

**CIENCIA
Y SABER
INDÍGENA**
POR LA AMAZONÍA

DINÁMICA DEL CARBONO AÉREO

almacenado en los
bosques de la Amazonía
biogeográfica al 2030

REPORTE 2025

Equipo técnico

Análisis e interpretación de datos

Sandy Terán, EcoCiencia
Alejandra Tancara, FAN
William Martínez, Gaia
Jose E. Víctorio, IBC
William P. Lima, ISA
Yurmerys Bolaño, Wataniba
Antonio Oviedo, ISA

Análisis de datos climáticos

William Martinez, Gaia

Redacción

Sandy Terán
William Martínez
Jose E. Víctorio
María A. Oliveira-Miranda

Coordinación técnica y modelaje

Jose E. Víctorio-Gonzales

Asesoría técnica y edición

María A. Oliveira-Miranda

Elaboración de figuras

William Martínez
William P. Lima
José E. Víctorio-Gonzales
María A. Oliveira-Miranda

Foto de Portada

Shutterstock



CONTENIDO

1	Introducción	05
2	Objetivos	09
3	Marco Metodológico 3.1. Área de interés: Amazonía biogeográfica 3.2. Datos de carbono 3.3. Relación entre coberturas de vegetación y carbono 3.4. Relación con variables climáticas	10
4	Dinámica del cambio de las coberturas vegetales en los años recientes, principales detonantes (drivers) intrínsecos y humanos en la Amazonía biogeográfica	25
5	Proyección en el corto plazo de la dinámica de cambio en las coberturas vegetales en la amazonía biogeográfica	30
6	Patrones de distribución de carbono aéreo en coberturas vegetales en la Amazonía biogeográfica 6.1. Patrones Generales 6.2. Carbono aéreo en las diferentes unidades de gestión territorial 6.3. Dinámica del carbono aéreo en bosques y la agudización de eventos climáticos (anomalías de temperatura) en la Amazonía biogeográfica.	34
7	Dinámica de cambio en el corto plazo de los stocks de carbono en la Amazonía biogeográfica, posibles efectos del cambio climático.	60
	Referencias consultadas	68

CIENCIA Y SABER INDÍGENA

POR LA AMAZONÍA



1.

Introducción

La Amazonía biogeográfica, que se extiende a lo largo de nueve países sudamericanos y cubre más de siete millones de kilómetros cuadrados, constituye uno de los conjuntos de ecosistemas más importantes del planeta en términos de su diversidad biológica y del papel que tiene en la regulación climática y el almacenamiento de carbono.

En ese sentido, se estima que su biomasa aérea de sus bosques representa aproximadamente un 50% de su peso en carbono (IPCC 2006). El carbono en bosques se refiere principalmente a aquel contenido en la biomasa viva de los ecosistemas boscosos (aérea y subsuelo) y, en segundo término, a la biomasa muerta (necromasa) y hojarasca. Su cuantificación se realiza principalmente a través de la estimación de la masa total de materia orgánica generada, especialmente por los árboles y otras especies vegetales del bosque, en un área determinada. Sin embargo, en muchos casos, especialmente cuando se emplean sensores remotos, las estimaciones se centran en la biomasa aérea (por encima del nivel del suelo).

La compleja estructura boscosa de la amazonia, le permite almacenar entre 123 ± 23 petagramos de carbono¹ en su biomasa aérea y subterránea, lo que equivale a más de una década de emisiones globales de CO₂ (Gatti y col. 2021). Esta enorme reserva se considera clave en la regulación natural del clima terrestre mediante la absorción y fijación de dióxido de carbono atmosférico. De manera, que la convierte en un indicador para evaluar el carbono almacenado (stocks de carbono) y monitorear los flujos netos de captura o liberación de gases de efecto invernadero.

¹ Equivalente a 123.000 ± 23.000 megatoneladas de carbono (MtC)

No obstante, esta capacidad de regulación climática se encuentra en riesgo desde hace unas décadas. La acelerada deforestación, la degradación de los bosques y los efectos acumulativos del cambio climático han reducido la capacidad de los ecosistemas amazónicos para absorber carbono, llegando incluso a convertirlos en fuentes netas de emisiones. Según Gatti y col. (2021), en regiones del sudeste amazónico las emisiones de carbono ya superan su capacidad de absorción, lo que evidencia que han comenzado a actuar como fuentes, en lugar de sumideros.

Estas pérdidas están directamente asociadas con la transformación y pérdida de coberturas vegetales naturales. Las dinámicas de cambio de uso del suelo — como la conversión de bosques a pastizales, cultivos o zonas urbanizadas— provocan una liberación inmediata de carbono. Además, amenazas menos detectables que se expresan como degradación de los bosques, como la tala selectiva, la presencia de fuegos de baja intensidad, la fragmentación, el cambio en los regímenes hidrológicos y los eventos climáticos extremos, erosionan silenciosamente la capacidad de los bosques para actuar como sumideros, incluso cuando la cobertura forestal parece mantenerse estable (Berenguer y col. 2021, Gampe y col. 2021, Silva y col. 2022, Lapola y col. 2023). Se estima que más del 40 % de las emisiones de carbono en los trópicos provienen de procesos de degradación (Walker y col. 2020, Silva Junior y col. 2023). En este sentido, Walker y col. (2020) confirman que los paisajes amazónicos, incluidos muchos territorios indígenas y áreas naturales protegidas, enfrentan presiones crecientes derivadas de actividades como la extracción maderera, minera, petrolera y la expansión de infraestructura, las cuales no necesariamente implican deforestación total, pero sí provocan una significativa pérdida de biomasa y emisiones asociadas. Estas formas de degradación, ampliamente subestimadas, afectan al menos al 53 % de la región amazónica y comprometen cerca del 46 % del carbono superficial almacenado, destacando el rol crítico de la degradación como fuente de emisiones en los trópicos.



Foto: Daniel Chamba / Fundación EcoCiencia

Entre 2001 y 2021, de acuerdo con Global Forest Watch (2023)

+60%

de la Amazonía presentó pérdidas netas de carbono, especialmente en el "arco de deforestación" del sur y sureste amazónico.

El cambio climático actúa como un amplificador de estas pérdidas. Eventos extremos como sequías prolongadas, olas de calor y fenómenos como El Niño afectan la fotosíntesis, aumentan la mortalidad de

árboles y limitan la capacidad de recuperación de los bosques. Experimentos como Esecafloer en Brasil han demostrado que una reducción artificial del 50% en la precipitación durante 24 años puede causar pérdidas de hasta el 40% en la biomasa vegetal, con la transformación temporal del bosque en una fuente neta de carbono (Brando y col. 2023). A nivel regional, las sequías de 2005, 2010 y 2015 —consideradas las más severas de este siglo en la cuenca amazónica— provocaron disminuciones significativas en la productividad primaria neta (NPP) en varias zonas de la región, con el norte y suroeste de la Amazonía especialmente afectados. Estas condiciones debilitaron la capacidad de recuperación de los bosques, retrasando entre uno y tres años su retorno a los niveles de crecimiento previos (Gampe y col. 2021).

Frente a este panorama, el uso de tecnologías de teledetección y modelación atmosférica se vuelve fundamental para monitorear y comprender los flujos de carbono. Herramientas como las ofrecidas por Global Forest Watch² permiten estimaciones de ganancias y pérdidas de carbono a 30 metros de resolución, mientras que modelos como INVICAT 4D-Var, apoyados en perfiles verticales de CO₂, permiten validar los balances regionales con alta precisión (Gatti y col. 2023). Estas metodologías han permitido detectar las emisiones netas en algunas regiones del sureste de la Amazonía (Lapola y col. 2023), las cuales representan un reto para el mantenimiento del sistema y del clima regional.

Un componente esencial de esta dinámica es el manejo del territorio. Diversos estudios han demostrado que los Territorios Indígenas

(TI) y las Áreas Naturales Protegidas (ANP) presentan tasas significativamente más bajas de deforestación y pérdida de carbono asociada (Walker y col. 2014, 2020). Entre 2001 y 2021, los TI amazónicos removieron en promedio 340 millones de toneladas métricas de CO₂ por año (WRI 2023), funcionando como verdaderas barreras climáticas. Incluso en contextos de presión extractiva, estas áreas presentan mayor estabilidad de biomasa y menor incidencia de incendios (Silva Junior y col. 2023). Esta efectividad se relaciona con una gobernanza territorial sólida y con prácticas tradicionales de manejo que favorecen la conservación. Sin embargo, un reto para estas unidades territoriales, y en general para la región, es la pérdida silenciosa de carbono por degradación de los bosques (Walker y col. 2020), donde el camino por recorrer es más complejo.

Entre 2001 y 2021, los TI amazónicos removieron en promedio

340M

de toneladas métricas de CO₂ por año (WRI 2023), funcionando como verdaderas barreras climáticas.



Foto: Daniel Chamba / Fundación EcoCiencia

² <https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw::forest-carbon-removals/explore>

A pesar de estos aportes, persisten barreras estructurales para el monitoreo y la gobernanza del carbono forestal. Diversos países amazónicos carecen de inventarios forestales continuos, de sistemas de monitoreo de alta resolución y de capacidades técnicas para integrar datos de sensores remotos con información de campo. Esta limitación restringe la capacidad de sus Estados para reportar avances en compromisos climáticos como las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) o REDD+ (PANGAEA 2020, Flores y col. 2024, Global Forest Watch 2023). Frente a ello, la combinación de datos satelitales, algoritmos de aprendizaje automático y redes locales de monitoreo se presenta como una estrategia innovadora para mejorar la precisión y transparencia de los reportes de carbono.

Desde una perspectiva de justicia climática, esta crisis evidencia una paradoja: los pueblos indígenas, que históricamente han protegido sus territorios y mantenido bajos niveles de emisiones, enfrentan obstáculos para acceder a financiamiento climático, tecnologías y mecanismos de compensación. Reconocer su rol en la mitigación, proteger sus derechos territoriales y dotarlos de herramientas para el monitoreo autónomo son pasos fundamentales hacia una transición justa (WRI 2023, Lima y col. 2024).

En suma, comprender la dinámica del carbono forestal en la Amazonía exige un enfoque integral que articule factores ecológicos (biomasa, captura, pérdidas), sociales (gobernanza territorial, derechos indígenas) y tecnológicos (teledetección, modelación climática). Este conocimiento es indispensable para diseñar políticas públicas más efectivas, promover la conservación basada en evidencia y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas amazónicos ante el cambio climático. De no tomarse medidas urgentes, la Amazonía podría estar muy cerca de un punto de no retorno: estudios recientes liderados por Nobre y Lovejoy advierten que ya se están observando señales de un posible colapso hacia un ecosistema más seco y menos capaz de regular el clima (Lovejoy & Nobre, 2019); mientras que el Informe del Panel Científico por la Amazonía (2021) describe los umbrales críticos de precipitación y degradación que, de ser superados, podrían acelerar la transición irreversible de grandes áreas hacia estados degradados." Flores y col. (2024) advierten sobre "transiciones críticas del sistema forestal amazónico" que podrían derivar en un colapso ecológico regional con consecuencias globales. La degradación acelerada de este complejo de ecosistemas compromete no solo la biodiversidad y la cultura regional, sino también la seguridad climática del planeta.

2.

Objetivos

En el marco de este trabajo se tuvo como **objetivo general** relacionar la dinámica del carbono aéreo en la Amazonía biogeográfica con la gestión y gobernanza territorial.

Para ello se plantearon diversos objetivos específicos:



Estudiar la dinámica de carbono aéreo en bosques para el período 2000-2023 y su relación con los cambios en las coberturas naturales de la Amazonía biogeográfica, mediados por presiones humanas o factores climáticos



Modelar la tendencia del carbono aéreo en bosques para el año 2030 bajo diferentes escenarios de uso del espacio y su gestión/ gobernanza territorial.

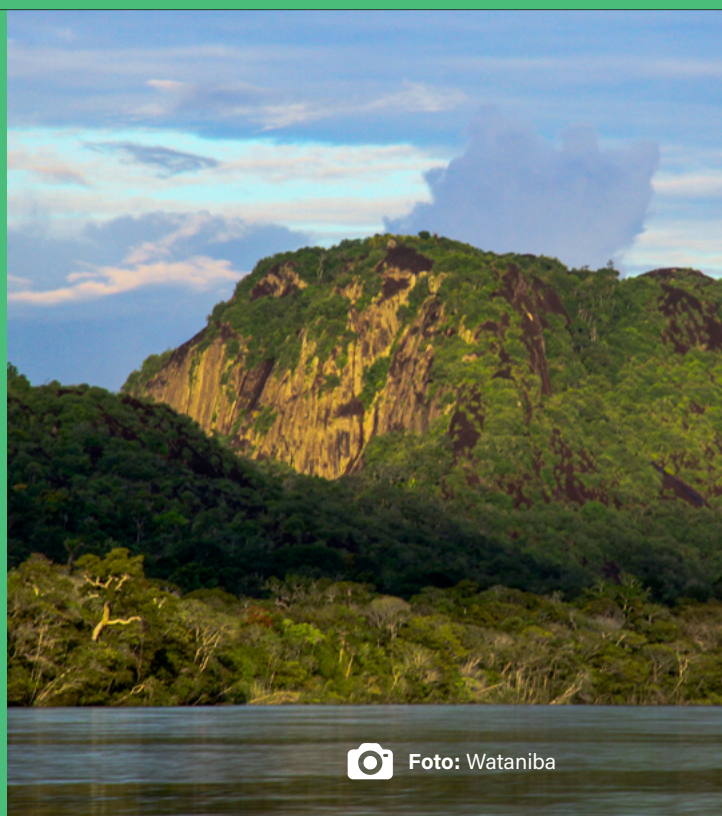


Foto: Wataniba

3.

Marco metodológico

- 3.1.** Área de interés: Amazonía biogeográfica
- 3.2.** Datos de carbono
- 3.3.** Relación entre coberturas de vegetación y carbono
- 3.4.** Relación con variables climáticas



3.1.

Área de interés: Amazonía biogeográfica

El término Amazonía representa a un complejo conjunto de ecosistemas tropicales, muchos de los cuales son boscosos, pero es también un intrincado mundo de relaciones socioculturales de pueblos indígenas.

Sus límites pueden definirse considerando múltiples criterios, como los hidrológicos, biogeográficos, socioculturales e, incluso, legales. Esta situación se repite en la mayor parte de los nueve países que consideran que poseen Amazonía, donde algunos son más o menos conocidos (reconocidos) como amazónicos. En cualquier caso, se trata de una región con áreas continuas de extensa vegetación natural, alta diversidad biológica, cultural y lingüística. Esto hace que los estudios existentes que se refieren a la Amazonía pueden abarcar diferentes áreas geográficas. Además, en muchos casos la referencia a la Amazonía se centra en Brasil, que, por su extensión, abarca la mayor parte de las diferentes definiciones empleadas.

A los efectos de este trabajo, el área de estudio que se considera es el de la Amazonía Biogeográfica, la cual, a su vez toma en cuenta elementos fitogeográficos y zoogeográficos. De esta manera los resultados serán comparables con estudios previos de la Red Amazónica de Información Georreferenciada (RAISG) y el Centro de Investigación Climática Woodwell (WCRC, por sus siglas en inglés) (RAISG 2014, Walker y col. 2014, RAISG 2020, Walker y col. 2020, Alejo y col. 2021, RAISG 2022, 2023).

La Amazonía biogeográfica abarca una superficie de un poco más de 7 millones de km² (figura 3a1) y su superficie se extiende en los nueve países sudamericanos. El enfoque de este estudio será regional.

3.2.

Datos de carbono

Los datos de biomasa aérea (Above-ground biomass) fueron generados por Chloris Geospatial, en coordinación con el WCRC. La información proviene de mediciones satelitales (Landsat, Sentinel, GEDI), LiDAR aerotransportado y algoritmos de aprendizaje automático para estimar la biomasa aérea a una resolución espacial, en este caso, de 30 metros. Los valores por pixel expresados en megagramos de carbono (MgC) se convirtieron a megatoneladas (MtC), que a efectos de los análisis regionales

se trabajaron por km². La evaluación sobre los cambios en el carbono aéreo en el período 2000-2023 se hizo para todas las coberturas, para el conjunto de bosques y para los bosques estables, considerando la información generada la iniciativa Mapbiomas Amazonía, en su colección 6 (Mapbiomas-RAISG 2024). Además, se consideraron tres tipos de unidades de manejo territorial: territorios indígenas, áreas naturales protegidas y otras tierras, las cuales fueron proporcionadas por el grupo de datos geográficos de RAISG.



Figura 3.a.1: Amazonía biogeográfica en el contexto de diferentes formas de definir este complejo sistema natural



3.3.

Relación entre coberturas de vegetación y carbono

Un segundo elemento central de este estudio fue evaluar la relación entre los cambios de coberturas vegetales, el aumento en las actividades agropecuarias, la infraestructura urbana y la minería (principalmente de oro) con la dinámica de biomasa/carbono en la amazonía biogeográfica.

Paso 1:

Descarga y estandarización de los datos de cobertura y uso, Amazonía, colección 6, de Mapbiomas (Mapbiomas-RAISG 2024)

Paso 2:

Reclasificación de clases de cobertura de MapBiomas Amazonía, Cobertura y Uso:

Para facilitar el análisis del cambio de uso del suelo y su relación con el stock de carbono, las clases originales de cobertura de la Colección 6 de MapBiomas Amazonía fueron reclasificadas en nueve clases generales, las cuales fueron:

ID	Cobertura
1	Bosque (Incluye Formación boscosa (1.1), Bosque abierto (1.2) y Manglar (1.3))
2	Formación Natural No Forestal
3	Agropecuario (sin considerar Silvicultura o plantaciones de palma)
4	Área sin vegetación
5	Infraestructura urbana
6	Cuerpos de agua (integración de datos de Mapbiomas Agua y Cobertura/ Uso)
7	Bosque Inundable
8	Pastizal Inundable
9	Minería

Paso 3:

Resamplero de mapas de coberturas a 270 metros.

Esta resolución fue seleccionada por ser un múltiplo exacto de los 30 metros de resolución original de los datos base, lo que permite mantener la coherencia espacial sin introducir distorsiones. Además, esta decisión se fundamenta en la necesidad de manejar eficientemente el procesamiento a escala regional, dado que la extensión del área de estudio es considerable. La misma resolución de 270 metros se aplicó de manera uniforme a todas las variables utilizadas que se mencionan en el siguiente punto, con el fin de mantener la compatibilidad entre capas.



Foto: Felipe Rodríguez / Gaia Amazonas

Paso 4:

Selección de variables potenciales para explicar los cambios entre formaciones vegetales, asociados con la pérdida o mantenimiento de ecosistemas naturales, las cuales se agruparon en **dos categorías:**

Variables intrínsecas al terreno:

- **Altitud:** Derivada de un modelo digital de elevación (SRTM)
- **Pendiente:** Calculada a partir del DEM
- **Cercanía a cuerpos de agua:** Distancia a ríos, lagunas y lagos, utilizada como proxy de accesibilidad y potencial de modificación del paisaje. La capa de cuerpos de agua se obtuvo a partir de la Colección 2, de Mapbioma Agua, Amazonia (Mapbiomas-RAISG 2025). Se debe resaltar que estos datos fueron integrados a los mapas de coberturas.
- **Cuencas hidrográficas:** Se utilizó una estratificación por unidades hidrográficas de nivel 3 como variable categórica que refleja condiciones biofísicas regionales. Esta capa de información proviene del grupo de datos geográficos de RAISG.



