



Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2023

Investigación

Análisis de flujos de emisiones y remociones de carbono por degradación de bosque permanentes en Costa Rica

Investigador:

Esteban Durán Monge
German Obando Vargas
Amram Aragón Ramírez
Guisella Quirós Ramírez

San José | 2023



333.75
AN532a

Análisis de flujos de emisiones y remociones de carbono por degradación de bosque permanentes en Costa Rica / Esteban Durán Monge...[et al.], -- Datos electrónicos (1 archivo : 1.850 kb). -- San José, C.R. : CONARE - PEN, 2023.

ISBN 978-9930-618-91-2
Formato PDF, 38 páginas.
Investigación para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2023

1. EMISIONES DE GASES. 2. COBERTURA FORESTAL. 3. COSTA RICA. I. Durán Monge, Esteban. II. Obando Vargas, German. III. Aragón Ramírez, Amram. IV. Quirós Ramírez, Guisella. V. Título.



Índice

Índice	2
Descargo de responsabilidad	3
Introducción.....	3
Hallazgos relevantes.....	3
Introducción.....	5
Abordaje metodológico.....	7
Fuentes de información	7
Métodos	8
Limitaciones del estudio	14
Incertidumbre	14
Revisión y validación de los mapas de terraPulse.....	17
Resultados	17
Mirada histórica de las emisiones y remociones por degradación en bosques permanentes	18
Patrones espaciales de los flujos.....	24
El balance del sector forestal y su posición con respecto a otros sectores	29
Impulsores de la degradación forestal: perspectivas desde la revisión de literatura y algunas hipótesis	32
Conclusiones y trabajo futuro.....	34
Bibliografía	37

Descargo de responsabilidad

Esta Investigación se realizó para el *Informe Estado de la Nación 2023*. El contenido de la ponencia es responsabilidad exclusiva de su autor, y las cifras pueden no coincidir con las consignadas en el *Informe Estado de la Nación 2023* en el capítulo respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.

Aplicación de formato: Suyen Miranda López.

Introducción

El presente documento contiene la ponencia: “Análisis de flujos de emisiones y remociones de carbono por degradación de bosques permanentes en Costa Rica”. La investigación fue desarrollada mediante una colaboración entre el Programa Estado de la Nación y la Secretaría Ejecutiva REDD+ Costa Rica. El equipo de investigación se encuentra conformado por Esteban Durán Monge, German Obando Vargas, Amram Aragón Ramírez y Guisella Quirós Ramírez. Además, contó con el apoyo técnico de Saurabh Channan de la empresa *terraPulse*. Se agradece al Banco Mundial por su papel como ente financiero para el desarrollo y acceso a los mapas de *terraPulse*.

Esta investigación servirá de insumo en la elaboración del capítulo Armonía con la Naturaleza del *Informe Estado de la Nación 2023* y pretende generar nuevos enfoques metodológicos de estimación para el nivel de referencia de emisiones forestales de Costa Rica. A continuación, se detallan las preguntas generales de investigación del estudio:

- ¿Cómo ha sido el comportamiento histórico y distribución espacial de las emisiones y remociones por procesos de degradación forestal y mejoras de bosques permanentes en el país durante los años 1986 y 2019?
- ¿Cuál es el impacto de estos procesos en el potencial forestal del país para la mitigación del cambio climático?

Hallazgos relevantes

- Las emisiones totales por degradación forestal durante el período comprendido entre los años 1986-2019 ascendieron a 132,1 millones de tCO₂-e. Durante ese lapso se registra un promedio anual de emisiones de 3,9 millones de tCO₂-e.
- Las remociones totales durante el período de estudio ascendieron a -52,8 millones de tCO₂-e, con un promedio anual de -1,6 millones de tCO₂-e. Esto representa solo un 40,0% de las emisiones.
- En lo que respecta a procesos en cambio de cobertura en bosques permanentes, el país ha tenido un balance neto promedio de 2,3 millones de tCO₂-e de emisiones, que asciende a 2,8 millones de tCO₂-e en el último año.
- Entre los años 1986 y 2019, el 81,3% de las emisiones ocurrieron fuera de Áreas Silvestres Protegidas de Protección Absoluta (ASPPA). El aporte promedio anual de emisiones fuera de ASPPA es de 3,1 millones de tCO₂-e y para el año 2019 alcanzó las 3,7 millones de tCO₂-e.

- El promedio de emisiones fuera de ASPPA ha aumentado con el paso del tiempo pasando de 2,1 millones de tCO₂-e en la primera década analizada (1990-1999) hasta 3,9 millones de tCO₂-e en la última década (2010-2019), lo que representa una tasa de crecimiento del 82,4%.
- En promedio, por cada 2,4 tCO₂-e emitidas a la atmósfera por degradación forestal, apenas 1 tCO₂-e es removida por mejoras en los bosques. El balance de estos procesos es un resultado neto promedio por año de 1,8 millones de tCO₂-e de emisiones, que alcanzó los 2,4 millones de tCO₂-e emitidas en el año 2019.
- Entre los años 1986 y 2019 el 33,5% de las tierras forestales permanentes que están más expuestas a presiones del ser humano por estar fuera de ASPPA han sufrido disminuciones en su cobertura de dosel. Los valores más altos de afectación se registran para los períodos 1986-1991 y 2001-2008, en los cuáles se vieron afectadas más de 700.000 hectáreas.
- El porcentaje promedio de hectáreas de bosques permanentes que mejoraron sus existencias de carbono para las nueve cohortes asciende a 49,1%.
- Las toneladas de emisiones por hectáreas fuera de ASPPA son superiores a las registradas dentro de ASPPA en casi todas las cohortes analizadas y presentan una tendencia hacia el alza en los últimos años
- Entre los años 2015 y 2019, se registran valores para emisiones fuera de ASPPA de 1,9 y 2,2 tCO₂-e/ha, lo que significa un incremento importante en la brecha con respecto a las estimaciones de emisiones dentro de ASPPA, con diferencias de 0,9 y 0,8 tCO₂-e/ha.
- La distribución de las emisiones y remociones no es homogénea en términos espaciales y más bien muestra patrones de concentración en zonas específicas del territorio nacional que además han cambiado a través del tiempo.
- El análisis espacial muestra la existencia de focos de emisiones recurrentes, que aparecen y desaparecen a través del tiempo. Algunos son más localizados -PN Volcán Arenal, PN Braulio Carrillo o la Reserva Biológica Manuel Brenes-, pero otros son de gran extensión -Caribe Norte, Zona Norte y Península de Nicoya-.
- Las tres áreas de conservación (AC) de mayor extensión, que en conjunto representan el 46,2% del territorio total del país, acumulan el 51,7% de las emisiones.
- El aporte más grande es del AC Central, que, si bien acumula el 16,8% del territorio nacional, aportó el 21,9% de las emisiones durante el período 1986-2019 (22,5 millones de tCO₂-e).
- El balance histórico entre emisiones y remociones por degradación y mejora de bosques es negativo para todas las áreas de conservación -todas son emisoras netas de GEI-.
- Los resultados indican que el pico más intenso de emisiones antropogénicas (2013-2015) se relaciona con un aumento atípicamente alto en las dos áreas de conservación de mayor tamaño, a saber, Central y Huetar Norte, así como un incremento de emisiones en el área de conservación Tortuguero.
- Solo tres de las diez áreas de conservación presentan una tendencia hacia la baja en emisiones más marcada en la última cohorte analizado del 2017-2019: Huetar Norte, La

Amistad Pacífico y Pacífico Central. Las restantes siete áreas de conservación presentan comportamientos hacia el alza en emisiones en los últimos años.

