecuado e inadecuado en condiciones bioclimáticas de referencia actual. (b) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2021 – 2040. (c) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2021 – 2040. (d) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2041 – 2060. (e) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2041- 2060.

8.4.3 *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.

Los resultados de las proyecciones de pérdida de hábitat para la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., indican que en el escenario SSP2-4.5 la pérdida de hábitat incrementa en el tiempo, mientras que ocurre lo contrario para el escenario SSP3-7.0, del periodo 2021 – 2040 la pérdida del 3% del territorio colombiano pasa a 2% en 2041 – 2060 (**Tabla 11**). Geográficamente las áreas de pérdida en el escenario SSP2-4.5 se focalizan en los departamentos de Meta, Guaviare, Casanare, Valle del Cauca, Antioquia y Bolívar (**Figura 32**). En los escenarios SSP3-7.0 las pérdidas de hábitat predominan en los departamentos del Meta, Guaviare, Casanare, Antioquia y La Guajira.

Tabla 11

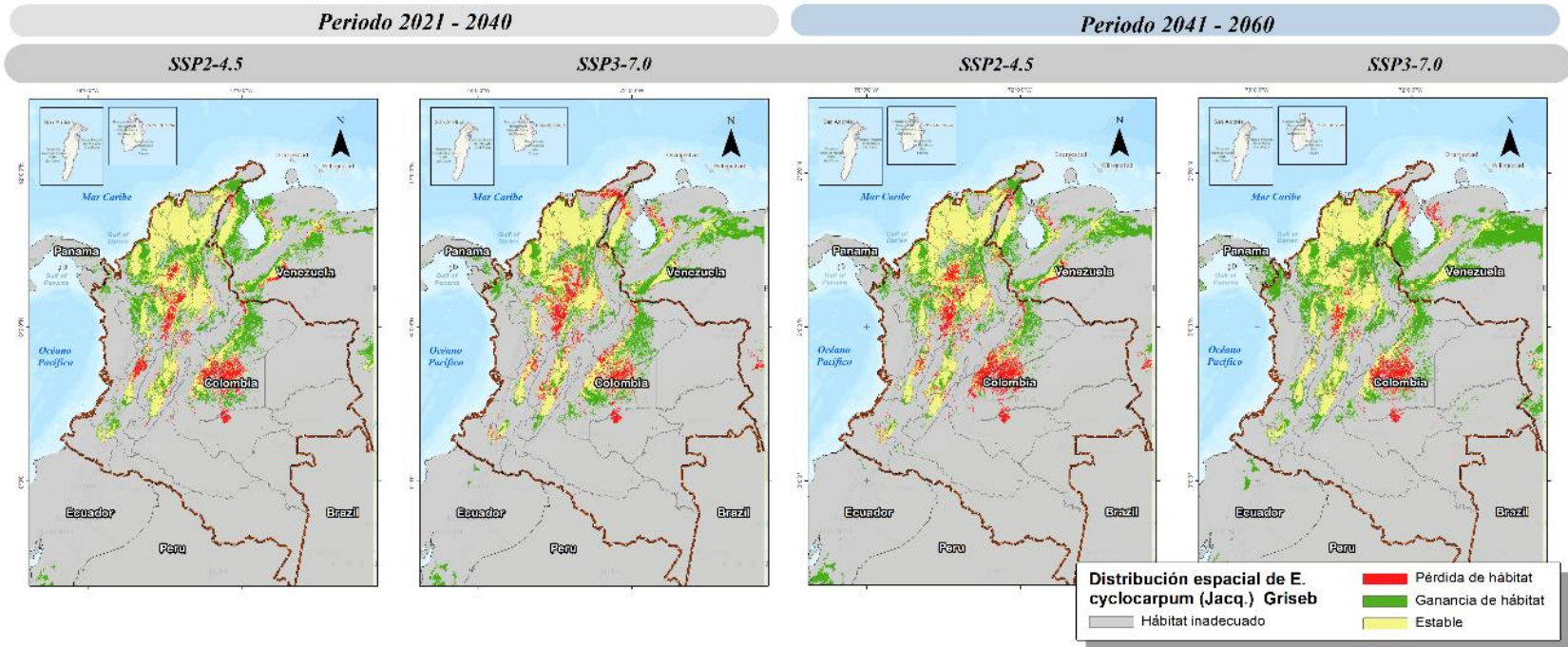
*Áreas de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de distribución de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*