Foto: Karen Espejo / RAISG



Foto: Daniel Chamba / Fundación EcoCiencia

Asociadas con actividades humanas:

- **Distancia a carreteras:** Representa el grado de accesibilidad, usualmente correlacionado con procesos de deforestación (RAISG 2020, Kabuanga y col. 2021) Los datos de viabilidad se obtuvieron a partir de la integración de datos de vías de RAISG Y Open Street Map.
- **Distancias a puntos de deforestación:** La información de deforestación fue obtenida de la plataforma Global Forest Watch (2023). Esta información se consideró como un indicador de presión antrópica reciente.
- **Unidades espaciales de gestión o gobernanza territorial diferenciada:** A partir de la información cartográfica de Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Territorios Indígenas (TI) proporcionada por RAISG, para dos fechas (2016 y 2023) se definieron cuatro unidades de gestión o gobernanza territorial: ANP sin superposición, TI sin superposición, áreas de superposición entre ANP y TI y otras tierras (superficies no incluidas en las categorías anteriores)
- **Distancias a cada clase de cobertura del suelo:** Se generaron mapas de distancia euclidiana a cada una de las nueve clases predefinidas. De esta forma se modela la influencia espacial que ejerce cada cobertura sobre áreas cercanas.

Estas variables se agruparon en estáticas y dinámicas, en función del tipo de dato:

- **Variables estáticas:** Son aquellas que no presentan cambios o por limitaciones en la información disponible se consideraron como estables en el tiempo durante el periodo de análisis (por ejemplo, altitud, pendiente, cuencas hidrográficas, distancias a vías).
- **Variables dinámicas:** Aquellas que pueden cambiar en el periodo analizado (por ejemplo, distancias a puntos de deforestación, Áreas Naturales Protegidas y Territorios Indígenas, distancias a coberturas de MapBiomás)

Paso 5:

Modelaje de los cambios de cobertura en el tiempo, a partir de las variables seleccionadas.

Para ello se empleó el programa Dinámica Ego (Environment for Geoprocessing Objects, <https://csr.ufmg.br/dinamica/>), una plataforma especializada en modelamiento espacial dinámico basada en reglas de transición. Se seleccionaron dos ventanas temporales de siete años cada una. En la primera se definiría el modelo (2016-2023) y en la segunda se simularían escenarios al 2030. El modelo se basa en la metodología de pesos de evidencia, un enfoque bayesiano que cuantifica la relación espacial entre la ocurrencia de los cambios observados en el uso del suelo y las variables explicativas seleccionadas. Esta técnica permite identificar las zonas con mayor probabilidad de cambio, asignando pesos positivos o negativos según la intensidad de la asociación. Adicionalmente, Dinámica EGO emplea las tasas de cambio observadas entre las coberturas en el período base para definir la cantidad de área que debe transformarse en el escenario proyectado, guiando así el proceso de simulación espacial en conjunto con los pesos de evidencia. **Los pasos seguidos se resumen en:**

Evaluación del poder predictivo de los cambios observados entre 2016 y 2023 de las variables seleccionadas (intrínsecas al espacio y de origen humano).

El producto se sometió a una validación con respecto a los datos observados para 2023, utilizando el método de Similaridad de Fuzzy, que permite medir el grado de coincidencia espacial entre el mapa simulado del año 2023 y el mapa observado, para lo que considera similitudes en ventanas móviles alrededor

de cada píxel. Este enfoque reconoce que los cambios en el uso del suelo no siempre ocurren con exactitud en el mismo píxel, por lo que resulta más apropiado que las métricas tradicionales de validación puntual (como la matriz de confusión).

Se aplicaron ventanas de análisis de tamaño impar creciente (1, 3, 5, ..., 15 píxeles) bajo dos tipos de funciones de decaimiento de la similitud:

- **Constante:** todos los píxeles dentro de la ventana tienen el mismo peso.
- **Exponencial:** los píxeles cercanos tienen mayor peso que los más alejados.

Para cada tamaño de ventana y tipo de función, se obtienen dos valores: un valor mínimo, que representa el grado más bajo de coincidencia espacial identificado en el área de estudio (es decir, la zona donde el modelo falló más en reproducir los cambios observado); y un valor máximo, que correspondiente a la mayor coincidencia localizada entre el mapa simulado y el observado, que usualmente representan zonas más estables. Esta información permite analizar no solo el desempeño promedio del modelo, sino también la variabilidad espacial de su precisión.

La Tabla 3c1 muestra los coeficientes de similaridad entre la simulación al 2023 y los valores observados en cuanto a las coberturas consideradas en este trabajo. En la figura 3c1 se presenta gráficamente la comparación realizada. Como se aprecia, hay una mejora progresiva en la similaridad conforme aumenta el tamaño de la ventana de comparación, lo cual es esperable en simulaciones espaciales. Bajo una función constante, la similitud aumentó desde 0,18 (ventana 1 píxel) hasta 0,88 (ventana 15 píxeles).

En la función exponencial, los valores fueron más conservadores, comenzando también en 0,18, pero alcanzando un máximo de 0,46 para la ventana de tamaño 15. Por otro lado, en la figura 3c1 se aprecia en forma clara que en el caso de la función constante las

mejoras después de usar ventanas de 11x 11 píxeles son menores que hasta alcanzar ese tamaño de ventana. En contraposición, bajo la función exponencial no hay mejoras sustanciales después de la ventana de 7x7 píxeles.

Tamaño de ventana	Constante (Máx)	Constante (Mín)	Exponencial (Máx)	Exponencial (Mín)
1 × 1	0,184	0,184	0,184	0,184
3 × 3	0,38	0,274	0,316	0,245
5 × 5	0,545	0,369	0,392	0,288
7 × 7	0,666	0,454	0,429	0,314
9 × 9	0,751	0,524	0,447	0,329
11 × 11	0,81	0,582	0,456	0,337
13 × 13	0,853	0,629	0,460	0,342
15 × 15	0,884	0,667	0,462	0,344

Tabla 3c1. Valores de Similaridad de Fuzzy entre los resultados modelados (2023) y los datos observados para cambios en las Coberturas de suelo.

Estos valores reflejan un buen desempeño del modelo, especialmente bajo el criterio de ventana constante, lo cual indica que las transiciones simuladas mantienen una fuerte relación espacial con los patrones observados en el año 2023. Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos en la validación puntual, donde se alcanzó una exactitud global del 84% y un índice Kappa de 0,705, lo que sugiere un nivel muy bueno entre la simulación y los datos de referencia en base al agrupamiento cualitativo del Índice

Kappa (Prina 2014). La concordancia espacial observada mediante la similaridad fuzzy, particularmente bajo la función constante, refuerza la validez del modelo para capturar las tendencias principales de cambio de cobertura, incluso cuando estas no ocurren de forma perfectamente coincidente en el espacio. En conjunto, ambos enfoques de validación aportan evidencia complementaria sobre la calidad del ajuste espacial del modelo y su capacidad predictiva.

Fuzzy Similarity

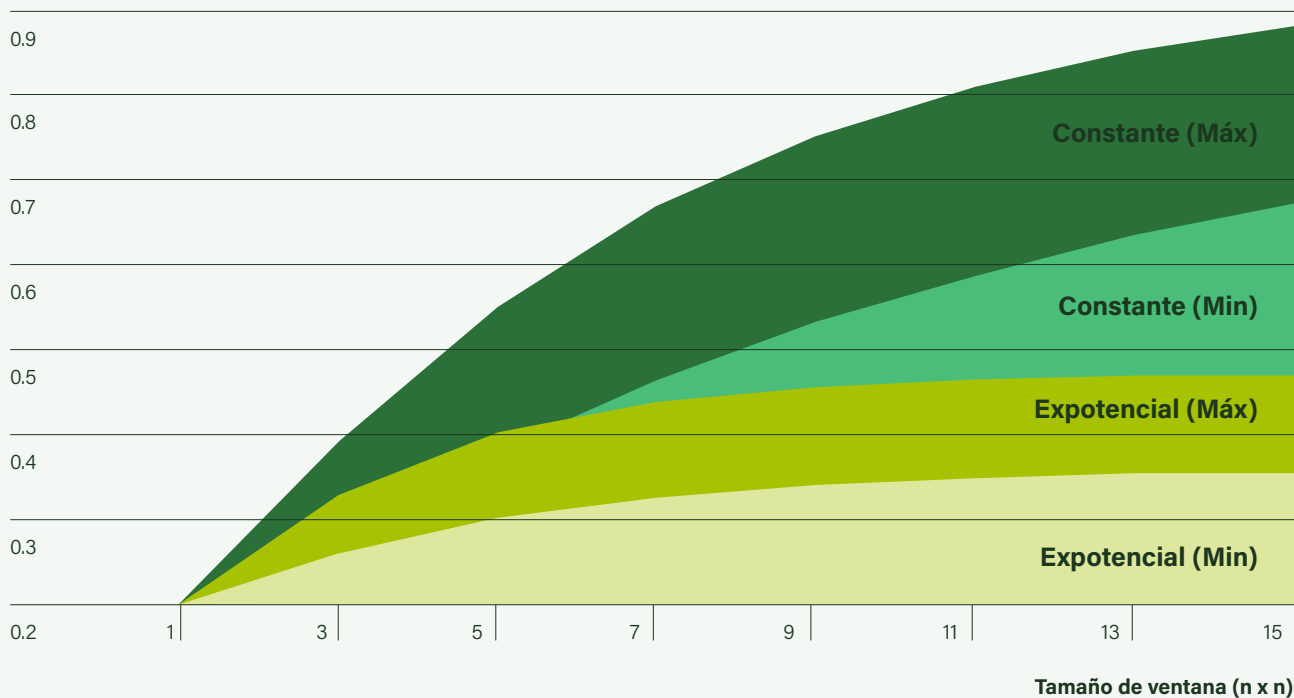


Figura 3c1. Valores de Similitud de Fuzzy entre los resultados modelados (2023) y los datos observados para cambios en las Coberturas de suelo.

Este proceso asume que la accesibilidad, bien por vías terrestres como por ríos, favorece los procesos de pérdida de bosque, así como la baja pendiente y relativas bajas altitudes. En contraposición, unidades de gestión territorial como los territorios indígenas (TI) y áreas naturales protegidas (ANP) evitan la pérdida de bosque.

Modelaje de diferentes escenarios de coberturas para 2030, considerando diversas condiciones:

- **Escenario Regulado:** las transiciones de bosque a tierras agropecuarias, áreas urbanas y mineras son reducidas, considerando las tasas mínimas de cambio del período 1985-2023 de Mapbiomas Cobertura y Uso, Colección 6), donde el período de menor transformación de bosque a tierras agropecuarias fue de 2009-2015, a áreas urbanas de 2014 a 2020 y a áreas mineras de 2005-2011. Bajo este escenario se asume que se implementan políticas públicas que apuntan a la regulación de las actividades que llevan a reducir o evitar la transformación, fragmentación o eliminación de los bosques y de la vegetación natural herbácea en la Amazonía biogeográfica.

- **Escenario de inacción:** las transiciones de bosque a tierras agropecuarias, áreas urbanas y mineras se mantienen constantes interanualmente, a partir de lo ocurrido entre 2016 y 2023. No se consideran cambios notorios en las políticas públicas en materia de gestión territorial y aspectos para el período 2023-2030, con respecto a lo hecho entre 2016 y 2023.
- **Escenario de regulación permisiva o tolerante:** las transiciones de bosque a tierras agropecuarias, urbanas y mineras son máximas, estimadas a partir del análisis de la serie histórica 1985-2023 de Mapbiomas Cobertura y Uso, Colección 6), donde el período de mayor transformación a tierras agropecuarias fue 1992-1998, a áreas urbanas de 1987-1993, y a áreas mineras 2017-2023. En este caso las políticas públicas que apuntan a la regulación de las actividades que llevan a la transformación, fragmentación o eliminación de los bosques y de la vegetación natural herbácea en la Amazonía biogeográfica no se aplican o no de manera apegada a la ley. Hay unidades, como los TI y las ANP que tienen controles, pero fuera de éstas las regulaciones existentes son muy permisivas, tolerantes o no se aplican con criterios de sostenibilidad socioambiental.
- **Escenario sin TI o ANP:** las transiciones se definieron considerando sólo los cambios que tuvieron lugar en las unidades Otras tierras, que son las que tuvieron las tasas de modificación más altas dentro de la Amazonía biogeográfica para el período 2016-2023. Son unidades donde no se aplican enfoques de sostenibilidad socioambiental o de conservación. Esas tasas se extrapolaron a toda la región, incluso ANP y TI, como si no existieran espacios con algún tipo de protección o gestión territorial diferenciada.



Foto: Felipe Rodríguez / Gaia Amazonas

Paso 6:

Proyecciones de carbono al 2030

Con la información de carbono para el período 2000-2023 se procedió a generar escenarios hipotéticos de cambio en la cantidad del carbono almacenado en la vegetación arbórea al 2030. Para ello se generó un modelo de regresión no lineal basado en el algoritmo de Random Forest implementado en la plataforma de Google Earth Engine

El modelaje de la dinámica de carbono consideró como variables independientes aquellas previamente usadas para estudiar los cambios en los tipos de cobertura del suelo, las cuales fueron puestas a prueba. Así mismo, la información sobre las proyecciones de coberturas para los distintos escenarios al año 2030. Los datos de carbono al 2023 se tomaron como variable dependiente, por ser la que se desea predecir.

Las variables independientes empleadas para entrenar el modelo fueron:

- Elevación (DEM)
- Pendiente
- Cuencas hidrográficas
- Altura del dosel arbóreo y su desviación estándar
- Distancia a vías (carreteras y caminos)
- Distancia a puntos de deforestación
- Categorización territorial: Áreas Naturales Protegidas (ANP), Territorios Indígenas (TI) y otras áreas
- Coberturas del suelo proyectadas al 2030 según cada escenario
- Mapas de distancia euclidiana a cada clase de cobertura (generadas previamente desde los mapas de Dinamica EGO)

Como parte del proceso se llevó a cabo una evaluación del valor de importancia de las variables de entrada utilizando las herramientas propias del algoritmo de Random Forest en GEE, lo cual permitió identificar los predictores más influyentes en la estimación de carbono.

A partir del análisis de importancia, se priorizaron aquellas variables que aportan información espacial clave para explicar la distribución del carbono en la vegetación.

Entre las variables más relevantes se encuentran (Tabla 3c2):

- Altura del dosel arbóreo, que refleja una relación directa con la biomasa aérea,
- Las variables topográficas: donde menor pendiente y elevación influyen en la accesibilidad y la aptitud del terreno para actividades humanas (conversión)
- Proximidad a ciertas clases de cobertura del suelo (como bosques, áreas agrícolas o cuerpos de agua),
- Cercanía a vías terrestres y ríos, que suelen actuar como vías de acceso y por tanto como corredores de transformación del paisaje.



Descripción de la variable	Valor de importancia	Incorporada en el modelo final
Altura del dosel arbóreo	6.75E+10	Sí
Distancia a Formación natural no boscosa	5.72E+10	Sí
Distancia a Tierra Agropecuaria	5.50E+10	Sí
Distancia a Minería	4.69E+10	Sí
Pendiente del terreno	4.79E+10	Sí
Elevación (DEM)	4.36E+10	Sí
Distancia a Zona Urbana	4.48E+10	Sí
Distancia a Pastizal Inundable	4.06E+10	Sí
Distancia a Área sin vegetación	3.89E+10	Sí
Distancia a Vías	3.63E+10	Sí
Distancia a Bosque Inundable	3.57E+10	Sí
Distancia a Cuerpos de Agua	3.00E+10	Sí
Distancia a Bosques	2.49E+10	Sí
Cuenca Hidrográfica	2.40E+10	Sí
Mapa de cobertura del suelo	1.82E+10	Sí
Desviación estándar de la altura del dosel arbóreo	1.96E+10	No
Distancia a puntos de deforestación	2.00E+10	No
Áreas naturales protegidas y Territorios indígenas	9.56E+09	No

Tabla 3c2. Valores de importancia de las variables independientes consideradas para modelar la variación en el carbono aéreo almacenado en la Amazonía biogeográfica (modelo Random Forest).

La suposición de fondo es que los cambios de cobertura, especialmente la pérdida de bosques por su paso a tierras agropecuarias, mineras o urbanas es la principal causa de la pérdida del carbono almacenado en la biomasa aérea. Este proceso se considera que se ve favorecido por la cercanía a vías terrestres y ríos, zonas de menor pendiente y altitud. Además, es un proceso que se ve ralen-

tizado por la presencia de tierras indígenas (TI) y áreas naturales protegidas (ANP). La validación del modelo, en este caso, se realizó por país, utilizando el mapa de carbono observado y modelado para el año 2023. Se calcularon tres métricas de desempeño para cada país modelado: Error Cuadrático Medio (RMSE), Coeficiente de Correlación de Pearson (R) y Error Absoluto Medio (MAE).

País	RMSE (MgC/ha)	MAE (MgC/ha)	r (Pearson)
Perú	295.32	11.83	0.843
Brasil	302.56	12.33	0.912
Ecuador	248.80	10.72	0.830
Colombia	294.13	11.54	0.886
Venezuela	192.07	10.05	0.937
Guyana	218.62	10.51	0.920
Suriname	170.36	9.12	0.925
Guyana Francesa	162.02	8.80	0.890
Bolivia	384.44	13.70	0.882

Los resultados muestran que el modelo presenta un buen nivel de ajuste general en todos los países, con valores de correlación superiores a 0,83 en todos los casos. Los países con mejor ajuste (mayor R) fueron Venezuela (0,937), Guyana (0,920), y Suriname (0,925), lo que sugiere una relación muy fuerte entre los valores predichos y observados en esas zonas, posiblemente debido a una mayor estabilidad en el uso del suelo o a una mejor calidad de los datos de entrada.

En cuanto al Error Cuadrático Medio (RMSE), los valores más bajos se observaron en Guyana Francesa (162,02 MgC/ha³), Suriname (170,36 MgC/ha) y Venezuela (192,07 MgC/ha), lo que indica un menor grado de error absoluto en las predicciones de carbono. Por el contrario, el mayor RMSE se presentó en Bolivia (384,44 MgC/ha), seguido por Brasil y Perú, lo que podría estar relacionado con una mayor heterogeneidad del paisaje, mayor

dinámica de cambio de uso del suelo, o complejidades en la representación espacial del carbono en esos territorios.

El MAE, que representa el error promedio es más intuitivo, también fue menor en países como Guyana Francesa (8,80 MgC/ha) y Suriname (9,12 MgC/ha), mientras que Bolivia nuevamente mostró el valor más alto (13,70 Mg/ha), reflejando mayor dificultad para predecir con precisión los valores de carbono en este país.

En conjunto, estos resultados indican que el modelo es robusto y generalizable, con un buen desempeño en la mayoría de los países, aunque se identifican zonas donde puede ser necesario un mayor refinamiento, ya sea mediante la incorporación de otros datos locales, variables adicionales, o ajustes específicos por región.

³ MgC/ha equivale a MtC/ha, donde 1 MgC/ha equivale a 0,01 MgC/km² o 0,01 MtC/km²

3.4.

Relación con variables climáticas

Dado el contexto de cambio climático y su impacto sobre la estabilidad ecológica de la Amazonía, resulta fundamental profundizar y contabilizar cómo las anomalías térmicas afectan la dinámica del carbono en la región y en distintos regímenes de gobernanza territorial, en particular porque existen evidencias de que las mismas alteran la capacidad de la vegetación, y en particular de los bosques, para almacenar carbono. Así mismo, sobre cómo impactan esas anomalías en diferentes unidades de gestión o gobernanza territorial como los TI y las ANP.

Para evaluar esta relación, se definió el flujo metodológico mostrado en la figura 3d1. La Etapa 1 consideró la conversión y el preprocesamiento de los datos. Los datos de temperatura superficial terrestre se tomaron del satélite MODIS LST. Esta información, -disponible en Google Earth Engine con estimaciones diarias a una resolución espacial de un kilómetro-, se convirtió de grados Kelvin a Celsius y se calcularon los residuos anuales con respecto al promedio 2000–2023. De forma análoga se calcularon los residuos para carbono aéreo de bosque.