- El balance neto para el año 2019 del sector forestal (al considerar procesos de deforestación, reforestación, degradación y mejora) sería de aproximadamente -3,3 millones de tCO₂-e.
- Al considerar las estimaciones de emisiones por degradación forestal, en su conjunto, el sector forestal continuaría con un resultado neto como sumidero de carbono, pero el balance reportado en estudios previos no es tan favorable como se estimaba y sufre un deterioro en su potencial de mitigación del cambio climático.

Introducción

Costa Rica ha alcanzado avances importantes en materia de mitigación del cambio climático en el sector forestal. El país ha logrado mantener los bosques, reducir la deforestación y aumentar las tierras forestales. Como resultado, diversos análisis estiman que este sector ha tenido un balance neto positivo como sumidero de carbono en los últimos años (MINAE, 2017; Durán-Monge y Aragón, 2021; IMN, 2021).

Además de estos procesos de deforestación y reforestación asociados con cambios hacia y desde otros usos del suelo, existen procesos y flujos que ocurren a lo interno del sector forestal, en bosques permanentes que se mantienen como bosques a través del tiempo. La degradación de estos bosques ocasiona pérdidas de reservas de carbono que producen emisiones hacia la atmósfera. La mejora de estos bosques, debido al crecimiento de la cobertura arbórea, genera un aumento en las existencias de C y se considera una remoción de CO₂.

En el país se replica un fenómeno presente en bosques tropicales de otras zonas del planeta (Armenteras et al., 2016; Budiharta et al., 2014). Aunque la extensión de la cobertura forestal está creciendo y las tasas de deforestación tienden hacia la baja, las emisiones por degradación forestal en bosques permanentes muestran un incremento importante. Para el año 2019, estudios realizados por REDD+ (2021) estiman que las emisiones nacionales por degradación de bosques ascendieron a los 2,6 millones de tCO₂-e y superaron en más de 3 veces las emisiones por deforestación. Además, estos procesos de degradación se han intensificado, pues se reporta un incremento del 85% con respecto al promedio anual del período de referencia comprendido entre los años 1998-2011. Por su parte, las remociones de carbono relacionadas con mejoras en bosques permanentes apenas representaron un 16% con respecto a los gases emitidos por degradación, es decir, no alcanzan para compensar estas emisiones.

Estos procesos de degradación forestal tienen un impacto sustancial sobre los ecosistemas y el potencial forestal de mitigación del cambio climático y, por tanto, tienen implicaciones significativas sobre el desarrollo humano sostenible. La tala parcial de cobertura forestal se ha vinculado con pérdidas de biodiversidad que comprometen el funcionamiento de los bosques degradados y reduce su capacidad de proveer servicios ecosistémicos (BID, 2021; Budiharta et al., 2014; USAID-REDD+, 2015).

Por otro lado, los bosques maduros y permanentes tienen un rol fundamental como depósitos de carbono por su elevada capacidad de almacenamiento de este gas por hectárea (Durán-Monge y Aragón, 2021). Este papel único y destacado en el ciclo global de carbono, hace que el potencial de mitigación del cambio climático de retener estos bosques permanentes se

incremento en un 626% si se consideran las eventuales absorciones perdidas, el efecto de la tala selectiva, las emisiones en los límites de los bosques (efecto-borde) y la defaunación (Maxwell et al., 2019). Además, la degradación forestal agrava otros fenómenos vinculados al calentamiento global, pues la creación de microclimas distintos a los de los bosques intactos, aumentan los riesgos de sequías y propagación de incendios (BID, 2021).

Así, la reducción de la degradación forestal y el aumento de las mejoras en bosques permanentes, son vitales para salvaguardar el capital natural del país. Su aporte es trascendental para la mitigación del cambio climático, el cumplimiento de los objetivos del Plan Nacional de Descarbonización al 2050 (MINAE, 2019a) y la atención de otros compromisos ambientales internacionales que el país ha adquirido como el Acuerdo de París, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, la Declaración de Glasgow sobre bosques y deforestación, el Marco Global de Biodiversidad de Kunming-Montreal y la adopción de los principios de Neutralidad de la Degradación de la Tierra de la CNUCLD, entre otros.

Actualmente, el país no reporta -ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático- las emisiones por degradación y mejora de bosques permanentes como parte del nivel de referencia forestal. Aun así, cuenta con estimaciones nacionales basadas en la interpretación visual de imágenes de alta resolución (REDD+, 2021). Estas estimaciones evalúan cambios en la cobertura forestal en una muestra de observaciones y luego son extrapoladas para generar la contabilidad nacional de carbono. Si bien este es un excelente punto de partida para analizar el fenómeno y estimar su aporte en emisiones de gases de efecto invernadero, pues este método permite un cálculo agregado a nivel nacional, dicho abordaje brinda información parcial sobre la ubicación y magnitud de estos procesos en el territorio. Contar con información desagregada y espacialmente explícita es indispensable para estudiar estos procesos con mayor precisión, generar insumos para el análisis de los impulsores de la degradación forestal y el diseño de política forestal para su atención con enfoque territorial.

El presente trabajo utiliza una metodología inédita basada en series históricas de mapas, contruidos mediante nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales de todo el territorio nacional, con el objetivo de desarrollar un análisis histórico y espacialmente explícito de los procesos de degradación forestal y mejoras en bosques permanentes -y sus respectivas emisiones y remociones-. Sus hallazgos permiten conocer la evolución, estado actual y distribución espacial de estos procesos, para entender sus efectos en el potencial forestal del país para la mitigación del cambio climático.