| ESPECIE | | <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. | | | |
|----------------------------|-------------------------|---|------------|-------------|------------|
| PERIODO | | 2021 - 2040 | | 2041 - 2060 | |
| ESCENARIO | | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 | SSP2-4,5 | SSP3-7,0 |
| Pérdida de Hábitat | Área (km ²) | 31.302,55 | 36.381,30 | 41.789,72 | 23.397,85 |
| | % de área del país | 2,75 | 3,20 | 3,67 | 2,06 |
| Ganancia de Hábitat | Área (km ²) | 86.076,46 | 71.831,39 | 69.017,61 | 106.800,67 |
| | % de área del país | 7,57 | 6,32 | 6,07 | 9,39 |
| Hábitat estable | Área (km ²) | 136.586,28 | 131.266,19 | 125.909,37 | 144.500,13 |
| | % de área del país | 12,01 | 11,54 | 11,07 | 12,71 |
| Hábitat inadecuado | Área (km ²) | 883.283,68 | 897.762,85 | 900.528,00 | 862.542,79 |
| | % de área del país | 77,67 | 78,94 | 79,19 | 75,85 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 32

*Análisis espacial de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060*



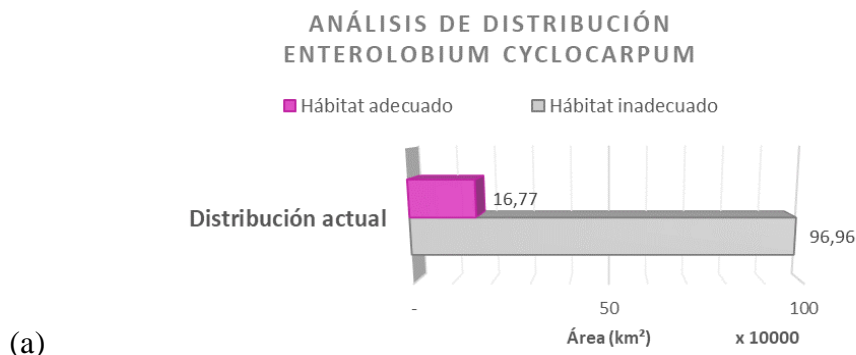
Fuente: Elaboración propia

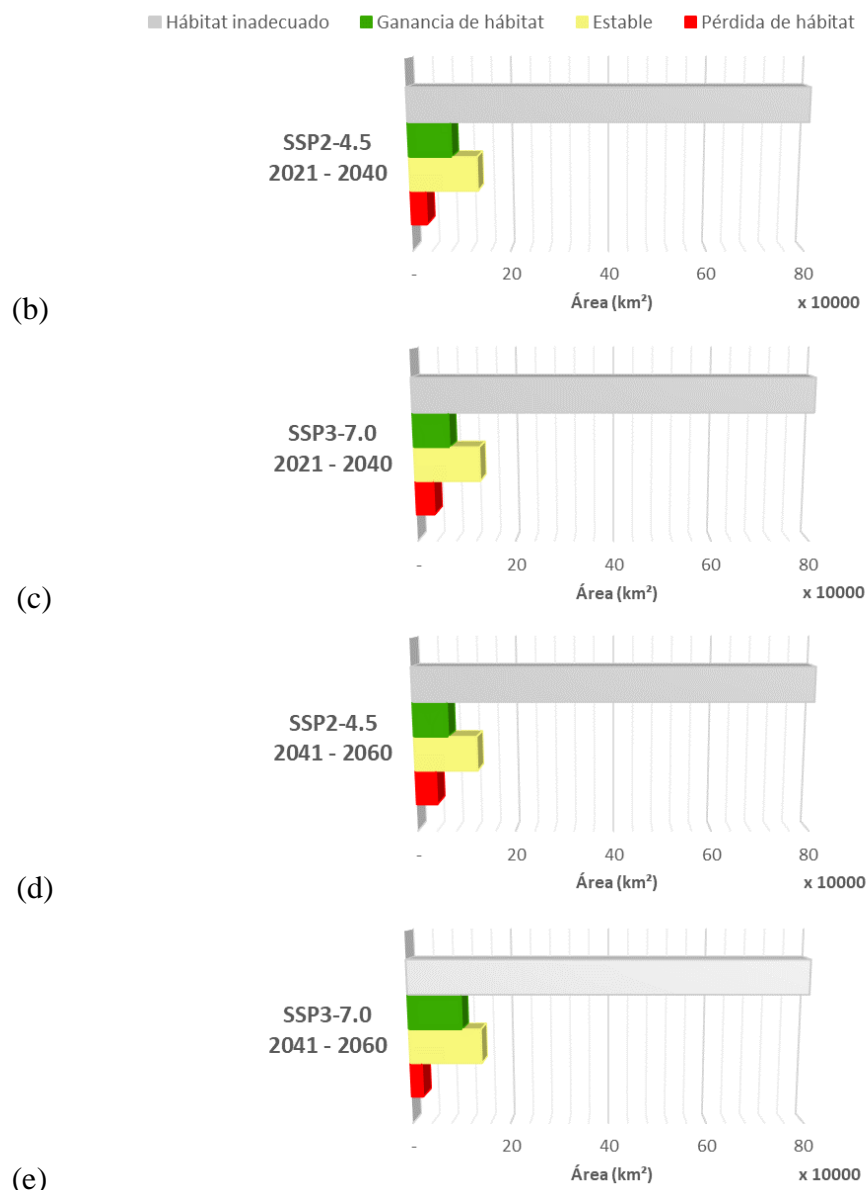
En los resultados de ganancia de hábitat, el comportamiento es decreciente para los dos periodos del escenario SSP2-4.5, donde el área pasa de 8% del país en el corto plazo a 6% en el mediano plazo, y de manera contraria, aumenta para el escenario SSP3-7.0 pasa de 6% en 2021 – 2040 a 9% en 2041 - 2060 (**Figura 33**). La ganancia de hábitat de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., geográficamente es coincidente en ambos escenarios y periodos, por lo que las áreas ganadas se localizan principalmente en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Cesar, Arauca y Casanare (**Figura 32**).