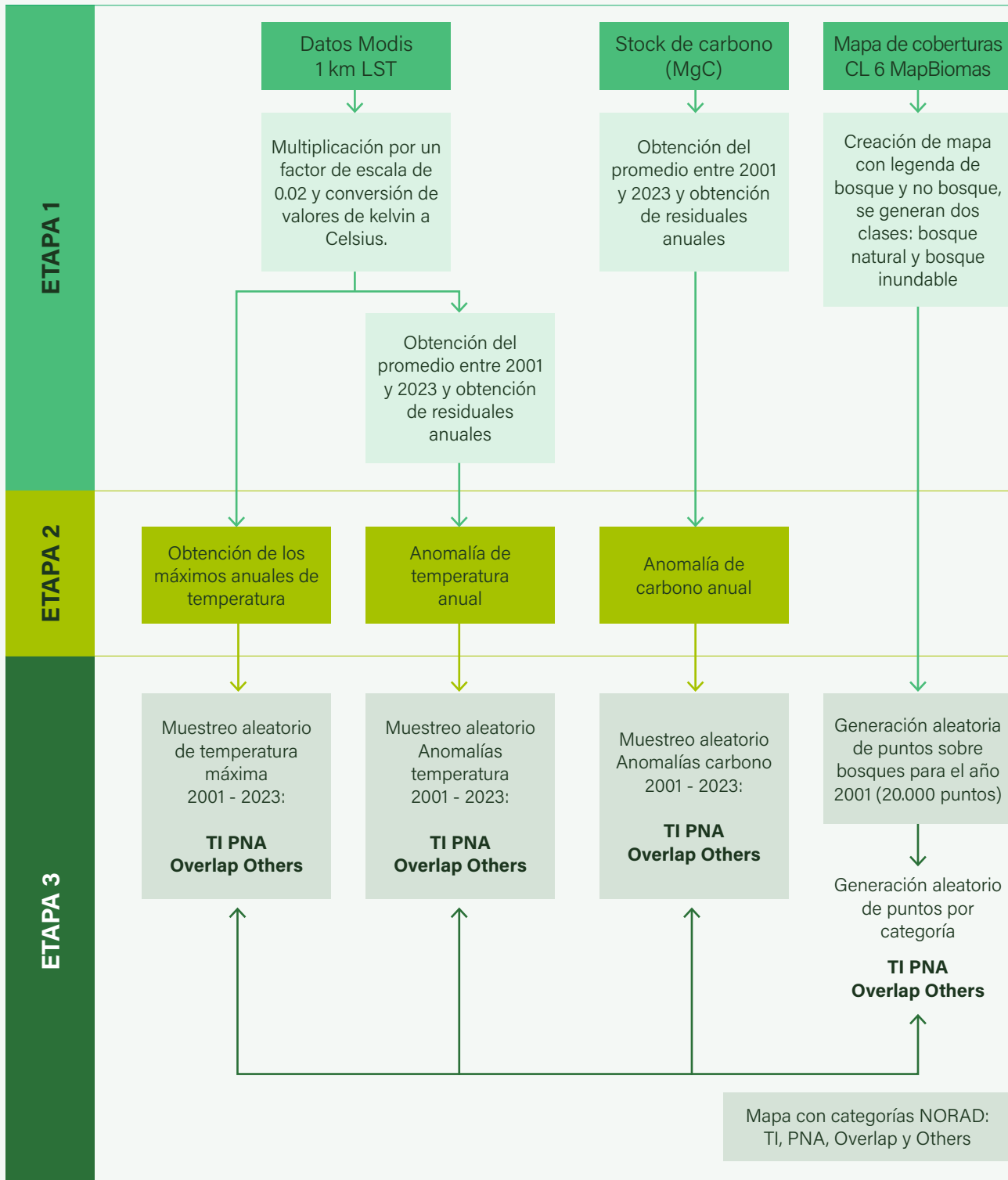
En la Etapa 2, se generaron tres variables: máximos anuales de temperatura, anomalías anuales de temperatura y anomalías anuales

de carbono. Luego, en la Etapa 3, se llevó a cabo el muestreo aleatorio sobre puntos dentro del bosque (20,000 puntos para el año 2001). Estos puntos son clasificados en cuatro categorías según el mapa de categorías NORAD (TI, PNA, zonas de superposición y otras tierras) y se extraen las variables generadas en la etapa anterior. Estos puntos se superponen con las capas de anomalía para extraer información de temperatura y carbono, lo que permitió generar subconjuntos de datos por categoría para los análisis posteriores.



Foto: Wataniba

Figura 3d1. Flujo metodológico para el análisis de las relaciones entre anomalías de carbono y temperatura.



ETAPA 1: Conversión de datos, cálculo de primedios, generación de residuales

ETAPA 2: Generación de características

ETAPA 3: Muestreo

4.

Dinámica del cambio de las coberturas vegetales en los años recientes, principales detonantes (drivers) intrínsecos y humanos en la Amazonía biogeográfica



El proceso de entender qué variables definen las dinámicas de cambio espaciotemporales observados en la naturaleza lleva al uso de múltiples herramientas computacionales que hacen uso de los datos multitemporales disponibles, además del conocimiento acumulado, para simular posibles resultados, donde cada ruta de análisis le da importancia a unas y otras variables. Cuáles de ellas tienen más o menos peso para explicar una situación depende de contar con datos reales que permitan orientar ese proceso y, obtenido el mejor modelo posible, hacer predicciones. En este caso, se usó Dinamica-Ego, como ya mencionamos.

En la figura 4.1 se presentan las clases de coberturas y usos de la Amazonía biogeográfica detectadas para 2016 y 2023. En este periodo se observa una dinámica marcada por la pérdida progresiva y constante de coberturas naturales y en su contraposición, la expansión de usos antrópicos en la región, tal como se evidencia en la tabla 4.1. La cobertura bosque, que incluye las categorías de Mapbiomas cobertura y uso: Formación boscosa, Bosque abierto, Manglar y Bosque inundable, experimentó una reducción neta de más de 120 mil km² entre 2016 y 2023, que equivale a una disminución del 2,45% con respecto a 2016. Paralelamente, se registra un crecimiento significativo en tierra agropecuaria, que aumenta en más de 129 mil km². Este cambio está acompañado por la expansión de áreas urbanas, mineras y sin vegetación. También destaca la reducción de los bosques y pastizales inundables, relacionada con su conversión a actividades antrópicas o debido

a alteraciones hidrológicas. Es decir, en este período hubo una intensificación del uso de suelo, a expensas de coberturas de vegetación natural, en particular boscosa. Además, se evidenció un incremento notable en la superficie de cuerpos de agua, lo que podría estar asociado a procesos tanto naturales como antrópicos.

De acuerdo con el modelo trabajado con Dinamica-EGO y al método de pesos de evidencia que emplea, fue posible identificar evaluar la relación entre las diferentes variables explicativas y la ocurrencia de cambios de cobertura entre el 2016 y 2023. Los resultados muestran que la proximidad a las clases de áreas agropecuarias e infraestructura urbana, presentan una asociación positiva y significativa con las transiciones observadas, lo cual indica que los cambios en las coberturas remanentes tienden a concentrarse en torno a estas áreas ya transformadas.

Otras variables, en este caso naturales o intrínsecas, que pueden favorecer o limitar ciertos cambios son la altitud y la pendiente. El modelo muestra que las áreas de relieve más bajo y con menor pendiente fueron más susceptibles a cambios hacia coberturas agropecuarias. Así mismo, la presencia de cuerpos de agua y la cercanía a éstos también tiene un papel importante en la dinámica de cambio en determinados sectores y para algunas coberturas naturales, especialmente con relación a los bosques y pastizales inundables.

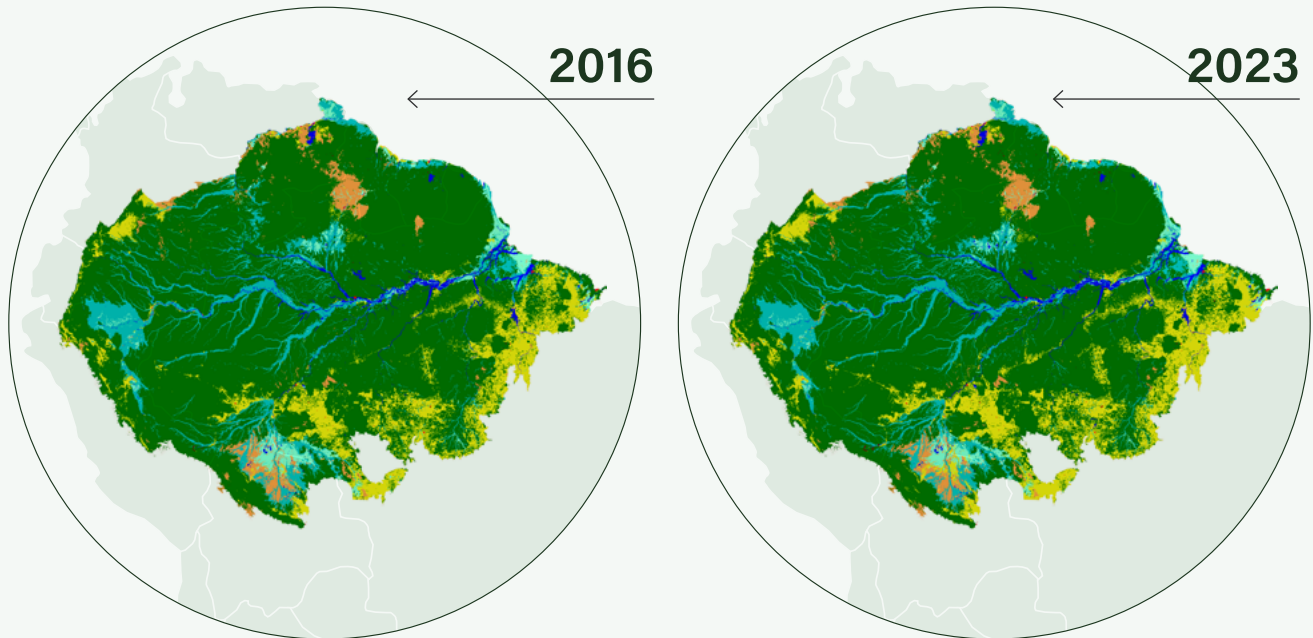
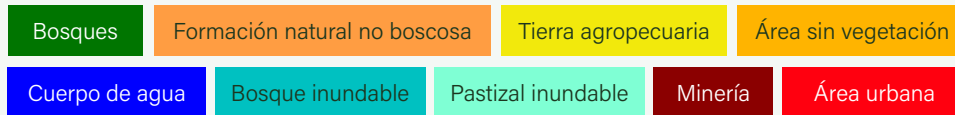


Figura 4.1. Coberturas y usos de la Amazonía Biogeográfica para los años 2016 y 2023



Año	2016	2023	Variación
Bosque	4.894.371 km ²	4.771.484 km ²	-2,51 %
Formación natural no boscosa	213.063 km ²	208.795 km ²	-2,00 %
Tierra agropecuaria	699.094 km ²	828.650 km ²	18,53 %
Área sin vegetación	2.449 km ²	3.864 km ²	57,76 %
Área urbana	5.812 km ²	6.580 km ²	13,21 %
Cuerpo de agua	285.592 km ²	315.165 km ²	10,35 %
Bosque inundable	708.091 km ²	698.743 km ²	-1,32 %
Pastizal inundable	169.942 km ²	144.043 km ²	-15,24 %
Minería	2.861 km ²	3.960 km ²	38,41 %

Tabla 4.1. Coberturas detectadas en 2016 y 2023 en la Amazonía biogeográfica

Foto: André Villas-Bôas / ISA



En la figura 4.2 se aprecian los resultados de la distribución espacial de las clases de vegetación natural y usos para 2023, así como los simulados por Dinamica-Ego. En la tabla 4.2 se muestran la extensión para cada cobertura. Las variaciones entre superficies detectadas y estimadas están entre -0,26% (área sin vegetación) y 0,11% (área urbana).

Las coberturas bosque y tierra agropecuaria tienen una diferencia del 0,01%, lo cual es un resultado muy satisfactorio, en particular porque tienen la mayor extensión superficial en la región y además concentran los valores más contrastables de carbono. Esto permite confiar en la capacidad del modelo para predecir cambios bajo diferentes escenarios.

Año	2023 Observado	2023 Simulado	Variación
Bosque	4.771.484 km ²	4.771.146 km ²	0,01 %
Formación natural no boscosa	208.795 km ²	208.669 km ²	0,06 %
Tierra agropecuaria	828.650 km ²	828.541 km ²	0,01 %
Área sin vegetación	3.864 km ²	3.874 km ²	-0,26 %
Área urbana	6.580 km ²	6.573 km ²	0,11 %
Cuerpo de agua	315.165 km ²	314.866 km ²	0,09 %
Bosque inundable	698.743 km ²	698.758 km ²	0,00 %
Pastizal inundable	144.043 km ²	143.969 km ²	0,05 %
Minería	3.960 km ²	3.966 km ²	-0,15 %

Tabla 4.2. Coberturas detectadas y simuladas para 2023 en la Amazonía biogeográfica

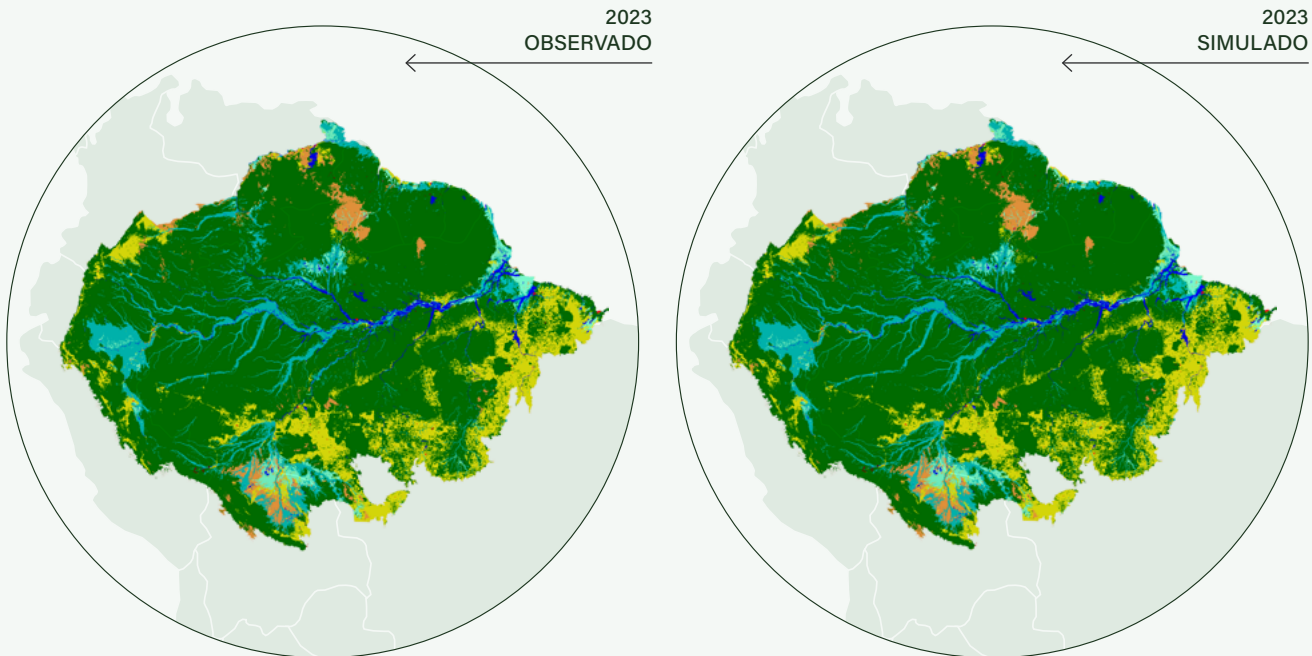


Figura 4.2. Coberturas y usos de la Amazonía Biogeográfica para los datos del 2023 Observado y 2023 Simulado

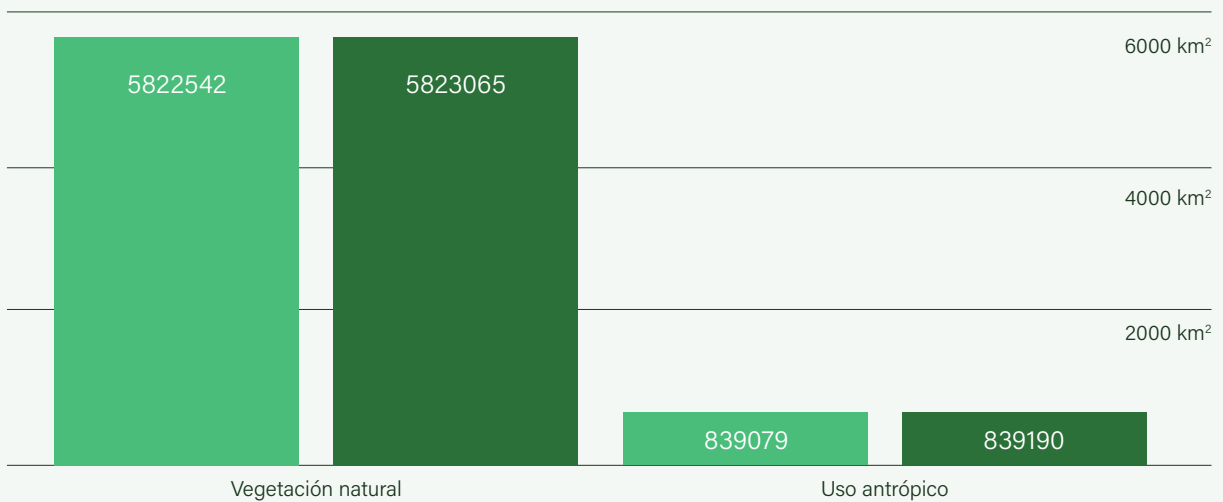
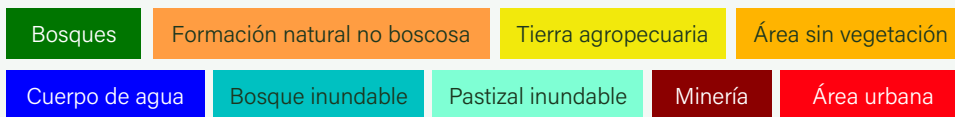


Figura 4.3. Coberturas agrupadas en Vegetación Natural y Uso antrópico para el 2023, de acuerdo a los datos observados y la condición simulada.



5.

Proyección en el corto plazo de la dinámica de cambio en las coberturas vegetales en la amazonía biogeográfica



En el marco de este trabajo, como ya se mencionó, se evaluaron cuatro escenarios. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la figura 5.1. Con base en la modelación espacial realizada con Dinamica EGO, las proyecciones al 2030, según los diferentes escenarios evaluados, indican que la Amazonía biogeográfica continuará experimentando un proceso de transformación progresiva de sus coberturas vegetales naturales, especialmente en zonas de mayor accesibilidad (fluvial o terrestre) y mayor presión antrópica en sus áreas cercanas. Las proyecciones indican que las transiciones más frecuentes seguirán siendo de bosques a usos agropecuarios.

En el escenario regulado, donde se consideran tasas mínimas históricas de conversión de bosque a usos agropecuarios, urbanos y mineros, se observa una recuperación de bosque con respecto a lo detectado en 2023, alcanzando cerca de 4,8 millones de km² al año 2030. El escenario de inacción, el cual mantiene tasas de transición interanuales fijas, predice la menor reducción en la cobertura boscosa al 2030. El escenario de regulación permisiva o tolerante (basado en las tasas de cambio máximas de cambio históricas entre 1985 y 2023 según MapBiomass) predice un segundo nivel de pérdida en la cobertura boscosa. Este caso implicaría volver a políticas públicas pobres, con marcos legales débiles en buena parte de la región, que en aquel momento experimentaba un menor impacto del cambio climático. Por su parte el escenario sin TI o ANP, en el que se aplican las tasas de transformación observadas entre 2016 y 2023 para las áreas fuera de ANP y TI (Otras tierras), el bosque presentaría su máxima reducción, al llegar a 4,5 millones de km². Es decir, para todos los escenarios, incluso el regulado, es muy probable que la extensión de bosque sea menor a la predicha

por efecto de los cambios asociados a una mayor extensión del contacto entre áreas naturales y de uso humano, sumado al efecto del cambio climático (mayor temperatura, menor precipitación) (Figuras 5,2 y 5,3).