Esta información es útil para una discusión pública informada, en la que se posicione la degradación forestal como una problemática que debe ser estudiada y atendida por su impacto en los bosques del país. Los resultados aportan nuevo conocimiento para asistir al sector forestal y tomadores de decisión en el diseño de estrategias más precisas para enfrentar estos procesos, resguardar el capital natural y maximizar el potencial de mitigación de los bosques permanentes. También es un punto de partida para futuros estudios sobre los impulsores de la degradación forestal y los riesgos derivados de presiones antropogénicas (como actividades económicas, incendios forestales y cambios en el uso del suelo, entre otros). La metodología propuesta brinda insumos para el desarrollo de sistemas de monitoreo de degradación forestal basados en datos de teledetección, con una lógica más automatizada y enfoque espacial. También, genera nuevo conocimiento metodológico para una posible futura inclusión de las emisiones derivadas de

estos procesos en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) y el nivel de referencia de la estrategia REDD+. Además, a partir de estos hallazgos se propone una definición más robusta de degradación forestal para el país.

El documento se organiza en cuatro secciones. La segunda sección describe el abordaje metodológico y las fuentes de datos. El tercer apartado presenta los principales hallazgos de la investigación. La última sección detalla las conclusiones y el trabajo futuro.

Abordaje metodológico

Fuentes de información

El estudio integra cuatro fuentes de datos que permiten tres fines analíticos: i) dar seguimiento a los cambios de cobertura de copa en bosques permanentes -datos de actividad-, ii) estimar las reservas de carbono a partir de factores y *ratios* calculados mediante modelos matemáticos y iii) clasificar los procesos de degradación y mejora de bosques según su ubicación dentro o fuera de Áreas Silvestres Protegidas (ASP) con los criterios más estrictos de protección.

La primera fuente es la serie histórica de mapas de cobertura de dosel de *terraPulse*. Estos datos espaciales fueron adquiridos y facilitados por la estrategia REDD+ Costa Rica. Son mapas anuales de cobertura arbórea de todo el país para el período 1984-2021, basados en *stocks* de imágenes satelitales analizadas *pixel a pixel*, con una resolución de 30x30 metros. Utilizan metodologías de *big data* y aprendizaje automático para estimar la cobertura arbórea del país en cada año.

En segundo lugar, se utiliza la serie histórica de mapas de cobertura del suelo de REDD+ (MINAE, 2019b). Esta se construye a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat. Permite identificar las tierras forestales y distinguirlas de otros usos del suelo. Está compuesta por mapas con píxeles de 30x30 metros correspondientes a diez cohortes: 1986, 1992, 1998, 2001, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 y 2021.

Dado que los bosques poseen contenidos distintos de carbono en función de su tipo, los mapas consideran una clasificación basada en las zonas de vida según Holdridge (1966) y el Mapa de las Vertientes del Atlántico y Pacífico. Así, comprende cinco estratos de bosques: 1) muy húmedos y pluviales, 2) húmedos, 3) secos, 4) manglares y 5) bosques de palma. Además, los mapas incluyen una segunda categorización forestal en dos clases: bosques permanentes y nuevos. Se trata de la fuente oficial para el análisis de emisiones por cambios en usos de suelo en el país, que incorpora los estándares de calidad propios del IPCC y que es sometida a diferentes validaciones por parte de organismos internacionales.

La tercera fuente de información es la Herramienta de Degradación Forestal de REDD+ Costa Rica. De aquí se toman dos elementos. En primer lugar, las ratios de biomasa aérea por cobertura forestal según tipo de bosque, estimado con medidas directas a partir de información de parcelas del Inventario Forestal Nacional. Estas relaciones se utilizan para las estimaciones de emisiones. En el caso de las remociones, se utilizan los valores promedio de existencias de carbono por hectárea registrados en la herramienta para bosques de entre 2 y 15 años de edad, que están basadas en las ecuaciones de Cifuentes (2008) para bosques secundarios.

Con el objetivo de clasificar los procesos según su ocurrencia dentro o fuera de ASP, como cuarta fuente de información se utiliza la serie histórica de mapas de ASP desarrollados por el proyecto

"Representación geoespacial histórica de Costa Rica". Este es un trabajo de cooperación del Programa Estado de la Nación (PEN), Programa de Investigaciones Aerotransportadas y Sensores Remotos del Centro Nacional de Alta Tecnología (PRIAS-CENAT) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Es importante aclarar que, si bien el proyecto se encuentra en una fase avanzada, no ha terminado, por tanto, estos mapas aún no pueden ser considerados como oficiales.

Métodos

Con el objetivo de analizar el comportamiento histórico y distribución espacial de los procesos de degradación forestal y mejoras de bosques permanentes en el país se lleva a cabo un proceso en cinco etapas:

- Preparación y clasificación de datos espaciales
- Estimación de cobertura de dosel en mapa cuadrulado (unidad mínima de mapeo de 2 hectáreas - consistencia con definición de bosques de CR)
- Estimación de cambios entre mapas de cobertura, emisiones y remociones
- Clasificación de procesos según ubicación dentro y fuera de ASP de protección absoluta
- Análisis espacial y temporal

Este abordaje permite mapear y explorar los procesos vinculados con cambios en bosques permanentes que se mantienen como bosques a través del tiempo, pero que sufren variaciones en su cobertura de copa y en sus existencias de carbono. En el fondo representan flujos que ocurren a lo interno del sector forestal. En línea con el enfoque metodológico utilizado en REDD+ (2021), el análisis sólo considera bosques permanentes, para evitar una doble contabilidad entre las emisiones por deforestación y degradación forestal. De acuerdo con la definición legal de bosque de Costa Rica, se define una unidad analítica mínima de dos hectáreas para las estimaciones de degradación y mejora. Además, en línea con la definición de bosque presentada por el país ante la comisión de cambio climático, las estimaciones se realizan en bosques con un mínimo de 30% de cobertura de copa.

A continuación, se describen cada una de estas etapas y se presentan las definiciones más relevantes para el análisis y la interpretación de los hallazgos (recuadro 1).

Recuadro 1

Definiciones relevantes

Bosque: cobertura forestal con una superficie mínima de tierras de 2 hectáreas y una cubierta de copas que exceda el 30%.

Bosque primario o permanente: cobertura forestal que ha existido de manera interrumpida a partir de los años 1985-1986 y que además no fue clasificado como bosque secundario en el mapa de coberturas de 1985-1986. Se trata de bosques naturales con edades que exceden los 38 años.

Bosque secundario o nuevo: incluye a) áreas que en mapas posteriores a 1985-1986 fueron clasificadas como bosque y que en mapas anteriores no fueron clasificadas como bosque o b) áreas que en 1985-1986 estaban clasificadas como bosque secundario. También incluye las plantaciones forestales.

Depósitos forestales de carbono: es la cantidad de carbono que se ha secuestrado de la atmósfera y se almacena dentro del ecosistema forestal, es decir, es la cantidad de carbono en el sistema en un

momento dado expresado en masa por unidad de superficie terrestre $tC\ ha^{-1}$ (toneladas de carbono por hectárea). Para efectos de comparación con emisiones y remociones, se expresan según su masa en CO_2 mediante la multiplicación por la ratio de masa molecular entre CO_2 y C de 44/12. En el presente documento se utilizan los términos depósitos forestales de carbono, existencias de carbono en bosques, carbono almacenado en bosques y *stock* de carbono como sinónimos.