El comportamiento de las áreas de hábitat estable en el escenario SSP2-4.5 decrece en un punto porcentual entre el corto y el mediano plazo. Por el contrario, en el escenario SSP3-7.0 aumenta alrededor de un punto porcentual (**Figura 33**). De otra parte, las áreas que se catalogan como hábitat inadecuado aumentan en el escenario SSP2-4.5 y disminuyen en el escenario SSP3-7.0 (**Tabla 11** **Figura 33**).

Figura 33

Gráficos de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, en los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los periodos de 2021 – 2040 y 2041- 2060





Fuente: Elaboración propia

Nota: Área en kilómetros cuadrados de: (a) distribución de hábitat adecuado e inadecuado en condiciones bioclimáticas de referencia actual. (b) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2021 – 2040. (c) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2021 – 2040. (d) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP2-4.5 para el periodo 2041 – 2060. (e) análisis de cambio de pérdida / ganancia de hábitat, y estabilidad de áreas de distribución de la especie en el escenario SSP3-7.0 para el periodo 2041- 2060.

9 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio corresponden a un momento estático donde se capturaron condiciones bioclimáticas, ocurrencias y se implementó un modelo de distribución de especies y hábitats óptimos para tres especies sin considerar los cambios eventuales que se puedan producir en estas variables y en otras que no fueron contempladas en el estudio, pero que influyen directamente en el registro de las especies en los territorios, como los son las barreras geográficas, las interacciones bióticas, las actividades antrópicas, las calidades de sitio específicas, etc.

Por lo tanto, las proyecciones de distribución resultantes están sujetas a altos niveles de incertidumbre, no obstante, sirven para entender los posibles comportamientos de las especies conforme a la influencia de las condiciones bioclimáticas del cambio climático, para la toma de decisiones soportadas en datos de futuro posible.