Las tierras agropecuarias, por su parte, se consolidan como la categoría con mayor expansión neta (Figura 5.2), al superar 1,1 millones de km² bajo el escenario más extremo (Sin TI o ANP). Aunque en menor proporción debido a su extensión, también se proyectan aumentos en la superficie urbana y minera, con valores máximos en los escenarios de regulación permisiva o tolerante y sin TI o ANP. De modificarse las políticas públicas y disminuir aún más los controles existentes, estos escenarios representarían una subestimación de los cambios que se observarán.

Dado que estos cambios de las coberturas están estrechamente relacionados con la pérdida de biomasa vegetal, los mapas proyectados de uso del suelo al 2030 son el insumo principal para poder estimar la proyección de los stocks de carbono para el horizonte planteado.

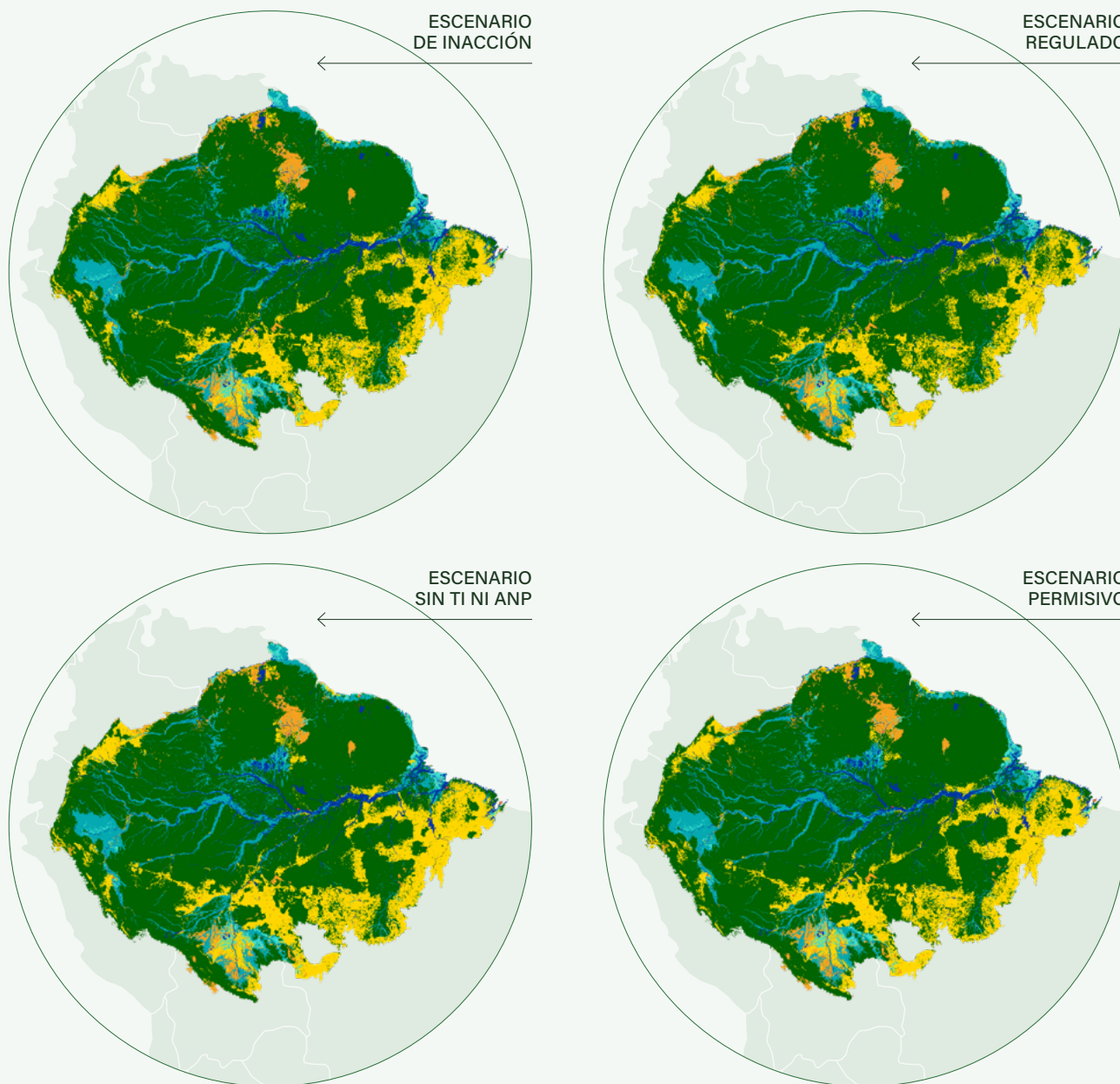


Figura 5.1. Resultados espaciales de los escenarios de cambio de cobertura modelados para el año 2030. Escenario Regulado: considera las menores tasas de cambio entre 1985-2023. Escenario de inacción: tasas interanuales de cambio hacia tierras agropecuarias, urbanas o mineras permanecen constantes. Escenario con regulación permisiva o tolerante: considera las mayores tasas de cambio ocurridas entre 1985-2023. Escenario sin TI o ANP: sólo considera las tasas de cambio que tienen lugar en Otras tierras.

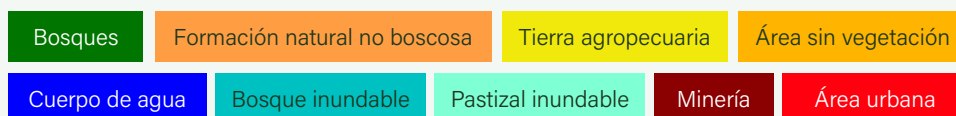
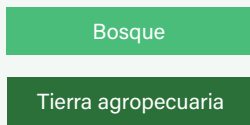


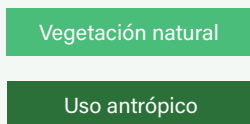
Figura 5.2. Coberturas de bosques y tierras agropecuarias detectadas para 2016 y 2023, y simuladas al 2030, bajo diferentes suposiciones.



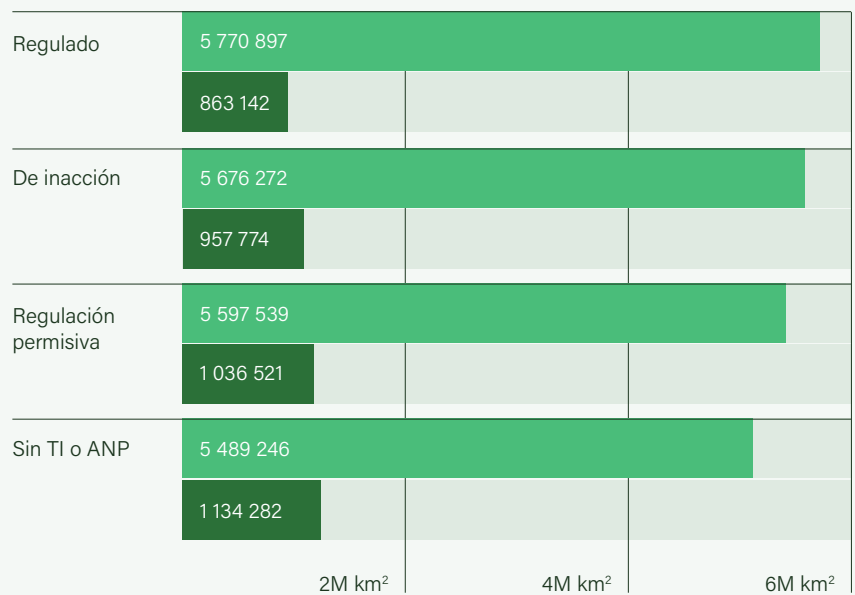
Condiciones observadas y simuladas (Dinamica - EGO)



Figura 5.3. Proyecciones de cambios en la vegetación natural y el uso antrópico al 2030, bajo diferentes escenarios.



Escenario a 2023



6.

Patrones de distribución de carbono aéreo en coberturas vegetales en la Amazonía biogeográfica

6.1. Patrones Generales

6.2. Carbono aéreo en las diferentes unidades de gestión territorial

6.3. Dinámica del carbono aéreo en bosques y la agudización de eventos climáticos (anomalías de temperatura) en la Amazonía biogeográfica.



6.1.

Patrones generales

La estimación de carbono aéreo para la Amazonia biogeográfica al 2023 se muestra en la figura 6a1. Los tonos amarillos reflejan la mayor cantidad de carbono por unidad de área, mientras los más oscuros (hacia los azules) indican dónde se encuentra en menor cantidad el carbono.

Como se aprecia la densidad de carbono dista mucho de ser homogénea en toda la extensión de este complejo espacio. Con la franja sur-sureste con los valores más bajos, así como la periferia al norte y al noroeste. Esto responde a factores naturales como la presencia de diferentes tipos de coberturas vegetales asociadas con la diversidad de suelos, la pendiente, altitud y condiciones climáticas, entre otros. En ese sentido, los ecosistemas de la Amazonía biogeográfica guardan relación con tres grandes áreas: la Amazonía Guayanesa, al norte, con suelos lavados y, por tanto, pobres en nutrientes; la Amazonía Andina (al oeste, en la vertiente oriental de los Andes), rica en nutrientes, y la Amazonía de tierras bajas, que corresponde a las planicies asociadas a tierras del Cuaternario y con procesos de inundación importantes. Todas diferentes, diversas y profundamente interrelacionadas para lograr el mantenimiento de ese complejo sistema. Sin embargo, la diversidad de carbono observada también puede asociarse con la presencia de áreas perturbadas o intervenidas, por acti-

vidades agrícolas, áreas urbanas, áreas mineras, entre otras, producto de las actividades humanas.

Desde una perspectiva general, la Amazonía biogeográfica ha sido considerada como un estabilizador del clima, por las grandes extensiones de su vegetación natural y, en particular, de sus bosques, lo que la convertía en un sumidero de carbono. No obstante, desde hace algunas décadas ha habido una preocupación creciente a consecuencia de la deforestación y la transformación de la cual ha sido objeto. Para 2014, Walker y col. señalaban la pérdida de carbono en algunas áreas. Gatti y col. (2021) indicaban que, en efecto, este sistema complejo estaba experimentando pérdidas netas de carbono en algunas localidades, lo que fue una de las alertas para hablar de los puntos de no retorno de la región. En la figura 6a2 se evidencia que hay pérdidas de carbono en áreas relativamente extensas para 2000-2023, con una tendencia bastante clara (figura 6a3).

La magnitud de la disminución en la cantidad de carbono aéreo representó más de 5.700 megatoneladas de carbono aéreo (MtC)⁴, para una reducción del 6,3% en el año 2023 con respecto al año 2000. Hay que resaltar que estos valores incluyen todas las coberturas vegetales presentes en la región, naturales y de origen humano. Otro elemento para destacar es que, a pesar de la tendencia a la pérdida de carbono, la velocidad de ésta no ha sido constante. Es así como a partir de 2004 hay una caída que se hace mínima para este análisis histórico entre 2007 y 2015, cuando sus valores están alrededor o por debajo del 0,2% anual. Ya para el 2016 se evidencia

un aumento de la rapidez en la pérdida de carbono que a partir de 2019 no ha debajo de superar los máximos previos de la serie temporal (Figura 6a4). Cuando ese análisis se realiza viso-espacialmente, se aprecia no sólo ese aumento en la rapidez de pérdida de carbono, sino la expansión geográfica de las áreas que se ven afectadas (Figura 6a5). En contraposición las áreas que experimentan ganancia en la cantidad de carbono aéreo almacenado son relativamente pocas (áreas en tonos de azul de la misma figura) y su magnitud baja al estar por debajo de los 50 MgC/ha o los 0,5 MtC/km².

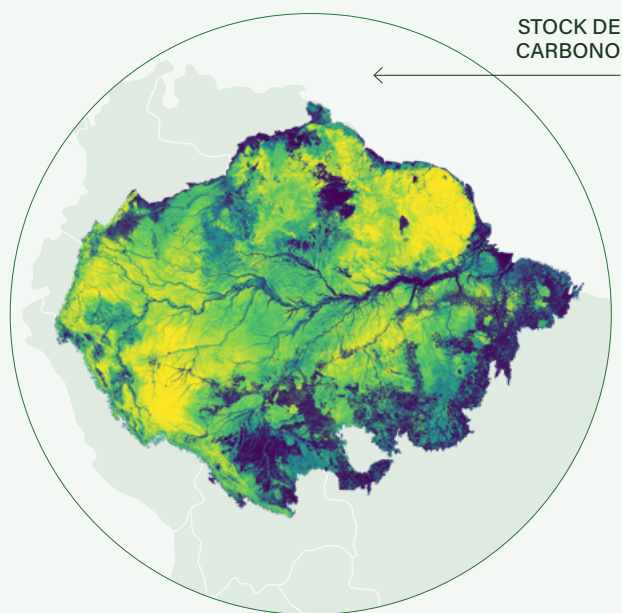


Figura 6.1.a: Distribución de la cantidad de carbono aéreo en las Amazonía biogeográfica al 2023.

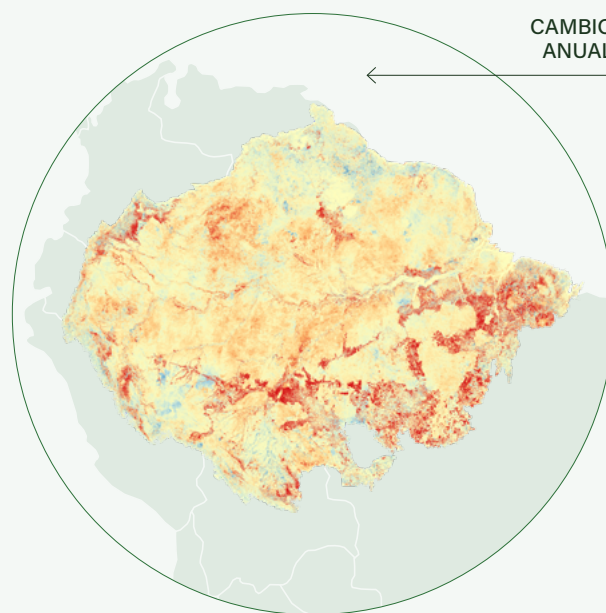
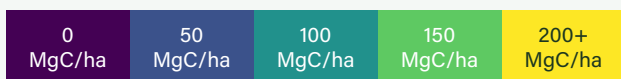
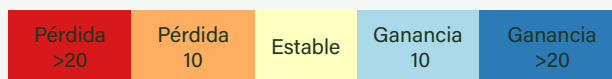


Figura 6.a.2: Pérdida de carbono aéreo en la Amazonía biogeográfica por año para el período 2000-2023.



4. La tonelada métrica (t) es análoga al megagramo, que es una unidad de medida de masa en el sistema métrico decimal (Actualmente de masa en el Sistema Internacional de Unidades (SI)) que equivale a 1000 kg. Sus símbolos MtC y MgC, respectivamente. Y la relación entre kilómetros cuadrados y hectáreas es: 1 km² = 100 ha

Mega toneladas de carbono (MtC)

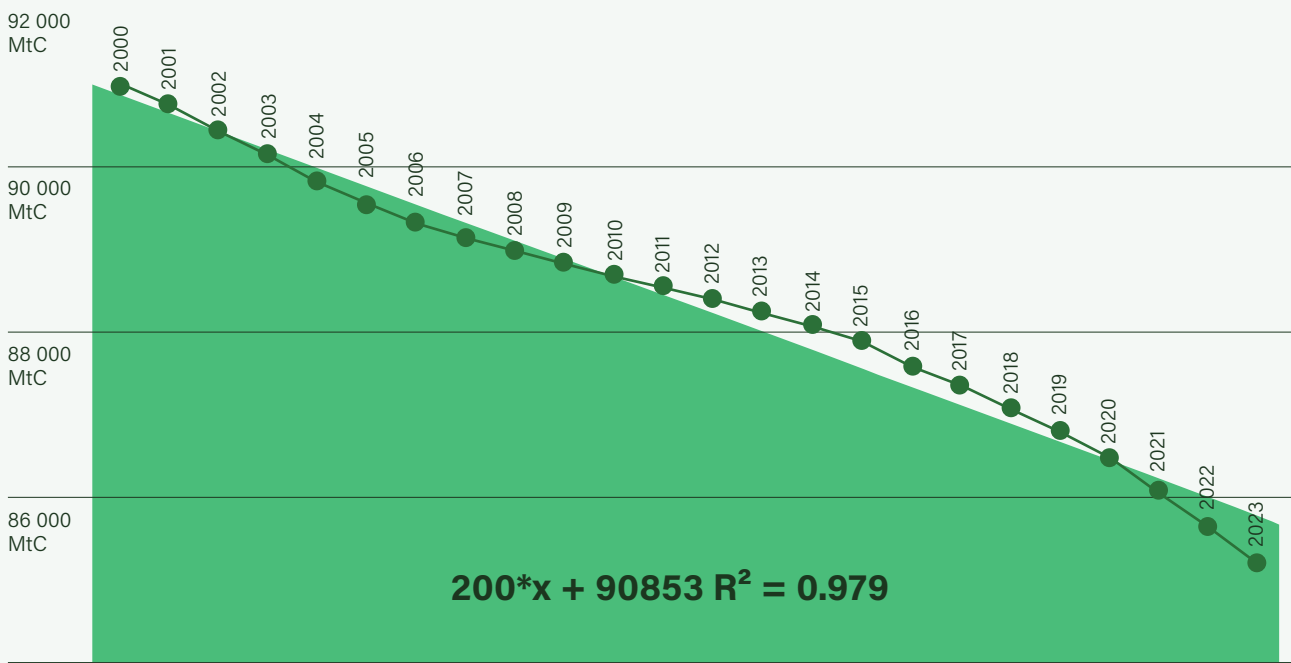


Figura 6.a.3: Dinámica del carbono aéreo total en la Amazonía biogeográfica

Pérdida de carbono (%)