Sumideros de carbono: cualquier sistema que causa una transferencia (remoción) de C desde la atmósfera al sistema.

Fuentes de carbono: cualquier sistema que causa una transferencia (emisión) de C desde el sistema a la atmósfera.

Remoción: transferencias de CO_2 desde la atmósfera al sistema (en este caso el bosque y sus reservorios).

Emisión: transferencias de CO_2 desde el sistema (en este caso el bosque y sus reservorios) hacia la atmósfera.

Fuentes de emisiones de GEI: cualquier proceso o actividad que libera GEI hacia la atmósfera. En el contexto de ecosistemas forestales, la deforestación y la degradación forestal son las principales fuentes de estas emisiones, pues ocasionan la liberación del carbono almacenado en los bosques en forma de CO_2 y otros GEI.

CO_2e (CO2 equivalente): con el objetivo de expresar las emisiones en términos de otros GEI (además del mismo CO_2) por convención se utilizan las $tCO_2\ ha^{-1}$ (toneladas de CO2 equivalente) que combina el efecto de varios GEI.

Deforestación: eliminación de superficie forestal. Para efectos prácticos, en este trabajo el término deforestación se utiliza para referirse a píxeles que cumplían con la definición de bosque en un momento $t1$ y en el momento $t2$ no cumplen con dicha definición, es decir, son hectáreas de bosque que dejaron de ser bosque. Son áreas de bosque que fueron removidas a causa de perturbaciones inducidas por actividades humanas u otros procesos naturales. Esto no implica necesariamente una actividad ilegal.

Reforestación: aparición de superficie forestal. Para efectos prácticos, en este trabajo el término reforestación se utiliza para referirse a píxeles que no cumplían con la definición de bosque en un momento $t1$ y en el momento $t2$ sí cumplen con dicha definición, es decir, son hectáreas que no eran bosque y se convirtieron en bosque (bosques nuevos o secundarios).

Degradación: bosques permanentes con una reducción en su cubierta de copas, es decir, que tuvieron una pérdida de reservas de carbono. Para efectos prácticos, en este trabajo el término degradación se utiliza para referirse a píxeles clasificados como bosque permanente que experimentaron una reducción en su porcentaje de cobertura de dosel entre el momento $t1$ y el momento $t2$. Son áreas de bosque que fueron degradadas a causa de perturbaciones inducidas por actividades humanas u otros procesos naturales. Esto no implica necesariamente una actividad ilegal.

Mejora: bosques permanentes con un aumento en su cubierta de copas, es decir, que tuvieron una ganancia de reservas de carbono. Para efectos prácticos, en este trabajo el término mejora se utiliza para referirse a píxeles clasificados como bosque permanente que experimentaron un aumento en su porcentaje de cobertura de dosel entre el momento $t1$ y el momento $t2$.

Degradación o mejora fuera de ASP de protección absoluta: Procesos de degradación o mejora asociados a cambios en cobertura de dosel (y sus respectivas variaciones en las existencias de carbono) localizados fuera de cuatro categorías de áreas protegidas (concretamente Parques Nacionales, Reservas Biológicas, Monumentos Nacionales y Reservas Naturales Absolutas) que tiene los criterios más estrictos de protección.

Degradación o mejora dentro de ASP de protección absoluta: Procesos de degradación o mejora asociados a cambios en cobertura de dosel (y sus respectivas variaciones en las existencias de carbono) localizados dentro de cuatro categorías de áreas protegidas (concretamente Parques Nacionales, Reservas Biológicas, Monumentos Nacionales y Reservas Naturales Absolutas) que tiene los criterios más estrictos de protección.

Fuente: Elaboración propia con base en Morison et al., 2012; FAO, 2013; Pedroni y Villegas, 2016; y REDD+, 2021.

A continuación, se describen las distintas etapas de la metodología.

Preparación y clasificación de datos espaciales

Para efectuar las estimaciones se realizan una serie de transformaciones y clasificaciones. En primer lugar, se efectúa una estratificación de la serie histórica de mapas de *terraPulse* de cobertura de dosel. Para esto se utiliza la serie histórica de mapas de la Secretaría REDD+ como máscara para identificar las tierras forestales y los tipos de bosque de cada *pixel*. Esta máscara permitirá determinar los cambios de cobertura que ocurren en bosques permanentes (diferenciando de los cambios en bosques secundarios u otros usos que también pueden tener cobertura de dosel) para así evitar la doble contabilidad con respecto a procesos de deforestación que ocurren en bosques secundarios.

El proceso también permite clasificar los bosques según estrato para conseguir estimaciones más precisas basadas en los parámetros de biomasa de cada clase de bosque. En este proceso de estratificación también se identifican los píxeles sin datos para determinar la superficie forestal sin valores de TCC para cada período de análisis.

Con el objetivo de garantizar la coherencia entre el análisis de degradación forestal y la definición legal de bosque -que establece una unidad cartográfica forestal mínima de 2 hectáreas-, las estimaciones son ajustadas utilizando una cuadrícula que cumple con dichas dimensiones. Para esto se genera una cuadrícula en la que cada cuadro contiene 25 píxeles, de manera que cada uno mide 149 x 149 metros -2 hectáreas aproximadamente-. Posteriormente, cada *pixel* de los mapas de cobertura de dosel es clasificado según la cuadrícula para, en una etapa posterior, estimar valores de cobertura por cuadro.

Como resultado se obtiene una serie histórica de 11 mapas de cobertura de dosel que coincide con los mapas de REDD+ y fue estratificada según la existencia de tierras forestales en cada año (1986, 1991, 1998, 2001, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 y 2021). Cada *pixel* se clasifica según el tipo de bosque (permanente o nuevo), estrato (muy húmedo, húmedo, seco, manglar y yolillal) y un identificador que especifica el cuadro de la cuadrícula al que pertenece.

Estimación de cobertura de dosel en mapa cuadrículado

Este proceso estima nuevos valores promedio del porcentaje de cobertura dosel para cada cuadro de 2 hectáreas, a partir de la información de los 25 píxeles contenidos en dicho cuadro según el mapa de cobertura de dosel original. Para que la estimación cumpla con los lineamientos de la definición de bosque se aplican los siguientes criterios:

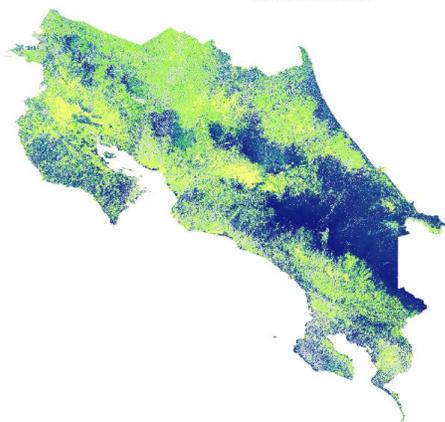
- Solo se consideran los cuadros de 2 hectáreas con una cubierta de copas mínima del 30%.
- Se mantienen los cuadros de 2 hectáreas clasificados como bosque permanente según criterio mayoritario -más del 50% de los píxeles están clasificados como bosque primario-.