En el estudio, se identifica que las condiciones bioclimáticas simuladas para las especies de flora *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Hymenaea courbaril* L., y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., son determinantes en su distribución y, en consecuencia, las variaciones climáticas proyectadas bajo análisis prospectivos de futuro que exponen los escenarios de cambio climático suponen cambios en la ubicación geográfica de las áreas óptimas para el desarrollo, reproducción y supervivencia de las especies.

Bajo los escenarios de cambio climático estudiados, SSP2-4.5 y SSP3-7.0, en los periodos 2021 – 2040 y 2041 – 2060, la especie que mejor respuesta presentó fue *Bursera simaruba* (L.) Sarg., ya que reportó bajas pérdidas y altas ganancias de hábitat con relación a las otras especies analizadas, así mismo, su hábitat permanece estable y las ganancias de

hábitat redundan en mayores áreas de hábitat adecuados para su desarrollo. En general, los resultados sugieren efectos climáticos potencialmente significativos para el periodo 2041 – 2060 para ambos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0).

Una hipótesis del estudio correspondía a que las especies características del bosque seco tropical analizadas serían más susceptibles a los escenarios de cambio climático por los requerimientos fisiológicos específicos, dependencia de hábitat especializado, tolerancia a factores ambientales, reducción progresiva de su hábitat y capacidad limitada para colonizar nuevas áreas, sin embargo, se presume que la dinámica de las condiciones climáticas puede otorgar a estas especies condiciones favorables en otras áreas para su desarrollo.

Considerando que los escenarios sobre los cuales se desarrolló el estudio corresponden a condiciones desalentadoras, es decir, el escenario SSP2-4.5 corresponde a “Desigualdad marcada” donde se proyecta prevalecerá la desigualdad económica y la fragmentación social, sin esfuerzos significativos para mitigar el cambio climático y donde las emisiones de GEI continúan aumentando rápidamente; y el escenario SSP3-7.0 denominado “Desarrollo sostenible desigual”, en el que se proyecta el desarrollo económico con una orientación limitada hacia la sostenibilidad ambiental, y donde las emisiones de GEI aumentan significativamente antes de estabilizarse; la respuesta de las especies estudiadas procura la migración de estas hacía otras regiones, en ningún caso, se presenta la desaparición de áreas óptimas conforme a las variables contempladas.

Finalmente, se concluye que los datos de ocurrencias se deben tomar con cautela y validarlos conforme al conocimiento temático a abordar, en el estudio, fue necesario consultar fuentes de información que corroboraran la presencia de las especies en los

territorios de ocurrencia. De aquí se deriva la importancia de las colecciones científicas y el aseguramiento de alta calidad de los datos, en este caso el uso de datos curados en las bases de datos disponibles es una buena práctica para continuar realizando estudios que reduzcan la incertidumbre del dato, y, por ende, las modelaciones y/o resultados sean más acertados.

10 Recomendaciones

Producto de la elaboración de este estudio, y ante la imposibilidad de extrapolar el comportamiento de un grupo de especies a un ecosistema, se sugiere replicar el ejercicio con otras especies o asociaciones de especies con el objetivo de precisar la respuesta del bosque seco tropical a las proyecciones de cambio climático y/o tener aproximación de su dinámica contemplando las decisiones que el estado colombiano está tomando hoy en día sobre la forma abordar los efectos del cambio climático. Así mismo, replicar el ejercicio incorporando otras variables que permitan robustecer los resultados de modelación.

Es fundamental, dar la importancia que merecen las colecciones científicas y la calidad de los datos que se reportan en las bases de datos consultadas, esto solo se logra aportando alta calidad de información y curando los datos biológicos que se reportan a nivel nacional en el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia - SIB Colombia, ya que es el nodo oficial del país en la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF).

Ejercicios como el realizado en este estudio podrían servir como punto de partida para llevar a cabo investigaciones relacionadas con la ecología y la fisiología de las especies que presentan una mayor vulnerabilidad. También pueden ser utilizados para comparar las características biológicas de las especies que se benefician al encontrar un aumento en el área con condiciones ambientales adecuadas en contraste con aquellas especies que experimentan una respuesta negativa.