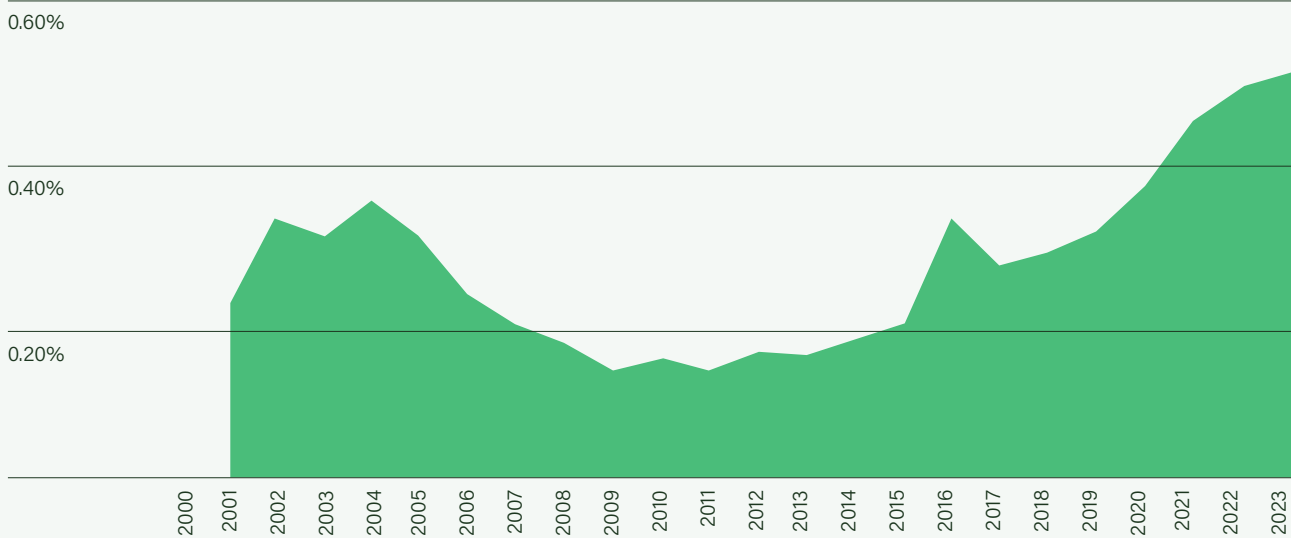


Figura 6.a.4: Pérdida anual de carbono en la Amazonía biogeográfica

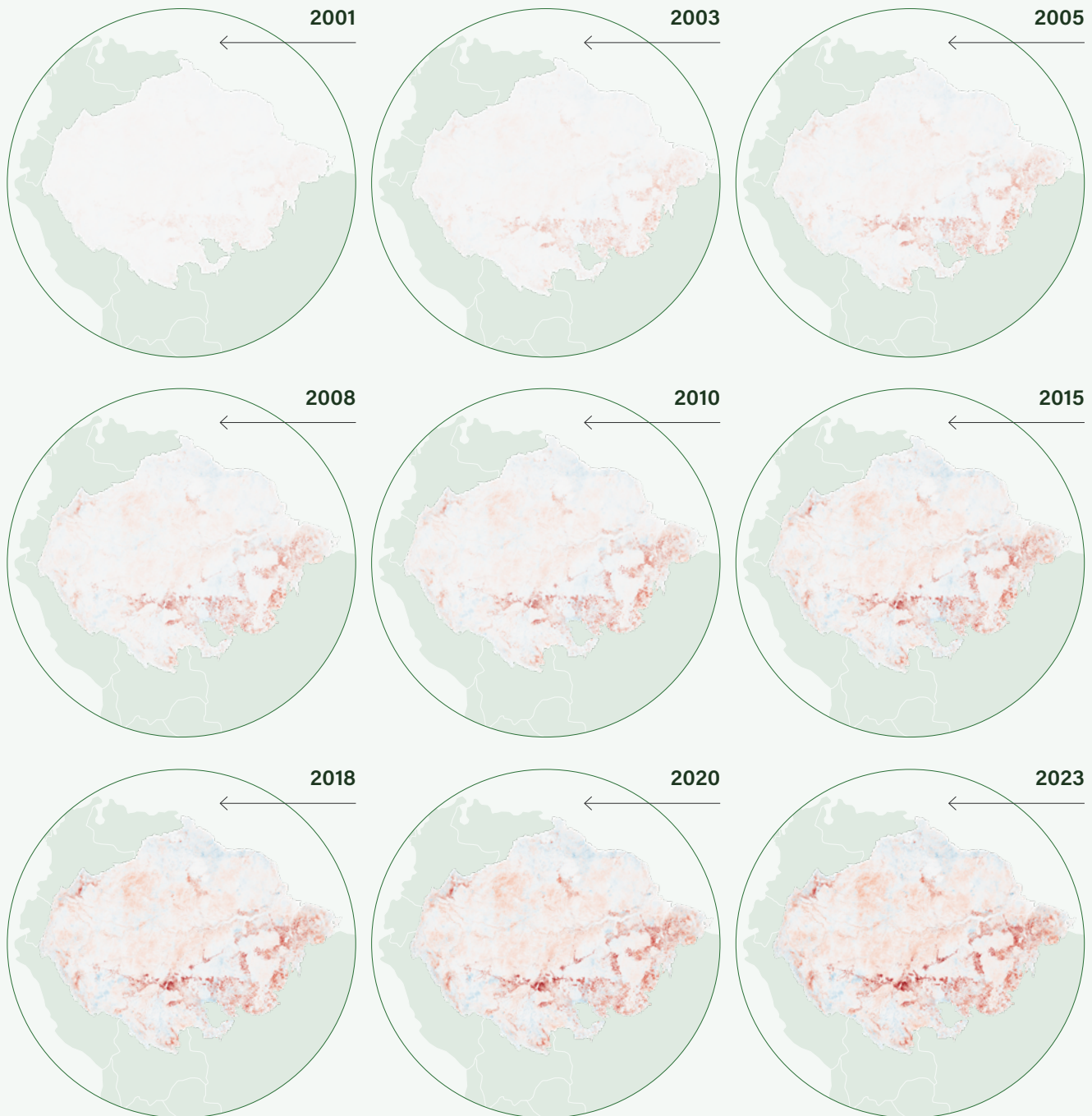
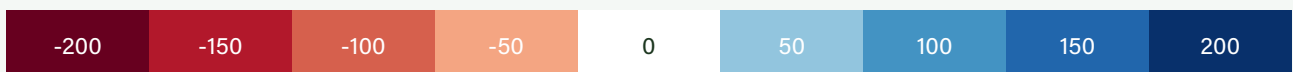


Figura 6.a.5: Ganancias y pérdidas acumuladas en la cantidad de carbono aéreo (MgC/ha) en la Amazonía biogeográfica. Se muestran algunos años del período 2000-2023.



6.1.1.

Dinámica en el carbono aéreo de formaciones boscosas

Específicamente hablando de vegetación natural, los bosques amazónicos se han considerado un sumidero de carbono y, desde hace varias décadas, son motivo de preocupación por la diversidad e intensidad de presiones humanas a las que han estado sometidos.

En ese sentido, los análisis indican que la cobertura boscosa muestra una clara tendencia a la pérdida de carbono aéreo para el período 2000-2023 (figura 6a6). Además, esa pérdida es más aguda que cuando se consideran todas las coberturas en conjunto. En este caso, la pérdida estimada corresponde al 7,2% (más de 6.400 MtC o MgC) en estos 24 años.

Mega toneladas de carbono (MtC)

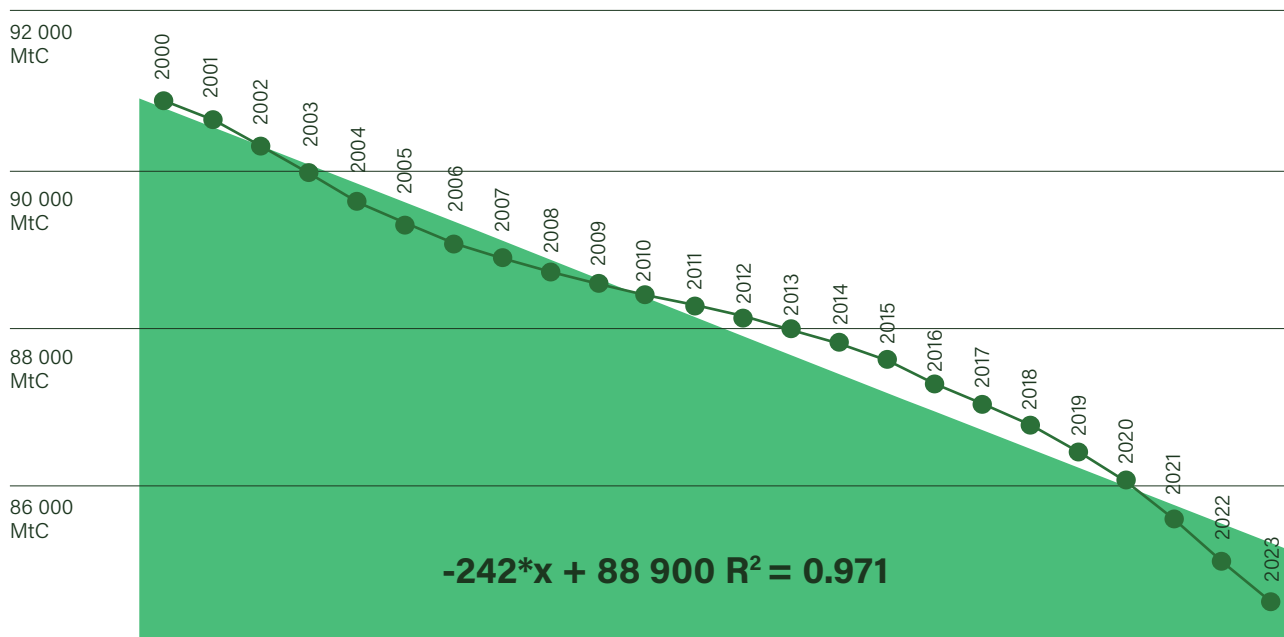


Figura 6.a.6: Variación del carbono aéreo en bosques de la Amazonía biogeográfica



Foto: Kamikiá Kisêdjê / ISA

En este caso, también se observan variaciones en la pérdida de carbono anual, con períodos donde la misma es relativamente baja y otros de mayor magnitud (figura 6a7). En este caso, ya para el 2005 se observa un descenso en el ritmo de reducción en la cantidad de carbono almacenado, aunque los mínimos de la serie tuvieron lugar entre 2007 y 2015. Luego se da un aumento que todos los años, a partir de 2020, bate los récords del período 2000-2023, en una tendencia que se asemeja a la del carbono del total de las coberturas de la región, pero que más pronunciada.

La caída en la cantidad de carbono aéreo en los bosques está estrechamente relacionada con la pérdida de éstos (figura 6a8), lo que puede explicar por qué la pérdida de carbono cuando se analiza sólo bosques es mayor que cuando se consideran el conjunto de todos tipos de coberturas, ya que posiblemente algunas de origen humano (en particular diferentes tipos de cultivos y plantaciones) están compensando, para la región, la pérdida que se observa en el carbono aéreo en bosques.

Sin embargo, la disminución en el carbono aéreo, como ya se dijo fue de 7,2%, mientras la de la superficie boscosa alcanzó el 6,0% (aproximadamente 356.000 km²). Es decir, se perdió, proporcionalmente, más carbono que área de bosque. Esto es consistente con la variación en la densidad de carbono aéreo entre 2000 y 2023, la cual tuvo una reducción de 1,3%. Es decir, el bosque que se mantiene acumula menos carbono aéreo en 2023 que el bosque existente en el año 2000. Esto puede relacionarse con procesos de degradación de bosque derivados de la afectación por fuego, la extracción selectiva de madera, la generación de gaps, mayor frecuencia de valores extremos de temperatura o precipitación (sequía), entre otros, que alteran los procesos de mantenimiento o producción de biomasa por parte de los elementos que componen estos bosques amazónicos, como ha sido referido por diversos autores (Berenguer y col. 2021, Gampe y col. 2021, Silva y col. 2022, Lapola y col. 2023).

Pérdida de carbono (%)

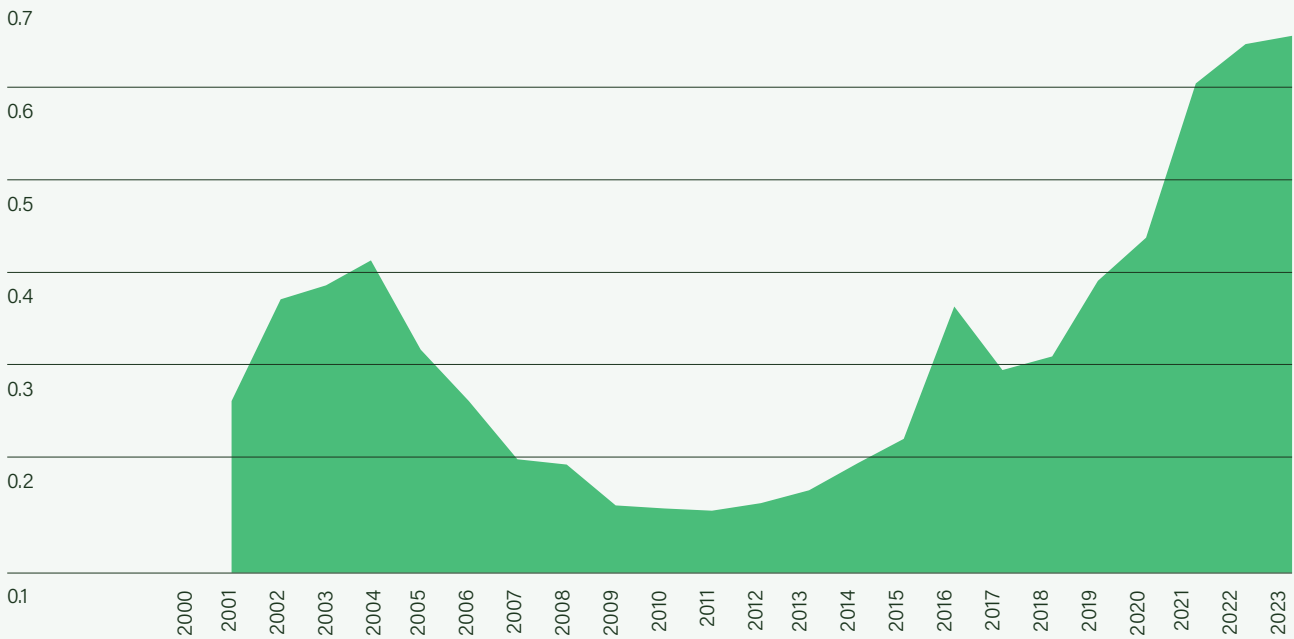


Figura 6.a.7: Dinámica de la pérdida de carbono en la cobertura boscosa de la Amazonía biogeográfica.

Carbono aéreo (MtC)

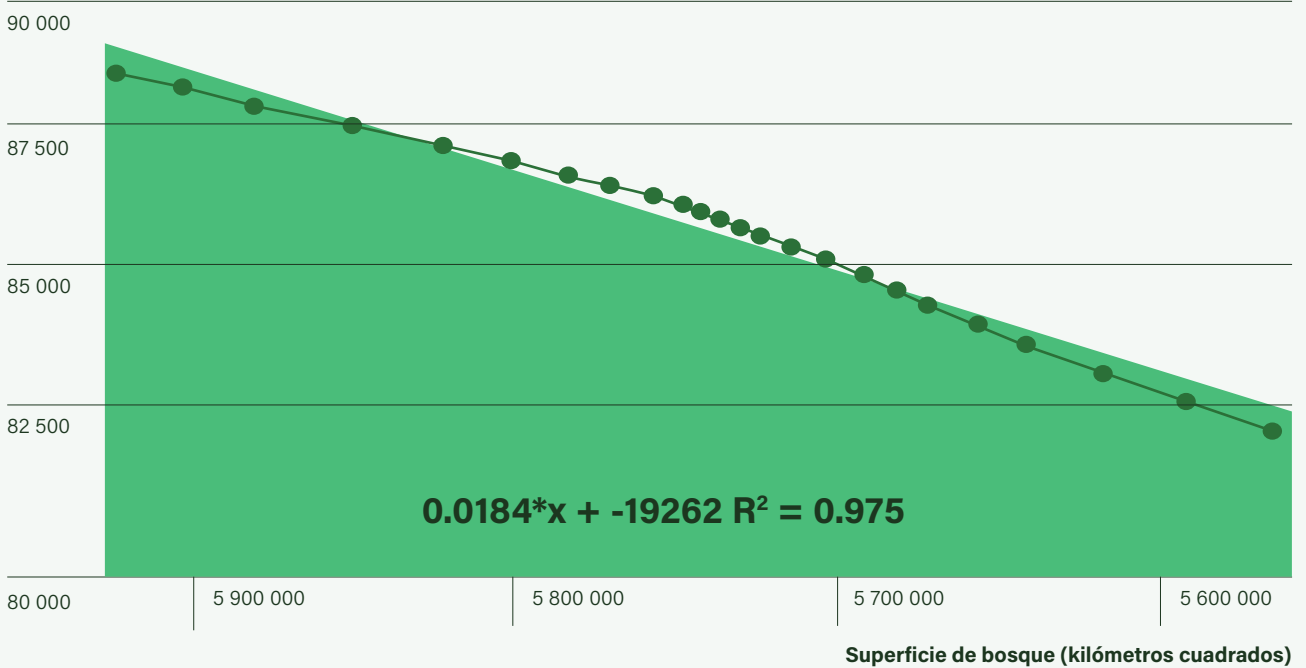


Figura 6.a.8: Relación entre la pérdida de carbono aéreo en bosques y su superficie en la Amazonía biogeográfica.

6.1.2.

Dinámica en el carbono aéreo de formaciones boscosas

Desde el punto de vista de la degradación de los bosques amazónicos y de su potencial pérdida de capacidad para seguir funcionando como sumidero de carbono, el análisis de los bosques estables añade información. En este caso, se trata de una cobertura boscosa que se ha mantenido desde el año 2000, o antes, y que permanece hasta el año 2023 (figura 6a9). No se trata de bosques no perturbados, pero sí de unidades que mediante el análisis de satélite se aprecia durante todo el período como el mismo tipo de formación vegetal natural. Para el año 2000 representaban el 90% de los bosques detectados, mientras para 2023 alcanzan el 96%. Del total de la Amazonía biogeográfica, cubren el 76%.

Ahora bien, la cantidad de carbono aéreo en este conjunto de bosques también ha variado (figura 6a10), con una tendencia no lineal a disminuir en el tiempo y, en especial, luego del 2015. Cuando se analiza la pérdida anual (por porcentaje) se encuentra que salvo el primer año (2000-2001), cuando hay un ligero aumento del carbono aéreo (expresado en el gráfico como una pérdida negativa, es decir una ganancia) (figura 6a11), los años subsiguientes hay disminución en el carbono almacenado en estos bosques.

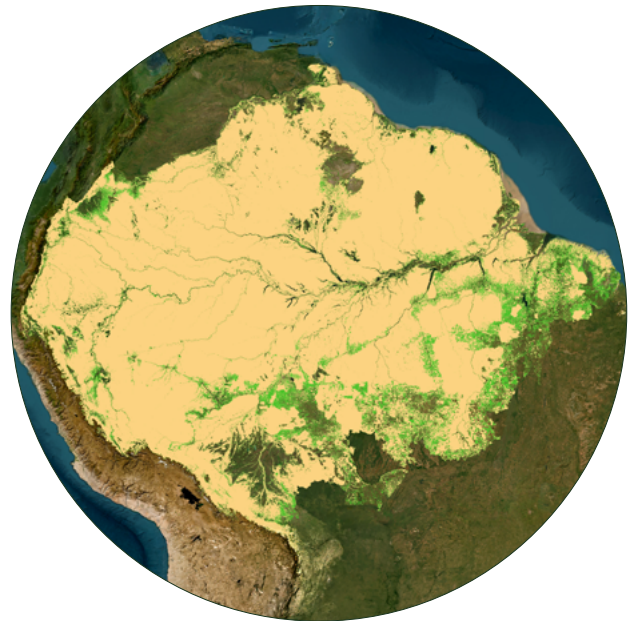


Figura 6.a.9: Cobertura boscosa en la Amazonía biogeográfica. En amarillo se presentan los bosques estables entre el año 2000 y 2023. En verde las áreas boscosas que han tenido otras dinámicas.

Esta pérdida, sin embargo, durante 14 años esa pérdida no superó el 0,1% del carbono del año previo, pero luego del 2015 ese porcentaje aumentó rápidamente, en especial desde 2019 (figura 6a11). La magnitud de esa reducción es menor que en el caso de cuando se considera toda la formación boscosa o el conjunto de coberturas. En total, para 2023, los bosques estables emitieron más de 2.100 MtC con respecto al existente en el año 2000.