Además, se realiza una corrección de píxeles con datos faltantes debido a vacíos de captura en las imágenes satelitales relacionados con la presencia de nubosidad. La extrapolación se basa en el valor promedio de los valores disponibles de cobertura de copa del mismo cuadro. Finalmente se clasifica cada cuadro según el estrato de bosque más común y en caso de empate se asigna la categoría de manera aleatoria. Como resultado de esta etapa se generan nuevos mapas de cobertura de dosel que siguen la cuadrícula y cumplen con los criterios establecidos en la definición de bosque (mapas 1).

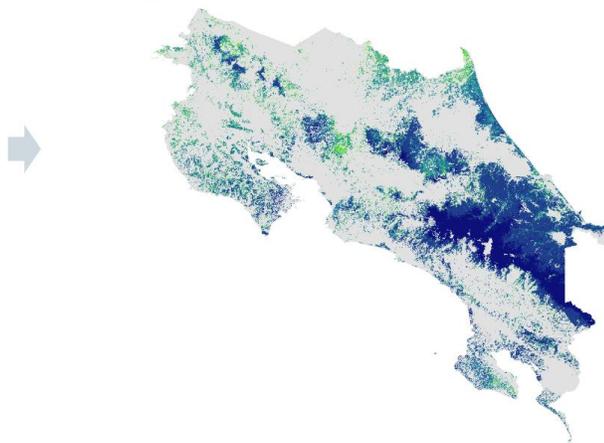
Mapas 1

Ejemplo del mapa generado con el proceso de estimación ajustado de cobertura de dosel a partir de mapas de *terraPulse*

Mapa cobertura de dosel *terraPulse*. 2017



Mapa cuadricular de cobertura de dosel. 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de *terraPulse*.

Estimación de cambios entre mapas de cobertura, emisiones y remociones

En una tercera fase se estiman los cambios de cobertura entre pares de cohortes de mapas cuadrículados de cobertura de dosel generados en la etapa anterior. La comparación entre mapas utiliza la siguiente ecuación que permite estimar las pérdidas y ganancias en cobertura de cada cuadro:

$$\Delta CD_{i,p} = CD_{i,t1} - CD_{i,t2} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

ΔCD es el cambio en la cobertura de dosel del cuadro i durante el periodo p

$CD_{i,t1}$ es el porcentaje de cobertura de dosel del cuadro i en el año $t1$ (inicio del periodo p)

$CD_{i,t2}$ es el porcentaje de cobertura de dosel del cuadro i en el año $t2$ (final del periodo p)

Posteriormente, se utilizan ratios de biomasa aérea por cobertura de dosel para estimar las emisiones y remociones derivadas de los cambios en cobertura:

$$\Delta C_{i,p} = \Delta CD_{i,p} * R_c \quad \text{(ecuación 2)}$$

Donde:

ΔC es el cambio en las existencias de carbono del cuadro i medido en $tCO_2\text{-e ha}^{-1}$ que está asociado con los cambios en la cobertura de dosel ocurridos durante el periodo p

$\Delta CD_{i,p}$ es el cambio en la cobertura de dosel del cuadro i en el periodo p

R_c es la ratio entre biomasa aérea y cobertura de dosel (o el valor promedio de existencias de carbono según en el caso de las remociones)

Para estimar las emisiones se utilizan los R_c de la herramienta de degradación forestal de REDD+. Como una medida conservadora, en el caso de las remociones, se sustituye R_c por los valores promedio de existencias de carbono de los bosques secundarios de entre 4 a 15 años, que fueron estimados con los modelos de Cifuentes (2008). Ambos parámetros se detallan en el cuadro 1.

Cuadro 1

Ratios de biomasa aérea por cobertura de dosel y existencias promedio de carbono

Tipo de bosque	Ratio entre biomasa aérea y cobertura de dosel	Existencia promedio de carbono (tCO ₂ -e ha)
Bosques muy húmedos	5,0	105,8
Bosques húmedos	3,9	130,0
Bosque seco	3,5	47,4
Manglar	3,2	31,4
Yolillal	4,3	28,7

Fuente: REDD+, 2021.

Finalmente, el valor bruto de emisiones y remociones anuales se obtienen mediante la ecuación 3:

$$GEI_t = \frac{S\Delta C_p}{T} \quad \text{(ecuación 3)}$$

Donde:

GEI_t es el el total de GEI medido en $tCO_2\text{-e ha}^{-1}$ en el año t

$S\Delta C_p$ es la sumatoria de los cambios en las existencias de carbono de todos los cuadros en el periodo p

T es el número de años contenidos en el periodo p

Como resultado de estas operaciones, se estiman los aumentos en la cobertura de dosel -mejora en el bosque- que reflejan un cambio de signo negativo y representan una remoción. Mientras que una reducción en la cobertura de dosel -degradación del bosque- resulta en un cambio de signo positivo y representa una emisión.

Clasificación de procesos según ubicación dentro o fuera de ASP de protección absoluta (ASPPA)

En esta fase se clasifican las estimaciones de emisiones y remociones de GEI según dos categorías: i) fuera de ASPPA y ii) dentro de ASPPA. Para esto se utiliza como referencia espacial la serie histórica de mapas de ASP. El análisis considera los años de creación de las ASP y los cambios en sus límites a través del tiempo, para así clasificar los procesos de mejora y degradación forestal según los linderos vigentes en cada cohorte analizado.

Concretamente se seleccionan las cuatro categorías de ASP debido a sus criterios de protección más estrictos: Parques Nacionales, Reservas Biológicas, Monumentos Nacionales y Reservas Naturales Absolutas (tabla 2). Para efectos del análisis se establece que los procesos de degradación o mejoras de bosques localizados a lo interno de los límites de estas cuatro categorías de ASP se clasifican como *dentro de ASPPA*. Los cambios en existencias de carbono más allá de esos linderos serán catalogados como *fuera de ASPPA*.

Análisis exploratorio espacial y temporal

Una vez que se obtienen las estimaciones de las fases anteriores y su clasificación según el tipo de proceso, se lleva a cabo el análisis exploratorio de los resultados. Este considera las dimensiones temporal y espacial. En el primer caso se analiza la evolución de emisiones y remociones a través del tiempo. Por su parte, para estudiar la distribución de estos procesos en el espacio, se utiliza como unidad analítica las áreas de conservación del país, pues son el punto de referencia para la planificación y desarrollo de políticas de conservación y sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales.