11 Referencias Bibliográficas

- Allen, Kara et al. (2017). “Will Seasonally Dry Tropical Forests Be Sensitive or Resistant to Future Changes in Rainfall Regimes?” *Environmental Research Letters* 12(2): 023001.
- Arias P. A., Ortega G., Villegas L. D., and Martínez J. A. “Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 100, pp. 75-96, Jul-Sep 2021. doi.org/10.17533/udea.redin.20210525
- Avella-M. A, García-G N, Fajardo-Gutiérrez F, González-Melo A. (2019). Patrones de sucesión secundaria en un bosque seco tropical interandino de Colombia: implicaciones para la restauración ecológica. *Caldasia* 41(1):12–27. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.65859.
- Blaser J, Sarre A, Poore D, Johnson S. (2011). Estado de la ordenación de los bosques tropicales. Serie técnica OIMT no 38. Yokohama, Japón: Organización Internacional de las Maderas Tropicales.
- Bocanegra-González KT, Guillemín ML. (2018). Guidelines for the restoration of the tropical timber tree *Anacardium excelsum*: first input from genetic data. *Tree Genet. Genomes* 14(4):59. doi: 10.1007/s11295-018-1271-z
- Bocanegra-González KT, Thomas E, Guillemín ML, de Carvalho D, Gutiérrez JP, Caicedo CA, Moscoso HLG, Becerra LA, González MA. (2018). Genetic diversity of *Ceiba pentandra* in Colombian seasonally dry tropical forest: Implications for

- conservation and management. *Biol Cons.* 227:29–37. doi:
10.1016/j.biocon.2018.08.021
- Borchert, R. (1994) Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, 75, 1437–1449
- Brouwer, R. (1963) Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. *Jaarboek van het Instituut voor Biologisch en Scheikundig onderzoek aan Landbouwgewassen*, 213, 31–39
- Buckman-Sewald, J., Whorton, C. R., and Root, K. V. (2014). Developing macrohabitat models for bats in parks using maxent and testing them with data collected by citizen scientists. *Int. J. Biodivers. Conserv.* 6, 171–183. doi:
10.5897/ijbc2013.0647
- Castellanos-Castro C, Newton A. (2015). Environmental heterogeneity influences successional trajectories in Colombian seasonally dry tropical forest. *Biotropica* 47(6):660–671. doi: 10.1111/btp.12245.
- Central Intelligence Agency (CIA). (2022). The World Factbook: South America: Colombia. Recuperado de <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/colombia/>
- Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelús, C. L., Gilman, A. C., & Longino, J. T. (2012). Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322(5899), 258-261.
- Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11), 2783-2792.

- Derroire G, Balvanera P, Castellanos-Castro C, Decocq G, Kennard D, Lebrija-Trejos E, Leiva J, Oden P, Powers J, Rico-Gray V, Tigabu M, Healy J. (2016). Resilience of tropical dry forests-a meta-analysis of changes in species diversity and composition during secondary succession. *Oikos*. 125 (10):1386–1397. doi: 10.1111/oik.03229
- Díaz, M., & Hinojosa, L. F. (2005). El género *Bursera* en Colombia: usos y aplicaciones. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Díaz J. M. (2006). *Bosque Seco Tropical Colombia*. Cali, Colombia: Banco de Occidente, I/M Editores.
- Dirzo R, Young HS, Mooney HA, Ceballos G, editores. (2011). *Seasonally dry tropical forests: Ecology and conservation*. Washintong DC: Island Press.
- Dorfman, D. D., Berbaum, K. S., and Metz, C. E. (1992). Receiver operating characteristic rating analysis: generalization to the population of readers and patients with the jackknife method. *Investig. Radiol.* 27, 723–731. doi: 10.1097/00004424-199209000-00015
- Dryflor, Banda-R K, Delgado-Salinas A, Dexter KG, Linares-Palomino R, Oliveira-Filho A, Prado D, Pullan M, Quintan C, Riina R, Rodríguez GM, Weintritt J, Acevedo-Rodríguez P, Adarve J, Álvarez E, Aranguren B. A, Arteaga JC, Aymard G, Castaño A, Ceballos-Mago N, Cogollo A, Cuadros H, Delgado F, Devia W, Dueñas H, Fajardo L, Fernández A, Fernández MA, Franklin J, Freid E, Galetti LA, Gonto R, González-M R, Graveson R, Helmer EH, Idárraga Á, López R, Marcano-Vega H, Martínez OG, Maturo HM, McDonald M, McLaren K, Melo O, Mijares F, Mogni V, Molina D, Moreno NP, Nassar JM, Neves DM, Oakley LJ, Oatham M, Olvera Luna AR, Pezzini FF, Reyes Dominguez OJ, Ríos ME, Rivera