Mega toneladas de Carbono (MtC) en bosques estables

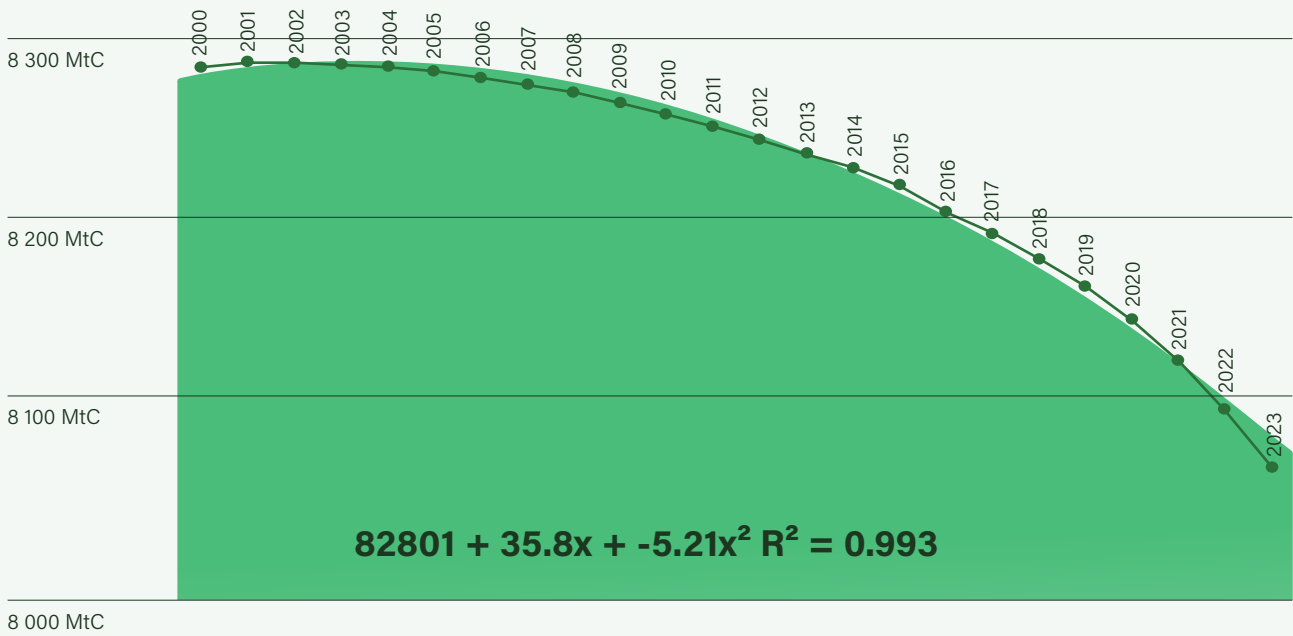


Figura 6.a.10: Carbono aéreo almacenado en bosques estables en la Amazonía biogeográfica en el período 2000-2023.

Pérdida de carbono en bosques estables (%)

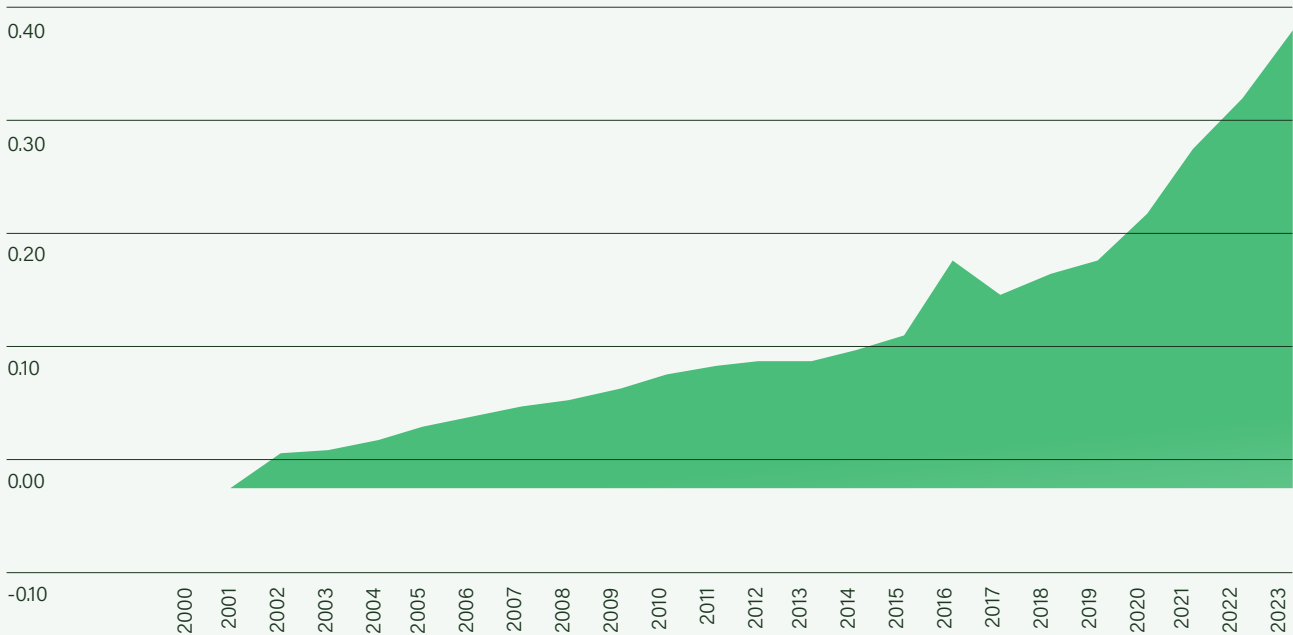


Figura 6.a.11: Pérdida de carbono en los bosques estables de la Amazonía biogeográfica.

A diferencia de las tendencias encontradas para el conjunto de las diferentes coberturas boscosas y para las formaciones boscosas analizadas como una unidad, la reducción en el carbono aéreo concentrado en los bosques estables sigue una tendencia que no lineal, con tasas de pérdida que se agudizan luego de 2019.

En la figura 6a12 se aprecia la dinámica de ganancias y pérdidas acumuladas, entre 2000 y 2023, en el carbono aéreo de todos los tipos de la coberturas en la Amazonía biogeográfica (izquierda) y en los bosques estables (derecha).

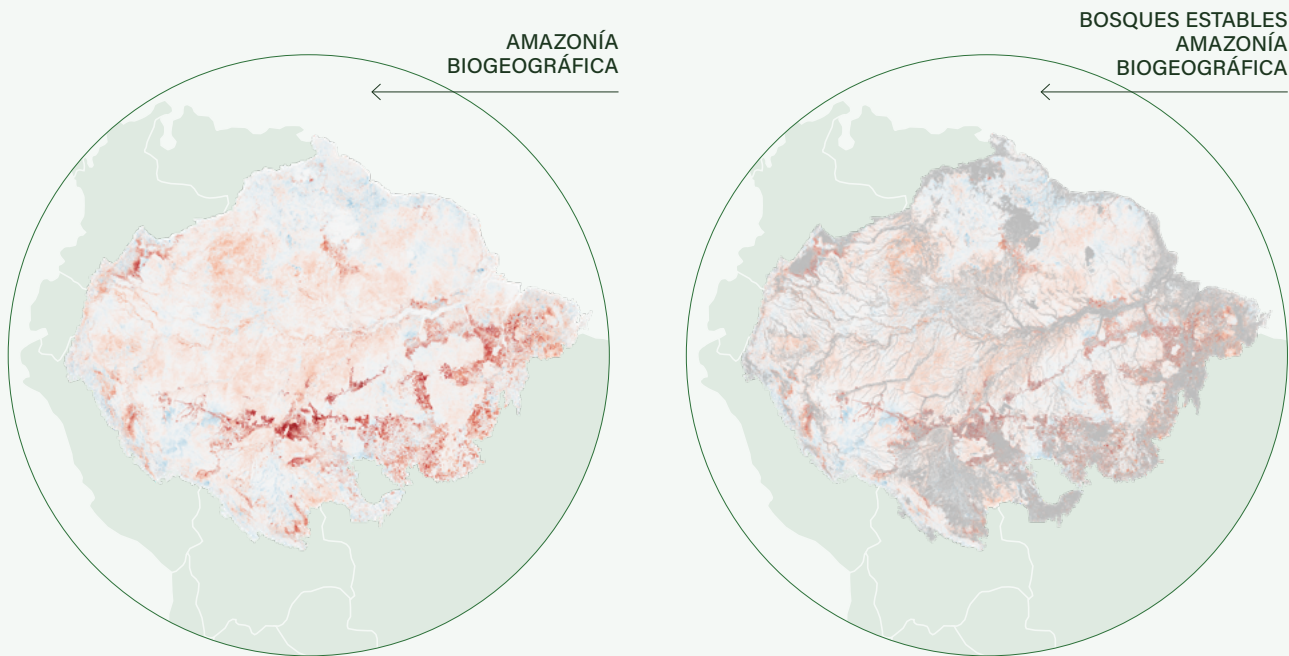
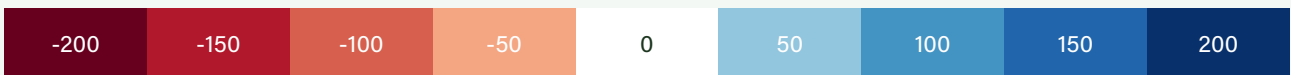


Figura 6.112: Ganancias y pérdidas acumuladas de carbono aéreo (MgC/ha) en la Amazonía biogeográfica para 2000-2023. Izquierda: Conjunto de coberturas del suelo. Derecha: Bosques estables



Previamente, se mostró una relación entre la reducción en la cantidad de carbono en las coberturas boscosas con la pérdida de bosque, pero en este caso, dado que la superficie boscosa se mantiene constante entre los años 2000 y 2023, la pérdida tiene que estar asociada a otros fenómenos, citados previamente, como la presencia de fuegos, el aumento de los valores extremos de temperatura o de precipitación que incide en procesos fisiológicos,

la intervención a pequeña escala del bosque, los efectos de borde, entre otros factores humanos. Este proceso de degradación de los ecosistemas boscosos indica que el mantenimiento su permanencia o estabilidad no es garantía de su óptima funcionalidad, ni para mantener la diversidad biológica que le es inherente ni los ciclos geoquímicos esenciales para procesos locales y regionales, como la estabilidad del clima.

6.2.

Carbono aéreo en las diferentes unidades de gestión territorial

Los más de siete millones de kilómetros que conforman la Amazonía biogeográfica tienen diferentes modalidades de gestión territorial, según se encuentren en territorios indígenas, áreas naturales protegidas, áreas donde ambas se superponen y otras tierras sujetas a modelos de uso que no siempre consideran como prioridad el uso sostenible de los ecosistemas naturales.

Espacialmente, se distribuyen como se muestra en la figura 6b1. Las mayores extensiones de áreas con una gobernanza o gestión más orientada a la protección socioambiental de los ecosistemas de la Amazonía biogeográfica se encuentran al norte y al oeste, con una especie de corredor al sur, donde destaca el Xingú, como territorio indígena de mayor tamaño. Las zonas de superposición entre los TI y las ANP responden a una gestión territorial mixta, que en algunos casos potencia su protección.

Con relación a la superficie, los TI y las ANP agrupan el 52,4% de la extensión de la Amazonía biogeográfica (Figura 6b2). El restante 47,6% se corresponde con superficies que cuentan con diferentes modelos de uso de la tierra, con diferentes criterios en términos de la sustentabilidad socioambiental.

La cantidad de carbono aéreo total almacenado en cada una de estas unidades se aprecia en la figura 6b3. Para el año 2000, los TI y ANP contabilizan el 59% del total de MtC en la región, mientras en 2023 el carbono aéreo en estas unidades territoriales ascendió a 61,1% del total. Esto ocurre a pesar de que en todos los tipos de unidades de la Amazonía biogeográfica hubo una disminución entre los años 2000 y 2023. Para toda la región la pérdida de carbono total, para 2023, fue de 6,3% con respecto al año 2000. Sin embargo, la misma no fue homogénea entre las diferentes unidades. Los TI y las ANP tuvieron una pérdida conjunta de 3%, mientras en Otras tierras la caída en el carbono almacenado fue de 11%. Los porcentajes específicos de pérdida de carbono aéreo total por tipo de unidad se muestran en la figura 6b3.

6.2.1.

Dinámica en el carbono aéreo de formaciones boscosas dentro de TI y ANP

La situación cuando nos referimos específicamente al carbono aéreo almacenado en las formaciones boscosas es ligeramente diferente. En este caso el papel de las ANP/TI es aún más importante. Para el año 2000, el carbono en bosques alcanzaba el 59,6% del total de la Amazonía biogeográfica, pero para 2023 esa proporción sube a 62,1%. Esto guarda relación con que las ANP/TI, proporcionalmente, albergan más bosques estables, como veremos más adelante.

Con respecto a las pérdidas, la tendencia es la misma que para el carbono total, con TI/ANP minimizando las pérdidas y Otras tierras con la mayor responsabilidad en cuanto a la liberación de carbono, pero la magnitud de las pérdidas en todos los casos se hace proporcionalmente mayor (Figura 6b4). En conjunto, para 2023, ANP/TI han perdido 3,4% de su carbono forestal, mientras Otras tierras han liberado 12,9%.



Figura 6.b.1: Modelos de gestión territorial presentes en la Amazonía biogeográfica.



Figura 6.b.2: Distribución en unidades territoriales de la Amazonía biogeográfica. TI* y ANP* no consideran la extensión territorial superpuesta.

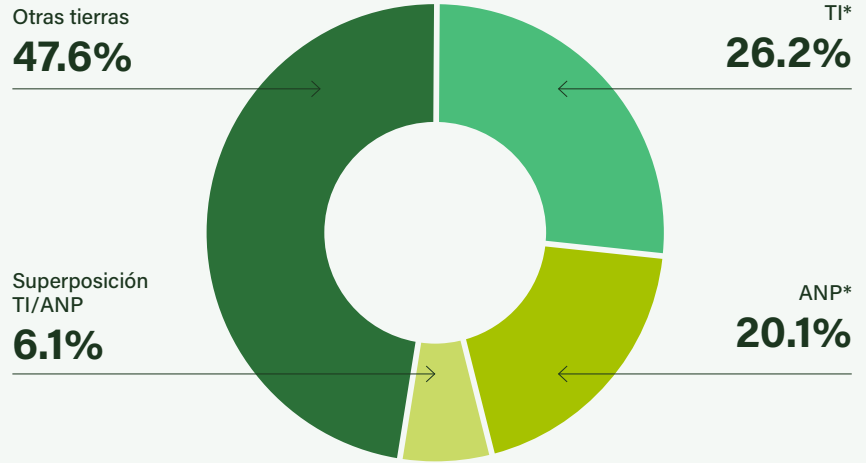


Figura 6.b.3: Carbono aéreo almacenado en las distintas unidades de gestión territorial de la Amazonía biogeográfica. TI* y ANP*: extensión sin considerar superposición.



Carbono aéreo almacenado (MtC)

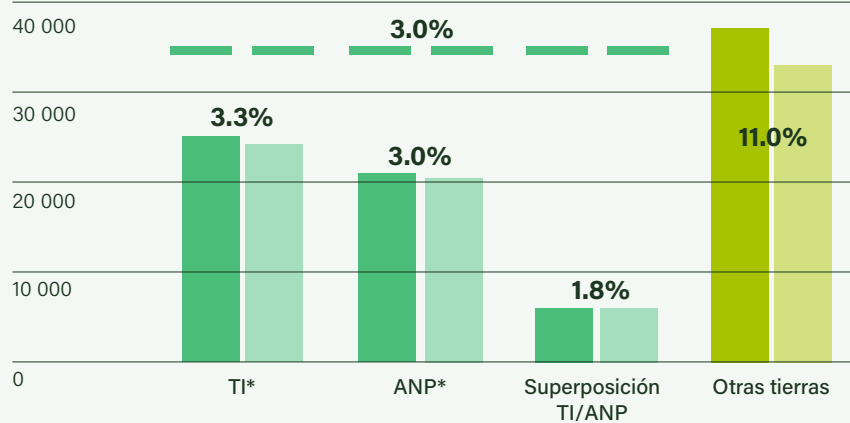
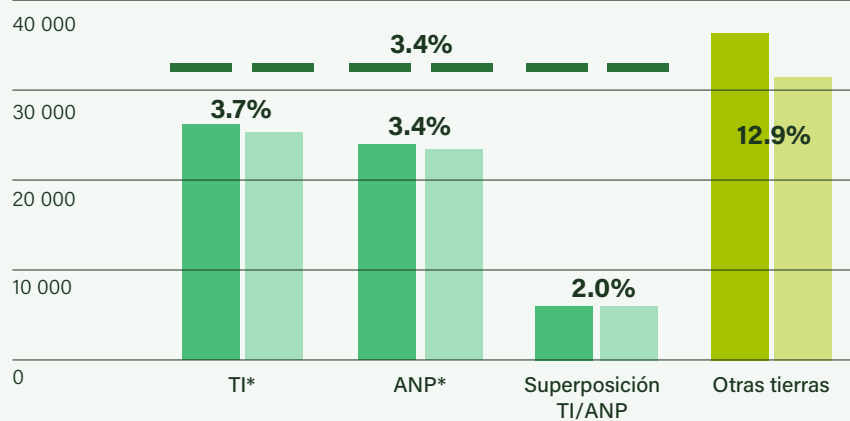


Figura 6.b.4: Carbono aéreo en bosques almacenado en las distintas unidades de gestión territorial de la Amazonía biogeográfica. TI* y ANP*: extensión sin considerar superposición.



Carbono aéreo boscoso (MtC)



6.2.2.

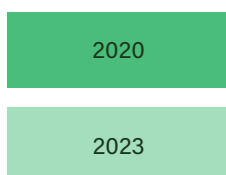
Dinámica en el carbono aéreo en bosques estables dentro de TI y ANP

En el caso de los bosques estables, al 2023, se encuentran presentes en el 90% de la extensión de ANP/TI, mientras cubren el 62% de la superficie de Otras tierras. Es decir, teniendo en cuenta las presiones y amenazas a la que están expuestos, en esta última unidad se requiere un esfuerzo mayor para lograr su permanencia en el tiempo y evitar esa pérdida de carbono. Efectivamente, en todas las unidades la pérdida de carbono en los bosques estables es menor que en la formación boscosa como un todo y cuando se consideran todas las coberturas, pero aún existe (Figura 6b5). En este caso, ANP/TI tie-

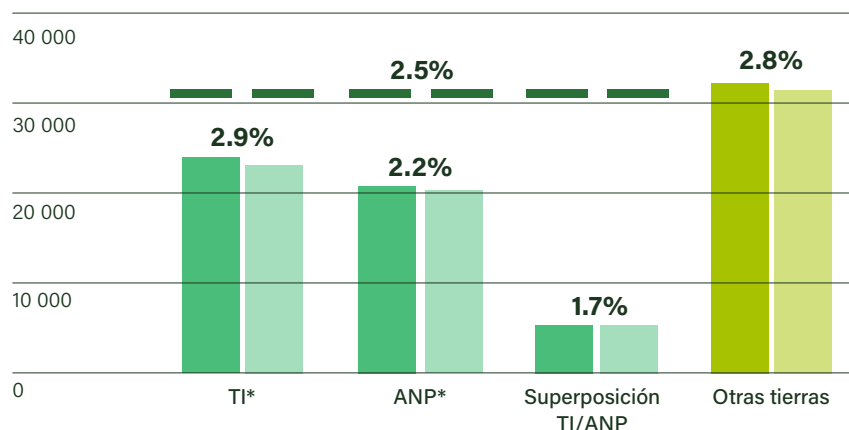
nen una pérdida conjunta de 2,5% del carbono almacenado, mientras Otras tierras alcanzan el 2,8%. La cantidad absoluta de carbono perdido en bosques estables en Otras tierras supera las emisiones de las ANP/TI.