Cuadro 2

ASP seleccionadas, según año de creación y categoría

Nombre	Año	Categoría	Nombre	Año	Categoría
Volcán Turrialba	1955	PN	La Cangreja	1987	PN
Volcán Poás	1970	PN	Santa Rosa	1987	PN
Tortuguero	1970	PN	Arenal	1990	PN
Manuel Antonio	1972	PN	Guanacaste	1991	PN
Islas Negritos	1973	RB	Marino Ballena	1992	PN
Isla Guayabo	1973	RB	Alberto Manuel Brenes	1993	RB
Guayabo	1973	MN	Nicolas Wessberg	1994	RNA
Barra Honda	1974	PN	Piedras Blancas	1994	PN
Chirripó	1975	PN	Barbilla	1997	PN
Isla Pájaros	1976	RB	Volcán Irazú	1997	PN
Volcán Tenorio	1976	PN	Carara	1998	PN
Rincón de la Vieja	1978	PN	Tapantí	1999	PN

Nombre	Año	Categoría	Nombre	Año	Categoría
Hitoy Cerere	1978	RB	Isla del Coco	2001	PN
Cahuita	1978	PN	Diría	2004	PN
Corcovado	1980	PN	Cerro Las Vueltas	2005	RB
Palo Verde	1980	PN	Los Quetzales	2006	PN
Internacional La Amistad	1982	PN	Braulio Carrillo	2015	PN
Cabo Blanco	1982	RNA	Marino Las Baulas	2018	PN
Isla del Caño	1985	RB	Miravalles	2019	PN
Lomas de Barbudal	1986	RB			

Fuente: Proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica" del PEN, PRIAS-CENAT y SINAC, 2023.

Limitaciones del estudio

En esta sección se plantean algunas limitaciones metodológicas relevantes de cara a la interpretación de los resultados. La principal limitación del estudio es la exclusión de los bosques nuevos o secundarios del análisis. El estudio se concentra en los bosques permanentes debido a: i) la falta de consenso a nivel nacional e internacional sobre una definición de degradación forestal en bosques secundarios; b) existe una dinámica distinta -en comparación con bosques primarios- de procesos de mejora y degradación debido a las diferencias en contenido de carbono en bosques secundarios; y c) los bosques secundarios se excluyen para evitar una doble contabilidad entre las emisiones por deforestación y degradación forestal.

Aun así, es relevante resaltar que una parte importante de los flujos de GEI vinculados a bosques secundarios fueron captados en una investigación previa sobre emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal (Durán-Monge y Aragón, 2021), específicamente en la contabilidad de remociones en bosques secundarios que se mantienen como bosques. A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se podrían generar nuevos insumos para aportar en la construcción de una definición y abordaje metodológico que permita apuntar hacia la contabilidad de emisiones por degradación en bosques secundarios.

Incertidumbre

El sector forestal se caracteriza por la presencia de gran cantidad de procesos simultáneos y dispersos en el tiempo y espacio, así como la influencia directa e indirecta de factores que pueden tener orígenes naturales o antropogénicos. Por esta razón la cuantificación de las incertidumbres es un tema central en este tipo de análisis (IPCC, 2019). Las mediciones de incertidumbre permiten aproximarse en cuánto difieren las emisiones y absorciones reales de las estimadas. Aun así, según el IPCC (2021) la información de incertidumbre no debe estar orientada a cuestionar la validez de las estimaciones, sino a priorizar esfuerzos para mejorar la exactitud de las estimaciones a futuro y la toma de decisiones metodológicas.

Aunque este estudio no pretende ser un inventario, y más bien sigue una lógica distinta orientada a la identificación de patrones y tendencias espaciales y temporales, dado que varias de las fuentes utilizadas siguen los lineamientos del IPCC, estas presentan estimaciones de incertidumbre. En el caso de la serie histórica de mapas de *terraPulse* también existen

mediciones de incertidumbre que acompañan los valores estimados de cobertura de dosel. Por otro lado, el uso de datos de densidades de carbono provenientes en su mayoría de estudios científicos realizados en el país y el INF, implica una reducción en los niveles de incertidumbre.

Es importante aclarar que la propagación de estas mediciones de incertidumbre, en el contexto de esta investigación y sus resultados, es un tema pendiente. Esto implica un desarrollo adicional que escapa del alcance del trabajo actual. Pero forma parte de la agenda de investigación del equipo investigador y será abordado en un trabajo futuro, con un enfoque más metodológico. A continuación, se presenta un resumen de las estimaciones de incertidumbre de las fuentes utilizadas en esta investigación.

La primera fuente de incertidumbre viene de los valores estimados de cobertura de dosel en la serie histórica de mapas de *terraPulse*. En el proceso de validación de estos mapas se comparan los datos de cobertura del dosel de 470 puntos de muestreo recopilados in situ en 2018 con los valores estimados por *terraPulse*. En estos puntos se midió la cobertura del dosel mediante densímetros de copa esférica. Utilizando la técnica de estimación de densidad de *kernel*, se deriva la función de densidad de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) del error de la cobertura del dosel a partir del histograma de las diferencias calculadas. Las estimaciones de cobertura del dosel de *terraPulse* presentan un sesgo medio del -11,8% en comparación con la referencia y una desviación estándar del sesgo del 25,7% (*terraPulse*, 2022).

Una segunda fuente de incertidumbre proviene de los datos espaciales utilizados para la identificación de bosques permanentes y su estratificación, es decir, de las incertidumbres asociadas con los mapas de la serie histórica de cobertura del suelo de REDD+ (MINAE, 2019b). Estos son sometidos a un proceso de revisión de calidad y validación que incluye entre otros aspectos (REDD, 2021): vista previa y verificación de la calidad de la imagen satelital y metadatos por parte del analista responsable de la descarga de imágenes de soporte y del supervisor; validación del error cuadrático medio (RMSE) de los puntos de control, por parte del analista responsable de la ortorrectificación; validación de máscaras de nubes y sombras mediante la verificación visual de una cuadrícula aleatoria sistemática de puntos de control; proceso iterativo de clasificación, verificación de resultados, detección de errores y revisión de áreas y puntos de capacitación; verificación visual de los mapas generados luego de llenar los vacíos con datos globales; y ediciones manuales, revisiones visuales y revisiones con fotointerpretación.

Por otro lado, según se detalla en Agresta-Dimap-UCR-UPM (2015), se lleva a cabo una validación de los mapas mediante fuentes de puntos de control. Como resultado se obtienen valores de exactitud de la clasificación de 86% para el mapa del 2013, 92% para el mapa del 2001 y 88% para el mapa de 1987. Otras estimaciones de incertidumbre basada en los lineamientos de Olofsson et al (2014) estiman valores para el período de referencia 1998-2011 y los mapas de la serie 2018-2019 (cuadro 3). Nótese que las hectáreas de bosques que se mantienen como bosques presentan estimaciones de incertidumbre relativamente bajas.