- O, Rodríguez N, Rojas A, Särkinen T, Sánchez R, Smith M, Vargas C, Villanueva B, Pennington RT. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science* 353(6306): 1383–1387. doi: 10.1126/science. aaf5080
- Duke, J. A. (1983). *Handbook of Energy Crops*. Unpublished.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., & Hijmans, R. J. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Elith, J., Leathwick, J. (2009). Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40:1, 677-697. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159
- Engelbrecht, B.M.J. & Kursar, T.A. (2003) Comparative drought-resistance of seedlings of 28 species of co-occurring tropical woody plants. *Oecologia*, 136, 383–393
- Escoto, C. A., Sánchez, P. L., Gachuz, D.S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 32(3): 669-693. doi: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>.
- Etter, Andres, Clive McAlpine, y Hugh Possingham. (2008). “Historical Patterns y Drivers of Landscape Change in Colombia since 1500: A Regionalized Spatial Approach.” *Annals of the Association of American Geographers* 98(1): 2–23.
- Fick, S.E. and R.J. Hijmans. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.

- Galeano, G., & Bernal, R. (2006). *Árboles y palmas del bosque seco: Guía de campo*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- García, H., y González-M., R. (2019). 53 *Journal of Chemical Information y Modeling*. *Bosque Seco Colombia: Biodiversidad y Gestión*. Bogota: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Gaston, K. J. (2003). *The structure and dynamics of geographic ranges*. Oxford University Press.
- Gentry, A. H. (1993). *A field guide to the families and genera of woody plants of northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru)*. University of Chicago Press.
- Gentry, A. H. (1995). Diversity and floristic composition of neotropical dry forests. In S. H. Bullock, H. A. Mooney & E. Medina (Eds.), *Seasonally dry tropical forests* (pp. 146-194). Cambridge University Press.
- Gillespie TW, Grijalva A, Farris CN. (2000). Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant Ecol.* 147(1):37–47. doi: 10.1023/A:1009848525399.
- González-M., R., Alcázar, C., Avella, A. (2020). El bosque seco en Colombia: estado de conocimiento y desafíos para su gestión integral, págs.12-25. En: Moncada, D.M., Borda, A.C., Vieira-Muñoz, M.I., Alcázar, C., González-M., R. (Eds.). *Elevando la acción colectiva empresarial para la gestión integral del bosque seco tropical en Colombia*. Bogotá: Minambiente, ANDI, ANLA, Instituto Humboldt, TNC.
- González-M., R, et al. (2018). “Disentangling the Environmental Heterogeneity, Floristic Distinctiveness y Current Threats of Tropical Dry Forests in Colombia.” *Environmental Research Letters* 13(4): 045007.

- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009.
- Howell, K. L., Holt, R., Endrino, I. P., and Stewart, H. (2011). When the species is also a habitat: comparing the predictively modelled distributions of *Lophelia pertusa* and the reef habitat it forms. *Biol. Conserv.* 144, 2656–2665. doi: 10.1016/j.biocon.2011.07.025
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22(2), 415-427.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. (2017). Variabilidad climática en Colombia: El Niño y La Niña. Bogotá, Colombia: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Caracterización y tendencias climáticas en Colombia 1971-2005. Bogotá, Colombia: IDEAM.
- IPCC. (2021). Resumen para responsables de políticas. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.