Si se considera la densidad de carbono por superficie, las ANP/TI presentan valores más altos de carbono por unidad de área que Otras tierras (Figura 6b6). Sin embargo, en todos los casos hay una tendencia a la reducción de carbono, la cual se hace más evidente a partir de 2015, y se acentúa de forma marcada luego de 2019.

Figura 6.b.5: Carbono aéreo en bosques estables almacenado en las distintas unidades de gestión territorial de la Amazonía biogeográfica. TI* y ANP*: extensión sin considerar superposición.



Carbono aéreo boscoso estables (MtC)



Desde el año 2009, la Red de Información Socioambiental Georreferenciada ha venido acumulando evidencias del papel de los TI y las ANP como salvaguardas de la Amazonía, con una perspectiva integral. Para 2014, presentan un primer grupo de datos de carbono donde se analiza cómo es la distribución del carbono aéreo almacenado en estas unidades territoriales y donde ellas no existen. RAISG (2014) y Walker y col. (2014) evidencian que TI y ANP juegan un papel clave como barreras ante procesos como la deforestación, la incidencia de fuegos y el desarrollo de múltiples actividades contrarias a la sostenibilidad socioambiental. En 2020 (RAISG 2020 y Walker y col. (2020)) lo ratifican, pero alertan sobre procesos de degradación que conllevan a la pérdida de carbono en bosques, incluso dentro de este tipo de figuras, lo cual activa alarmas. Gatti y col. (2021) encuentran que efectivamente, áreas boscosas presentan una pérdida neta de carbono. El presente trabajo evidencia que, efectivamente, los TI y las ANP tienen bosques mejor conservados que fuera de ellos y que la pérdida neta de carbono ocurre con menor rapidez y extensión dentro de sus límites, tanto para el conjunto de las coberturas de vegetación, como para las formaciones boscosas, como los bosques estables. La figura 6b7 muestra cómo la pérdida de carbono acumulado (2000-2023) es evidentemente menor en los bosques estables dentro de los TI y en las ANP.

Sin embargo, los procesos de degradación (pérdida de carbono sin que ocurra deforestación) se van haciendo cada vez más importantes. Elementos como los efectos de borde o contacto entre bosques y áreas transformadas, la incidencia de fuegos, unidos al aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación parecen explicar parte de lo que sucede. Vale decir que

la afectación por procesos climáticos tampoco es homogénea en la Amazonía biogeográfica (como veremos en la siguiente sección), ya que sus características físico naturales y ubicación modifican su susceptibilidad ante ese proceso, el cual se ve potenciado por la cercanía a coberturas de uso.

Además, en algunos casos (áreas naturales protegidas con uso directo, territorios indígenas sin reconocimiento oficial o la misma relajación de las políticas de los estados hacia estas unidades), las presiones comienzan a invadir o acercarse en demasía a estas áreas, lo que va en contra de mantener el funcionamiento del complejo ecosistémico que representa la Amazonía y su biodiversidad. Otro elemento es el cambio en políticas públicas que, en diversas regiones de Amazonía biogeográfica han intensificaron la intervención de los bosques.

Densidad de carbono en bosques estables (MtC/Km²)

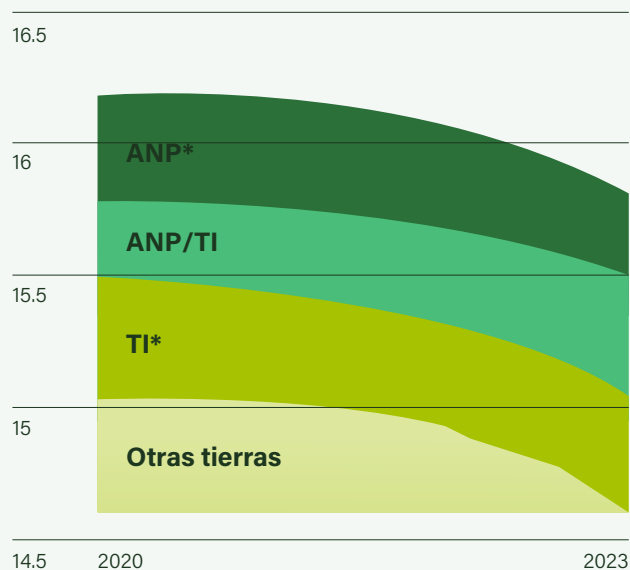


Figura 6.b.6: Caída en la densidad de carbono en los bosques estables (2000-2023) en las distintas unidades de gestión territorial de la Amazonía biogeográfica. TI* y ANP*: extensión sin considerar superposición.



Foto: André Villas-Bôas / ISA

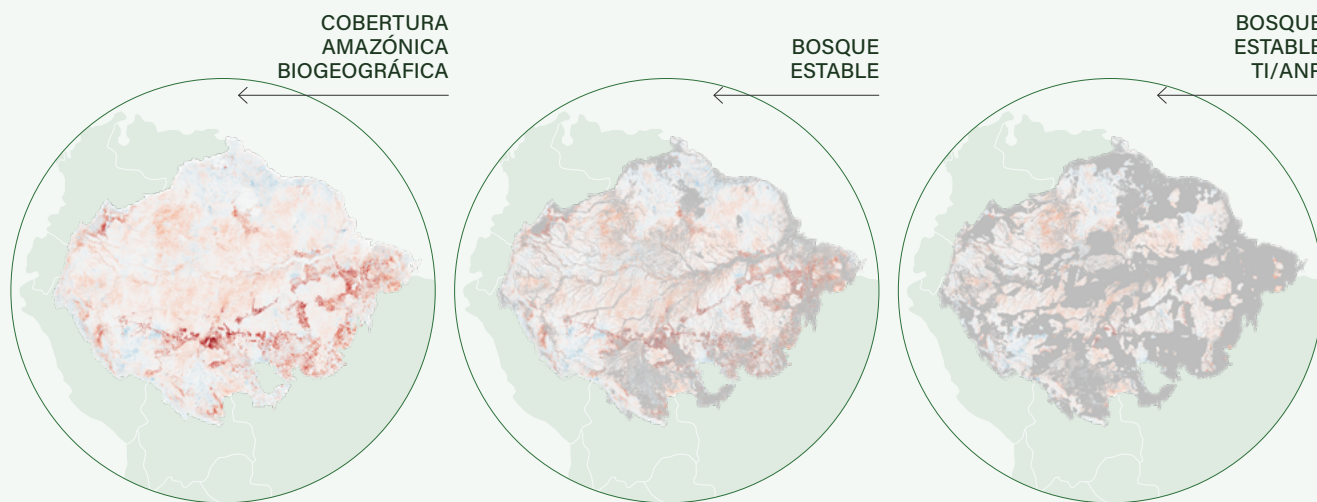
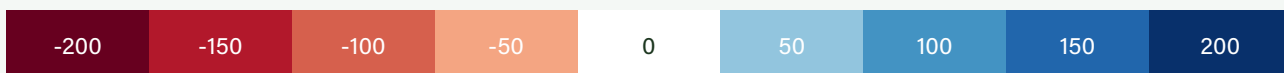


Figura 6.b.7: Ganancias y pérdidas acumuladas (2000-2003) de carbono aéreo (MgC/ha) en la Amazonía biogeográfica considerando a la izquierda: todas las coberturas, centro: bosques estables y derecha: bosques estables en TI y ANP. El color gris es área sin bosques (centro) o sin bosques estables (derecha).



6.3.

Dinámica del carbono aéreo en bosques y la agudización de eventos climáticos (anomalías de temperatura) en la Amazonía biogeográfica.

Para el año 2005 la situación comienza a cambiar. En 2008 se invierte, con los extremos fríos al norte y al sur los cálidos. A partir de 2010 predominan las anomalías cálidas, con una expansión generalizada en toda la región. Este patrón se intensifica en 2015, 2020 y 2023, hay un calentamiento sostenido y de gran escala.

La Figura 6c1 muestra mapas anuales de anomalías de temperatura superficial (LST) (diferencia entre la temperatura promedio anual de superficie y el promedio del periodo 2000–2023) en la Amazonía biogeográfica. Las áreas en tonos rojos representan anomalías térmicas positivas (más cálidas que el promedio), mientras que los tonos azules indican anomalías negativas (más frías que el promedio). Al principio del período las anomalías cálidas se encontraban al norte de la región, mientras las frías se situaban hacia el sur. Para el año 2005 la situación comienza a cam-

biar. En 2008 se invierte, con los extremos fríos al norte y al sur los cálidos. A partir de 2010 predominan las anomalías cálidas, con una expansión generalizada en toda la región. Este patrón se intensifica en 2015, 2020 y 2023, hay un calentamiento sostenido y de gran escala. La comparación visual sugiere una tendencia a más áreas con anomalías térmicas cálidas y más áreas con magnitudes extremas de éstas. El régimen térmico se hace cada vez más cálido y extremo en la región. La mayor amplitud de estas anomalías está espacialmente asociada al cinturón de transformación al sur

y sureste de la Amazonía biogeográfica. Incluso, hay unas áreas de TI en bosques estables, donde también se aprecia mayores degradación o pérdida de carbono aéreo (Figura 6b6).

Complementariamente, en la figura 6c2 se presenta la temperatura máxima anual (en °C) para la región entre 2000 y 2023. Si bien la temperatura de superficie puede llegar a 80 °C, la visualización destacó temperaturas entre el 20 y 50 °C, por ser las más representativas para la Amazonía biogeográfica. En este caso, los azules representan temperaturas máximas más bajas (~20–30 °C), mientras que el rojo indica temperaturas máximas más altas (~40–50 °C).

A lo largo de los años, se observan variaciones, especialmente durante eventos climáticos asociados al fenómeno ENSO (El Niño y La Niña). Durante años con El Niño (tal como 2003, 2010, 2015 y 2020), los tonos rojos son más intensos y están más extendidos, lo que refleja condiciones más cálidas y secas. En contraste, durante eventos La Niña (2018 y 2023) las temperaturas tienden a ser más moderadas. Esto sugiere una influencia importante del ENSO sobre el régimen térmico de la región. Por otro lado, a pesar de los tonos azules (figura 6c2) los valores promedio de la temperatura por localidades están aumentando, lo que incrementa la susceptibilidad hacia la disminución en la capacidad de almacenar carbono.



Como ya se ha mencionado, a partir de 2010, y especialmente en años como 2015, 2020 y 2023, se intensifican las anomalías negativas, lo que refleja una pérdida sostenida y progresiva de carbono en amplias regiones de la Amazonía biogeográfica. Estos descensos están asociados tanto a la proximidad con áreas transformadas como a eventos climáticos extremos, como El Niño. Incluso en años sin eventos cálidos marcados, como 2023 (La Niña), las anomalías negativas persisten, lo cual indica que el ecosistema enfrenta presiones estructurales vinculadas al cambio climático. Efectivamente, el carbono aéreo total de la Amazonía biogeográfica (Figuras 6a3, 6a4), el carbono aéreo en el total de bosques (Figuras 6a6, 6a7) y el carbono aéreo en los bosques estables (Figuras 6a10, 6a11) comienza a perderse de forma más acelerada a partir del año 2011. Esta pérdida se hace más aguda a partir de 2015.



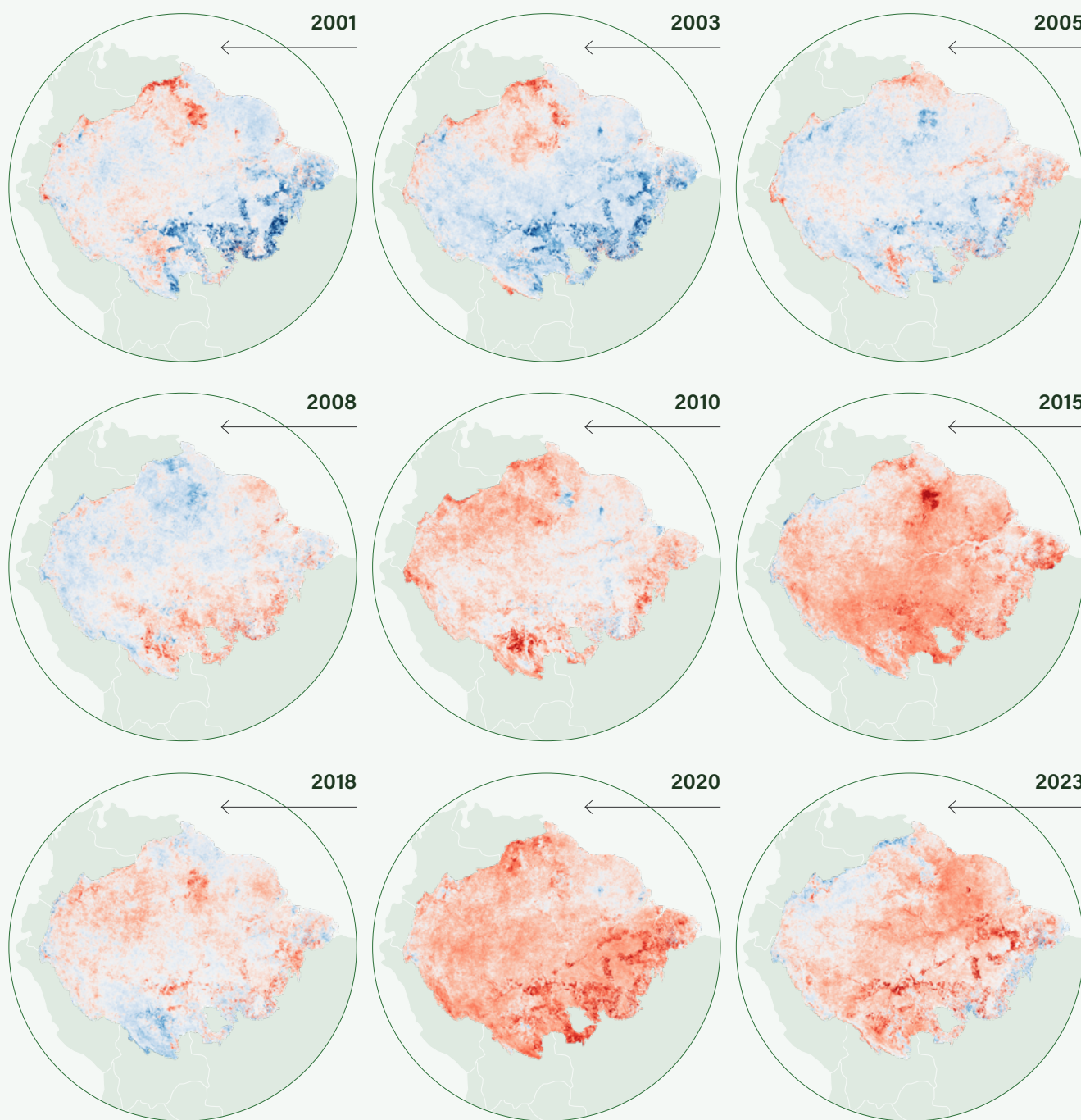


Figura 6.c.1: Distribución espacial de anomalías térmicas anuales (LST) en la Amazonía biogeográfica (2001–2023). Tonos rojos son áreas con temperaturas más altas que el promedio y tonos azules más frías que el promedio.



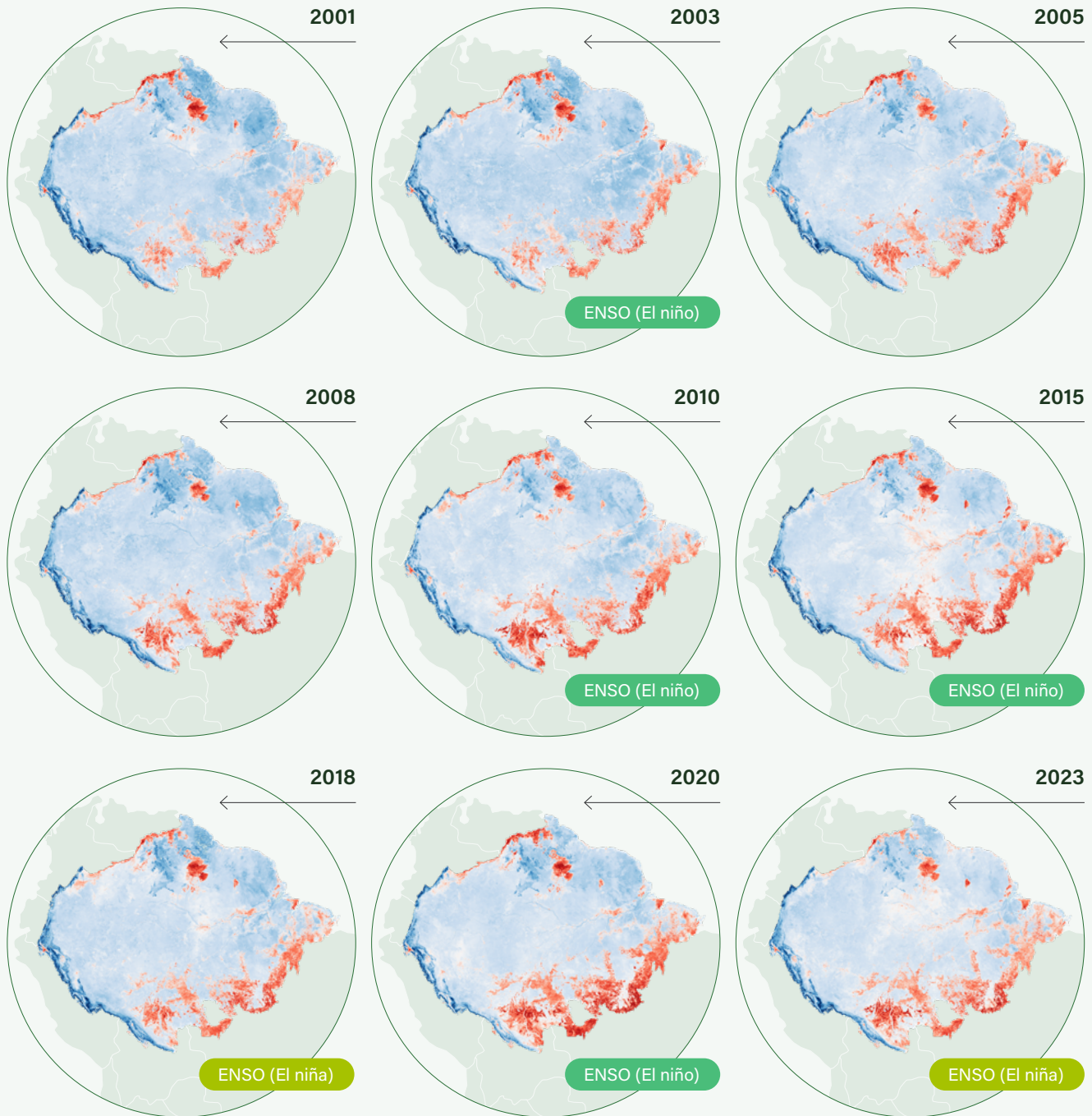


Figura 6.c.2: Distribución espacial de temperaturas máximas anuales (LST) en la Amazonía (2001–2023) a partir de datos MODIS.



De forma coherente con las tendencias generales, este análisis evidencia que los TI y las ANP (Figuras 6c3 y Figura 6c4) tuvieron una relativa estabilidad en las anomalías de carbono en 2000- 2010. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, se observa una disminución progresiva en el carbono, más evidente a partir del periodo 2011-2015, y más marcada entre 2016 y 2023. En los TI, esta pérdida se manifiesta de forma más gradual, incluso en los grupos de temperatura más extrema (Figura 6c3). En las ANP, en contraposición, la caída en carbono para 2016-2023 es más aguda, con valores de anomalía de carbono que alcanzan niveles negativos más extremos (hasta -35), lo que sugiere más degradación frente al aumento térmico (Figura 6c4).

Además, los valores extremos (outliers) ofrecen información importante sobre la variabilidad interna de cada categoría. En los TI (sin considerar superposición), estos valores tienden a concentrarse en los grupos con menor temperatura, indicando posibles áreas con alta retención de carbono, mientras que, en las ANP (sin considerar superposición), los outliers negativos aparecen con mayor frecuencia en los grupos de alta temperatura, lo cual podría reflejar zonas particularmente vulnerables dentro de estas áreas.