Cuadro 3

Incertidumbre estimada para mapas de cobertura

Incertidumbre	1998-2011	2018-2019
Hectáreas deforestadas	26%	6%
Hectáreas de otros usos convertidas en bosques	31%	8%
Hectáreas que se mantienen como bosques	4%	1%

Fuente: Elaboración propia con base en REDD, 2021.

La tercera fuente de incertidumbre viene de los factores de emisión y ratios de biomasa aérea por cobertura de dosel. Estos determinan las existencias de carbono utilizadas para la estimación. Según REDD+ (2021), el nivel de incertidumbre de las relaciones de biomasa por cobertura forestal utilizadas para cuantificar las emisiones, fueron calculadas a partir de las desviaciones estándar de las relaciones identificadas (cuadro 4).

Cuadro 4

Incertidumbre estimada para relaciones de biomasa aérea por cobertura de dosel

Tipo de bosque	Incertidumbre de R_c
Muy húmedos y pluviales	16%
Húmedos	22%
Secos	24%
Manglares	32%
Bosques de palma	37%

Fuente: Elaboración propia con base en REDD, 2021.

La tabla 5 resume los valores de incertidumbres al 90% de confianza en $tCO_2 \text{ ha}^{-1}$ para cada uno estrato y cohorte de edad de bosques permanentes y secundarios. Según se detalla en la sección anterior 3.2.3, los valores de existencias de carbono asociados con estos niveles de incertidumbre fueron utilizados para la estimación de remociones.

Cuadro 5
Incertidumbre de las densidades de carbono al 90% de confianza
(tCO₂-e ha⁻¹)

Uso de suelo	Tipo	Cohorte de edad	Reservorio				Existencia total
			BARA	BARS	MM	H	
Bosques muy húmedos y pluviales	Primario	-	63,5	14,6	8,8	0,9	65,8
	Nuevo	4	2,9	0,8	0,3	0,1	3,0
		37	19,7	4,6	2,1	0,6	20,4
Bosques húmedos	Primario	-	41,9	9,9	23,3	1,0	48,9
	Nuevo	4	3,4	0,9	2,4	0,1	4,2
		37	19,4	4,6	13,2	0,7	23,9
Bosques secos	Primario	-	-	-	21,9	0,6	21,9
	Nuevo	4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
		37	16,6	3,9	7,1	1,7	18,6
Manglares	Primario	-	31,8	7,4	2,1	0,2	32,8
	Nuevo	4	1,3	0,4	0,1	0,0	1,3
		37	11,8	3,0	0,9	0,3	12,2
Bosque de palma	Primario	-	25,0	5,9	7,0	1,1	26,7
	Nuevo	4	1,0	0,3	0,4	0,1	1,1
		37	9,3	2,3	3,4	0,5	10,1

Fuente: Elaboración propia con datos de la herramienta NRE/MRV, MINAE, 2019b.

Revisión y validación de los mapas de terraPulse

Como parte de los procesos de control de calidad de los mapas de *terraPulse*, se llevaron a cabo varios ejercicios de revisión y validación de estas capas espaciales que no fueron incluidos en esta versión del documento. En primera instancia se hizo una revisión de datos faltantes, que dio lugar a versiones mejoradas de los mapas que fueron utilizadas para los procesamientos finales que se presentan en esta investigación.

En segundo lugar, se hizo una comparación de los resultados netos totales para las últimas cohortes (2017-2019), contra las estimaciones de la contabilidad de emisiones de carbono por degradación forestal actual desarrolladas por la Estrategia REDD+ para Costa Rica. En otras palabras, se comparan los resultados netos de utilizar una metodología basada en series históricas de mapas y análisis pared a pared, contra el uso de interpretación visual de una muestra de imágenes de alta resolución. Según este ejercicio de validación, para el año 2018, se estima un sesgo de -9,2% en el balance neto de las emisiones totales (incluyendo naturales y antropogénicas), es decir, los resultados son ligeramente superiores en magnitud al utilizar la metodología propuesta en este nuevo estudio.

Resultados

Los cambios en la cobertura arbórea en bosques permanentes se traducen en pérdidas y ganancias de sus existencias de C. La mejora de estos bosques, debido al crecimiento de la

cobertura arbórea, genera un aumento en las existencias de C y se considera una remoción de CO₂. La degradación forestal ocasiona una pérdida del *stock* de C, que deriva en una emisión hacia la atmósfera. A continuación, se presentan los principales hallazgos sobre el análisis de estos procesos en las tierras forestales permanentes del país.

El análisis histórico muestra la persistencia de procesos importantes de degradación forestal fuera de las ASPPA. Estos procesos ocasionan la pérdida de existencias de C en bosques permanentes que se mantienen como bosques y han generado un resultado neto para el país como emisor de carbono durante las últimas tres décadas. Aunque el promedio del porcentaje de hectáreas de bosque permanente afectadas por estas perturbaciones ha sido relativamente estable, se evidencia un incremento en las emisiones por hectárea en los últimos años.

El análisis espacial muestra que la distribución de estos procesos de degradación y mejora no es homogénea en el territorio. Se identifican focos recurrentes de emisiones y ciertas áreas de conservación que han experimentado cambios hacia la baja con mayor intensidad, que derivan en una pérdida de su *stock* de C e importantes niveles de concentración espacial de las emisiones.

El trabajo también evidencia el efecto de estos procesos sobre las reservas nacionales de carbono forestal y el potencial de mitigación del cambio climático de los bosques permanentes y el sector forestal en su conjunto.

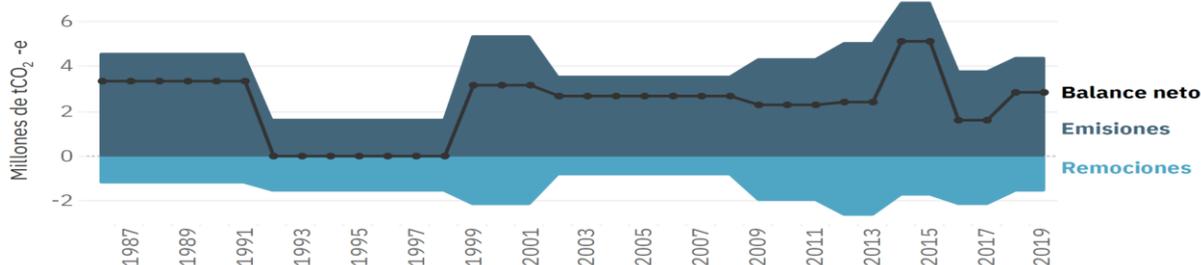
Mirada histórica de las emisiones y remociones por degradación en bosques permanentes

Las emisiones totales por degradación durante el período comprendido entre los años 1986-2019 ascendieron a 132,1 millones de tCO₂-e (gráfico 1). Durante ese lapso se registra un promedio anual de emisiones de 3,9 millones de tCO₂-e. Si bien se contabilizan valores mínimos de 1,6 millones de tCO₂-e durante la década de los 90s, en el resto de los años estas emisiones no han bajado de los 3,5 millones de tCO₂-e, e incluso han alcanzado un pico de valores de 6,8 millones de tCO₂-e en los años 2014-2015.