- IPCC. (2022a). *Climate Change 2022: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022b). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kageyama PY, Gandara FB, Souza LD. (1998). Conseqüências genéticas da fragmentação sobre populações de espécies arbóreas. *IPEF* 12(32):65–70.
- Kattan GH, Sánchez CE, Vélez C, Ramírez L, Celis M. (2019). Beta diversity and knowledge gaps of Colombia's dry forests: implications for their conservation. *Caldasia* 41(1):1–11. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.76229
- Khanum, R., Mumtaz, A., and Kumar, S. (2013). Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. *Acta Oecol.* 49, 23–31. doi: 10.1016/j.actao.2013.02.007
- Kursar, T. A., Dexter, K. G., Lokvam, J., Pennington, R., Richardson, J., Weber, M. G., ... & Coley, P. D. (2009). The evolution of antiherbivore defenses and their contribution to species coexistence in the tropical tree genus *Inga*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(43), 18073-18078.
- León-Yáñez, S., Valencia, R., & Pitman, N. (2012). *Plantas leñosas de la región neotropical: Compendio de inventarios florísticos regionales (Vol. 7)*. Instituto de Historia Natural, Universidad Mayor de San Andrés.
- Li, J., Fan, G., and He, Y. (2020). Predicting the current and future distribution of three *Coptis* herbs in China under climate change conditions, using the MaxEnt model

- and chemical analysis. *Sci. Total Environ.* 698:134141. doi:
10.1016/j.scitotenv.2019.134141
- Li, Y., Li, M., Li, C., Liu, Z. (2020). Optimized Maxent Model Predictions of Climate Change Impacts on the Suitable Distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China. *Forest* 11, 302; doi:10.3390/f11030302
- Linares-Palomino R, Oliveira-Filho AT, Pennington RT. (2011). Neotropical seasonally dry forests: diversity, endemism and biogeography of woody plants. En: Dirzo R, Young HS, Mooney HA, Ceballos G, editores. *Seasonally dry tropical forests: Ecology and conservation*. Washintong DC: Island Press. p. 3–21.
- Liu, G., Yang, Z., Chen, B., Zhang, L., Zhang, Y., and Su, M. (2015). An ecological network perspective in improving reserve design and connectivity: a case study of Wuyishan nature reserve in China. *Ecol. Model.* 306, 185–194. doi:
10.1016/j.ecolmodel.2014.10.004
- Marcotullio, P. J., & Schulz, N. B. (2007). Comparison of energy transitions in the united states and developing and industrializing economies. *World Development*, 35 (10), 1650–1683.
- Mares, D. R. (2019). Geopolítica y estrategia: Colombia y América Latina. *Pensamiento Propio*, (50), 101-119.
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2016). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst.
Recuperado de: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

- Moreno, F. H., & Sánchez-Rodríguez, A. (2008). Árboles y arbustos nativos potenciales para la reforestación de áreas degradadas en bosques secos de Colombia. *Acta Agronómica*, 57(3), 185-193.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756.
- Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., et al. (2018). A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 1383–1413. <https://doi.org/10.1029/2017MS001217>
- Murphy, P. G., y A. E. Lugo. (1986). “Ecology of Tropical Dry Forest.” *Annual review of ecology systematics*. Vol. 17: 67–88.
- O’Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400.
- O’Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180

- Padalia, H., Srivastava, V., and Kushwaha, S. (2014). Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: comparison of MaxEnt and GARP. *Eco. Inform.* 22, 36–43. doi: 10.1016/j.ecoinf.2014.04.002
- Páez-Vacas, M., Flantua, S. G. A., Jaramillo, C., & Bermúdez, M. A. (2020). Ecosystem size predicts eco-evolutionary response to climate change in terrestrial plant communities. *Global Ecology and Biogeography*, 29(11), 1873-1886.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637-669.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Pizano C, García H, editores. (2014). *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Poorter, H. & Nagel, O. (2000) The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27, 595–607.
- Poorter, H. & Markesteijn, L. (2008) Seedling Traits Determine Drought Tolerance of Tropical Tree Species. *Biotropica*, 40, 321–331.
- Portillo-Quintero CA, Sánchez-Azofeifa GA. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biol. Conserv.* 143:144– 155. doi: 10.1016/j.biocon.2009.09.020.