Por su parte, las zonas de superposición entre TI y PNA (Figura 6c5), con modelos de gestión en muchos casos combinados, presentan un patrón diferente: la relación entre anomalías térmicas y de carbono se mantiene prácticamente estable en todos los periodos. La línea de tendencia suavizada apenas se inclina, incluso en los años más recientes, y los valores de carbono no experimentan caídas importantes. Esto sugiere que la combinación de gobernanza comunitaria y protección institucional ofrece

un efecto complementario que refuerza la estabilidad ecológica. La superposición entre ambas figuras podría estar actuando como un mecanismo de doble resguardo que mitiga con mayor efectividad el impacto del cambio climático sobre el almacenamiento de carbono en la Amazonía.

Fuera de estas áreas de gestión (Figura 6c6) se evidencia una mayor sensibilidad a las anomalías térmicas, con una tendencia negativa es más clara, continua y profunda a lo largo del tiempo. Específicamente en el periodo 2016-2023, se observa una pendiente más marcada en la relación entre temperatura y carbono, lo que indica que, a mayor calentamiento, mayor es la pérdida de carbono en estas áreas.

En conjunto, estos resultados ponen en evidencia que dentro de los TI y ANP los ecosistemas tienen una mayor resiliencia, pero es necesario revisar la gestión del territorio frente a las presiones climáticas, ya que, si bien los TI y ANP tienen un papel fundamental en el mantenimiento de la región, cada uno de ellos es susceptible de diferente manera a los cambios en temperatura y sequía por su propia ubicación espacial y el tipo de ecosistemas que albergan. Recordemos que la Amazonía biogeográfica es heterogénea en diversidad y en clima.

Por el contrario, la ausencia de medidas de conservación o manejo respetuosas con la sostenibilidad socioambiental parece estar dejando a las áreas fuera de TI/ANP más expuestas a su reducción y a procesos de degradación, posiblemente con una sinergia entre presiones humanas (deforestación, incendios, uso del suelo) y condiciones térmicas extremas.



Foto: Daniel Martínez / IBC



Figura 6.c.3: Boxplots de anomalía de carbono con tendencia suavizada, analizados frente a anomalías de temperatura en periodos de tiempo distintos desde 2001 y 2023 y entornos de territorios indígenas.



Foto: Guaíra Maia / ISA



Figura 6.c.4: Boxplots de anomalía de carbono con tendencia suavizada, analizados frente a anomalías de temperatura en periodos de tiempo distintos desde 2001 y 2023 y entornos de PNA.



Foto: Daniel Chamba / Fundación EcoCiencia



Figura 6.c.5: Boxplots de anomalía de carbono con tendencia suavizada, analizados frente a anomalías de temperatura en periodos de tiempo distintos desde 2001 y 2023 y entornos de territorios indígenas con sobreposición de PNA.



Foto: Felipe Rodríguez TI Isana / Gaia Amazonas



Figura 6.c.6: Boxplots de anomalía de carbono con tendencia suavizada, analizados frente a anomalías de temperatura en periodos de tiempo distintos desde 2001 y 2023 y entornos de Otros territorios

7.

Dinámica de cambio en el corto plazo de los stocks de carbono en la Amazonía biogeográfica, posibles efectos del cambio climático.



Las proyecciones sobre cambios en el stock de carbono aéreo para la Amazonía biogeográfica al año 2030 indican pérdidas en todos los escenarios modelados, aunque con diferencias en la magnitud, sobre la base de los cambios en el uso del suelo. Los resultados de las simulaciones se aprecian en la figura 7.1. En términos de magnitud, con relación al año base 2023, donde el stock total estimado fue de 85.199 MtC, el escenario regulado predice, bajo condiciones de tasa histórica de cambio mínimas, la menor pérdida de carbono de los escenarios evaluados, para alcanzar un valor de 84.172 MtC (Figura 7.2). Le sigue el escenario de inacción, con 83.473 MtC, que asume tasas de transición fijas estimadas a partir del período 2016-2023. Los descensos previstos más pronunciados se encuentran en los escenarios de mayor presión: el escenario de regulación permisiva o tolerante, proyecta un total de 82.904 MtC, mientras que el escenario sin TI o ANP, que aplica las tasas más elevadas observadas en las áreas más intervenidas (Otras tierras), evidencia una reducción del stock hasta 82.257MtC, lo que sería la mayor pérdida proyectada. Estos resultados resumen la sensibilidad del sistema amazónico ante distintas trayectorias de cambio, ya sean positivas o negativas.



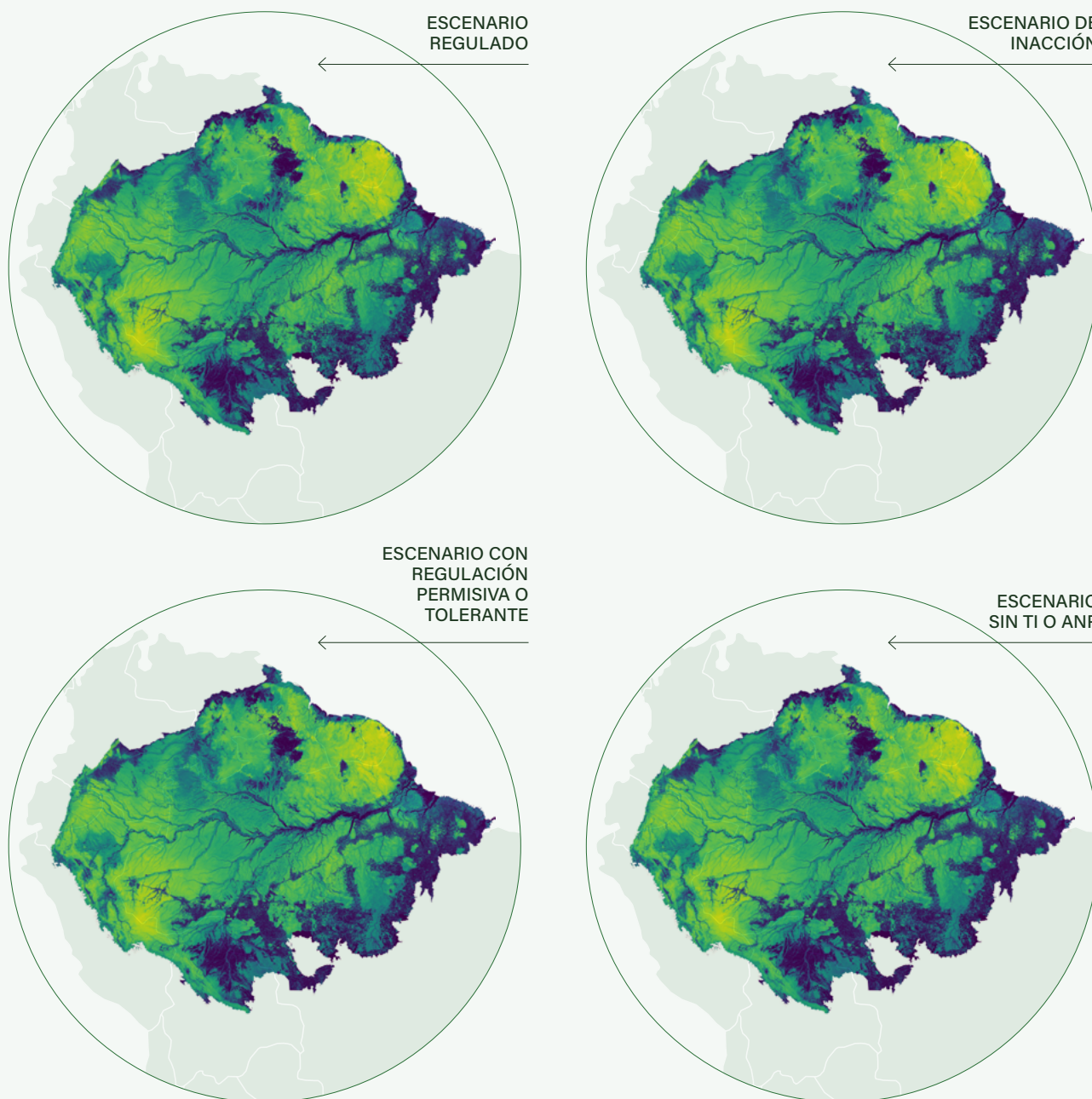
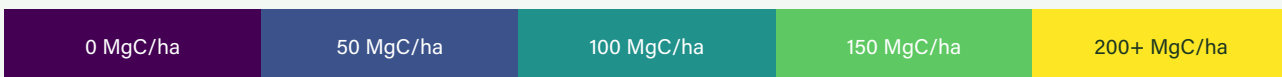


Figura 71: Proyecciones al 2023 del carbono aéreo total almacenado bajo cuatro escenarios posibles. Escenario regulado: Tasas de cambio son los mínimos históricos del período 1985-2023. Escenario de Inacción: Tasas de cambio son similares a las anuales estimadas en 2016-2023. Escenario con regulación permisiva o tolerante: Tasas de cambio son los máximos del período histórico 1985-2023. Escenarios sin TI o ANP: Tasas de cambio son tomadas de Otras áreas (fuera de ANP y TI).



Carbono al 2023 y escenarios hipotéticos al 2030



Figura 7.2. Carbono almacenado en la Amazonía biogeográfica para el año 2023 y bajo diferentes escenarios al año 2030

La modelación también consideró los cambios en las distintas unidades de gestión. Los resultados de los estimados en el carbono aéreo para 2030 se presentan en la Tabla 7.1. Como se aprecia, en todos los casos se proyecta una disminución en el carbono aéreo, la cual es más notoria en Otras tierras, con

una pérdida mínima proyectada del 1,5% con respecto a 2023, bajo el escenario regulado y un máximo de 6,5% bajo el escenario sin TI o ANP. Esto sucede aún cuando la superficie de Otras tierras es menor que en TI y ANP para la Amazonía biogeográfica.

Unidades de análisis	Situación observada		Escenarios hipotéticos al 2030			
	2000	2023	Regulado	De inacción	Regulación permisiva	Sin TI o ANP
Territorios indígenas	26.258	25.384	25.182	25.106	25.157	25.037
Áreas Naturales Protegidas (ANP)	21.135	20.490	20.232	20.202	20.103	20.096
Superposición TI/ANP	6.274	6.161	6.106	6.116	6.111	6.112
Otras tierras (fuera TI y ANP)	37.256	33.163	32.651	32.050	31.533	31.013

Tabla 7.1: Proyecciones del stock de carbono (MtC) por unidad territorial en la Amazonía biogeográfica

Con un poco más de detalle tenemos:

E.01

Regulado

Se consideran las menores transiciones de bosque a usos agropecuarios, urbanos y mineros, a partir del período histórico 1985-2023.

E.02

Inacción

Asumiendo tasas de conversión sin variación en el tiempo, y estimadas a partir de los datos de 2016-2023, que, en general, fue un período con altas tasa de cambio del período 2000-2023.

Bajo este escenario
la pérdida total de carbono
aéreo sería la menor:



Ámbito regional:

1,2%

TI+ANP:

1%

Otras tierras:

1,6%

La pérdida estimada al
2030 sería de:

1.027 Mtc

**Se proyecta una
disminución moderada**
del carbono en todas las
unidades:



Ámbito regional:

2%

TI+ANP:

1,2%

Otras tierras:

3.4%

La pérdida estimada al
2030 sería de:

1.725 Mtc

E.03

Regulación permisiva o tolerante

Esta proyección asume las tasas regionales más altas del período histórico (1985-2023). A pesar de eso, al ser una estimación global, los cambios esperados son menores que los que ocurren cuando sólo se miran las Otras tierras (fuera de TI y ANP).

E.04

Sin TI o ANP

Donde se asume que las transiciones serán tan altas como lo que ocurre en Otras tierras, según el período 2016-2030. Bajo este escenario la disminución de carbono es máxima en todas las categorías, por lo que sería el peor escenario, con pocos o ningún tipo de control sobre las actividades humanas y representaría una gran afectación de la biodiversidad amazónica y probablemente la peor situación para los pueblos indígenas y otras comunidades tradicionales.

La pérdida regional
equivale al:



Ámbito regional:

2,7%

TI+ANP:

1,3%

Otras tierras:

5,3%

La pérdida estimada
al 2030 sería de:

2.295 Mtc

La pérdida regional
equivale al:



Ámbito regional:

3,5%

TI+ANP:

1,5%

Otras tierras:

6,6%

La pérdida estimada
al 2030 sería de:

2.941 Mtc

El carbono aéreo almacenado en la Amazonía biogeográfica diferenciado por TI+ANP y Otras tierras, considerando el punto de partida, año 2023, y los escenarios modelados para el 2030 se aprecia en la figura 7.3. Allí se puede observar claramente la importancia de estas unidades de gestión que resguardan la sostenibilidad socioambiental para minimizar la emisión de carbono en la región. En el año 2023 y bajo los diferentes escenarios, los TI+ANP presentan una pérdida más contenida o reducida, que en ningún caso supera el 1,5% de su stock al año 2023.

Esta brecha refleja una mayor capacidad de las áreas, con una gobernanza especial frente a las presiones antrópicas, de mantener sus reservas de carbono. Por el contrario, con Otras tierras se evidencia una alta vulnerabilidad asociada a las presiones de origen humano.

No obstante, la tendencia a la pérdida en los TI+ANP indica, que aún sin considerar el efecto climático, estas unidades requieren medidas adicionales que aseguren su integridad y minimice su exposición a las múltiples presiones y amenazas de las que son objeto, tanto en su interior como en los bordes. Como ya evaluamos para el período 2016-2023, las TI+ANP son cruciales para el mantenimiento del carbono aéreo de las formaciones boscosas, de manera que las acciones son urgentes.

Momento temporal

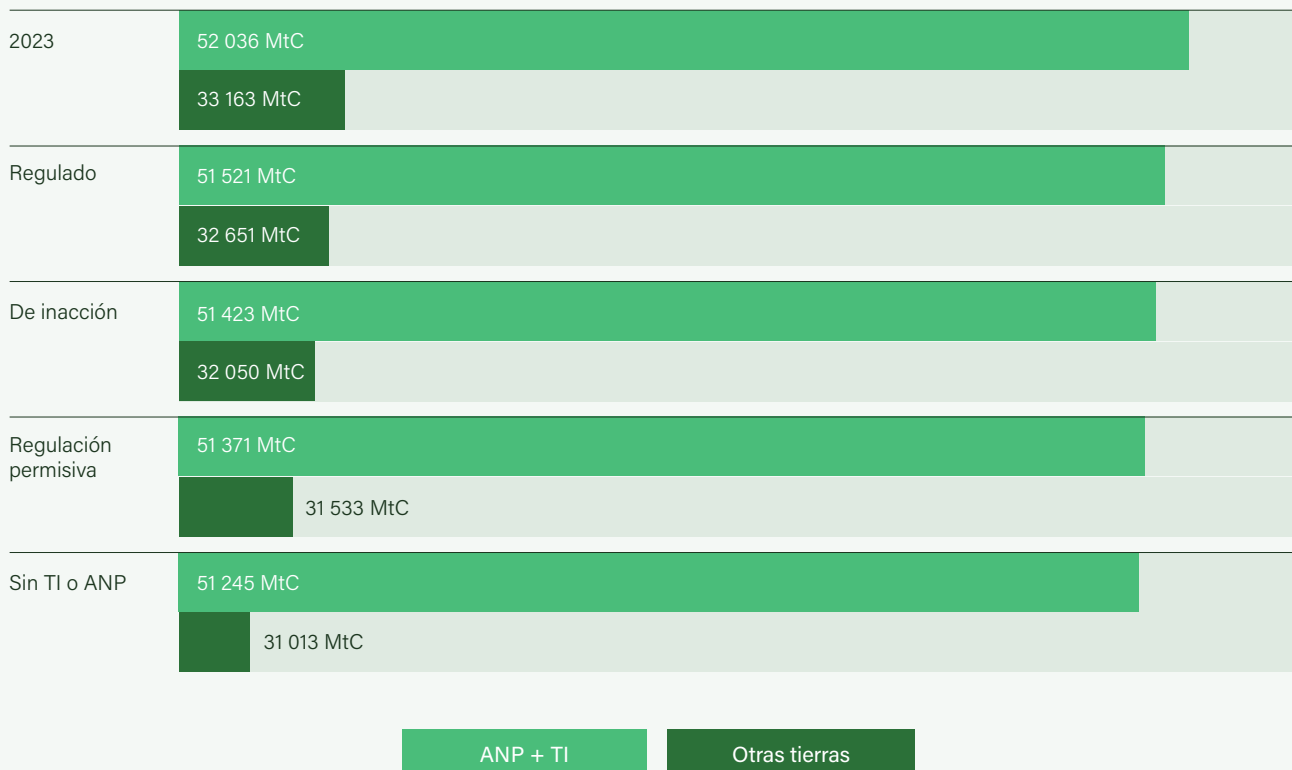


Figura 7.3. Stock de carbono en Unidades de Conservación y Otras tierras en diferentes escenarios

Foto: Juan Gabriel Soler / Gaia Amazonas





REFERENCIAS CONSULTADAS

- Berenguer, E., Armenteras, D., Lees, A., Smith, C., Fearnside, P., Nascimento, N., G, A., Almeida, C., Aragão, L., Barlow, J., Bilbao, B., Brando, P., Bynoe, P., Finer, M., Flo-Res, B., Jenkins, C., Silva-Junior, C., Souza Jr, C., & Garcia-Villacorta, R. (2021). Chapter 19: Drivers and ecological impacts of deforestation and forest degradation. <https://doi.org/10.55161/AIZJ1133>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Gampe, D., Zscheischler, J., Reichstein, M., O'Sullivan, M., Smith, W. K., Sitch, S., & Buermann, W. (2021). Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades. *Nature Climate Change*, 11(9), 772–779. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01112-8>
- Gatti, L., Gloor, M., Miller, J., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L., Basso, L., Martinewski, A., S. C. Correia, C., Borges, V., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O., & Lloyd, J. (2014). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506, 76–80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Global Forest Watch. (2023). Tree cover loss data v1.9 (2001–2022) [Dataset]. <https://data.globalforestwatch.org/>
- Kabuanga, J. M., Kankonda, O. M., Saqalli, M., Maestriperi, N., Bilintoh, T. M., Mweru, J.-P. M., Liama, A. B., Nishuli, R., & Mané, L. (2021). Historical Changes and Future Trajectories of Deforestation in the Ituri-Epulu-Aru Landscape (Democratic Republic of the Congo). *Land*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/land10101042>



- Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva-Junior, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., ... Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630), eabp8622. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>
- Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2018). Amazon Tipping Point. *Science Advances*, 4(2), eaat2340. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>
- Mapbiomas-RAISG. (2024). Mapbiomas amazonía, colección 6. <https://amazonia.mapbiomas.org/>
- Prina, B. Z. (2014) GMC - Gerador de Matriz de Confusão. Aplicativo desenvolvido com a linguagem de programação. Visual Basic, 2014b. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0031.pdf>
- Science Panel for the Amazon. (2021). Home. Amazon Assessment Report 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network. <https://www.sp-amazon.org/>
- Walker, W. S., Gorelik, S. R., Baccini, A., Aragon-Osejo, J. L., Josse, C., Meyer, C., Macedo, M. N., Augusto, C., Rios, S., Katan, T., de Souza, A. A., Cuellar, S., Llanos, A., Zager, I., Mirabal, G. D., Solvik, K. K., Farina, M. K., Moutinho, P., & Schwartzman, S. (2020). The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 3015–3025. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913321117>



REPORTE 2025

Dinámicas del carbono forestal aéreo en la
Amazonía: **tendencias y proyecciones al 2030**