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenoder, F., DaSilva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168.

Rodríguez M. GM, Banda-R. K, Reyes B. SP, Estupiñan González AC. (2012). Lista comentada de las plantas vasculares de bosques secos prioritarios para la conservación en los departamentos de Atlántico y Bolívar (Caribe Colombiano). *Biota Colombiana*. 13(2):7–39. doi: 10.21068/bc.v13i2.261.

Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A.I., Sánchez-Torres G., Vargas-Castilleja, R.C., Báez-Vásquez, J. & Conde-Álvarez, A.C (2022). Breve Guía para la Selección, Descarga y Aplicación de Escenarios de Cambio Climático para México. De acuerdo con los últimos escenarios del IPCC. UACH-UNAMBUAP-UAT-ISF-México, A.C. 98 p. <http://ciren.am.chapingo.mx/cambio-climatico/folletos/>

Ruiz J, Fandiño M, Chazdon R. (2005). Vegetation structure, composition and species richness across a 56-year chronosequence of dry tropical forest on Providence Island, Colombia. *Biotropica* 37(4):520-530. doi: 10.1111/j.1744-7429.2005.00070.x.

- Sánchez-Azofeifa GA, Calvo-Alvarado JC, do Espírito-Santo MM, Fernandes GW, Powers JS, Quesada M. (2013). Tropical Dry Forest in The Americas: The Tropical Dry Endeavor. En: Sánchez-Azofeifa GA, Powers JS, Fernandes GW, Quesada M, editores. Tropical Dry Forests in The Americas: Ecology, Conservation and Management. Boca Ratón, Florida, USA: CRC Press. p. 1–16.
- Servicio de Información sobre Biodiversidad Global – GBIF. (2023). Consultas de registros de ocurrencias por especie: *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.n9x4c5>; *Hymenaea courbaril* L. (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.bgez7b>; *Bursera simaruba* (L.) Sarg. (26 September 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.xuhgtf>
- Slot, M. & Poorter, L. (2007) Diversity of tropical tree seedling responses to drought. *Biotropica*, 39, 683–690.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115-1123.
- Standley, P. C., & Steyermark, J. A. (1946). Flora of Guatemala. *Fieldiana: Botany*, 24(2), 1-432.
- Stevens, W. D. (1974). Flora de Nicaragua. *Fieldiana: Botany*, 35(9), 987-1049.
- Thomas E, Gil Tobón C, Gutiérrez JP, Alcázar Caicedo C, Moscoso Higueta LG, Becerra LA, Loo J, González MA. (2017a). Genetic diversity of *Enterolobium cyclocarpum* in Colombian seasonally dry tropical forest: implications for conservation and restoration. *Biodivers. Conserv.* 26(4):825–842. doi: 10.1007/s10531-016-1274-8

- Torres-Rodríguez S, Díaz-Triana JE, Villota A, Gómez W, Avella-M. A. 2019. Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia* 41(1):42–59. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71275
- Trainer JM, Will TC. (1984). Avian methods of feeding on *Bursera simaruba* (Burseraceae) fruits in Panama. *Auk*. 101(1):193–195.
- Valencia, R., Foster, R. B., Villa, G., Condit, R., Svenning, J. C., & Hernández, C. (2004). Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: Large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92(2), 214–229.
- van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for climate change research: Scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3), 373–386.
- Verea C, Solórzano A. (2001). La comunidad de aves del sotobosque de un bosque deciduo tropical en Venezuela. *Ornitol. Neotrop.* 12:235–253.
- Wiley, E. O., Mcnyset, K. M., Peterson, A. T., Robins, C. R., and Stewart, A. M. (2003). Niche modeling perspective on geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. *Oceanography* 16, 120–127. doi: 10.5670/oceanog.2003.42
- WorldClim versión 2.1 (2023). Datos meteorológicos y climáticos para condiciones históricas y futuras. Recuperado de: <https://www.worldclim.org/data/index.html>
- Zalamea, P. C., González-Caro, S., Stevenson, P. R., & Swenson, N. G. (2006). Seed dispersal by bats in Neotropical forest: An overview. *Biotropica*, 38(5), 722–727.