Las remociones totales durante el período de estudio ascendieron a -52,8 millones de tCO₂-e, con un promedio anual de -1,6 millones de tCO₂-e. Como resultado, en lo que respecta a procesos en cambio de cobertura en bosques permanentes, el país ha tenido un balance neto negativo promedio de 2,3 millones de tCO₂-e, que asciende a 2,8 millones de tCO₂-e en el último año. Este balance implica una liberación neta de GEI a la atmósfera, lo que significa una reducción en el potencial para mitigación del cambio climático.

Gráfico 1

Evolución de emisiones, remociones y balance neto por degradación y mejora de bosques permanentes



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

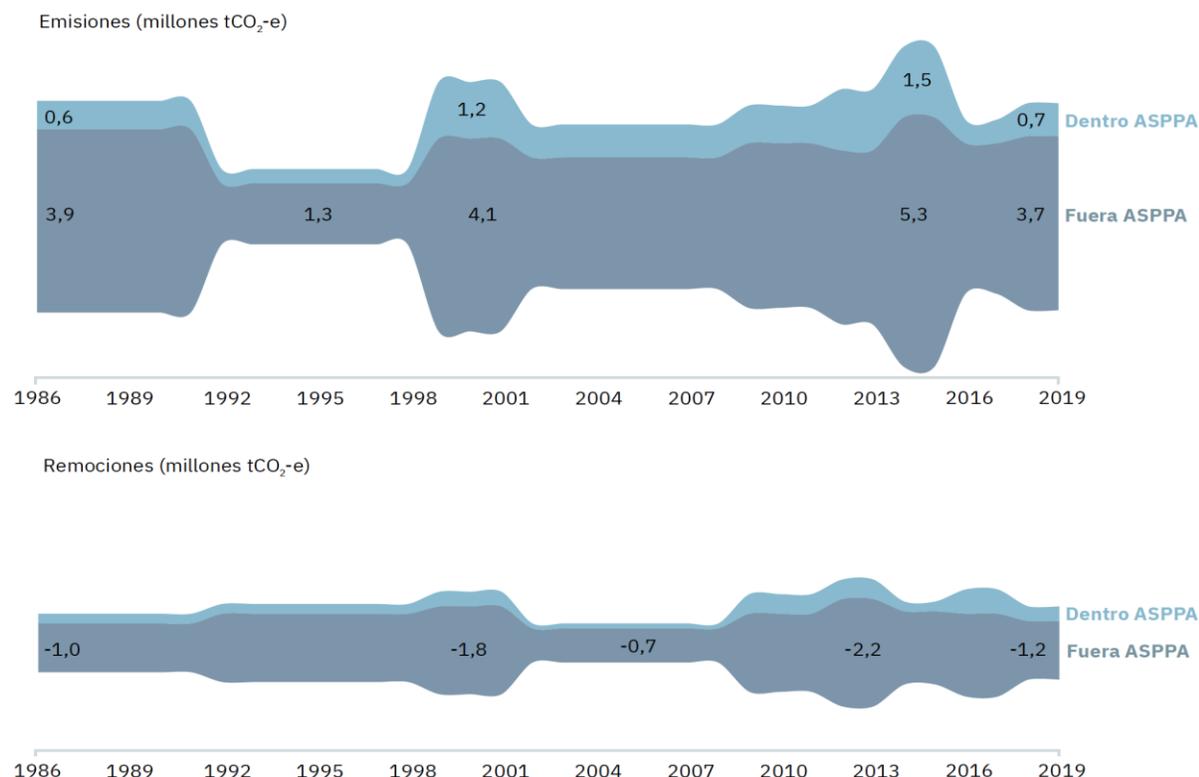
Una parte de estas emisiones y remociones ocurren en bosques permanentes ubicados dentro de los linderos de ASPPA. La otra porción de los flujos ocurre fuera de ASPPA, en zonas que en principio están más expuestas a la influencia de presiones de actividades humanas. Es importante considerar, como contexto, que para el año 2019 la relación de bosques permanentes fue de 23,9% dentro de ASPPA y 76,1% fuera de ASPPA.

El peso de los flujos de GEI fuera de ASPPA es mayor tanto para las emisiones como para las remociones. A lo largo del período analizado, en promedio, el 81,3% de las emisiones se localizaron fuera de ASPPA. A pesar del período atípicamente bajo reportado durante los años 90, el aporte promedio anual de emisiones fuera de ASPPA es de 3,1 millones de tCO₂-e y para el año 2019 alcanzó los 3,7 millones de tCO₂-e (gráfico 2).

La proporción de remociones vinculadas a tierras forestales fuera de ASPPA también es alta y ligeramente mayor con respecto a las emisiones, pues el 84,4% de las remociones ocurrieron fuera de estas áreas de protección absoluta. Las remociones fuera de ASPPA representan en promedio -1,3 millones de tCO₂-e. Esto evidencia el rol fundamental de las mejoras en bosques permanentes fuera de estas ASP y expone un riesgo importante debido a la gestión de los bosques y las medidas de protección menos estrictas de estas zonas.

Gráfico 2

Evolución de emisiones y remociones por degradación y mejora de bosques permanentes según ubicación



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

Esta segregación dentro y fuera de ASPPA permite estimar los balances históricos en cada caso. El balance neto muestra un comportamiento un tanto similar entre ambas categorías -aunque con picos y valles menos marcados dentro de ASPPA-. Pero, por su volumen y peso, las emisiones netas fuera de ASPPA requieren especial atención, pues alcanzan los 106,9 millones de tCO₂-e durante las más de tres décadas analizadas.

El promedio anual de emisiones fuera de ASPPA es de 3,7 millones de tCO₂-e (gráfico 3). Ese promedio ha aumentado con el paso del tiempo pasando de 2,1 millones de tCO₂-e en la primera década analizada (1990-1999) hasta 3,9 millones de tCO₂-e en la última década (2010-2019), lo que representa una tasa de crecimiento del 82,4%. La presencia de valores altos de emisiones (por ejemplo, las estimaciones anuales de 4,1 y 5,3 millones de tCO₂-e durante los periodos 1999-2001 y 2014-2015 respectivamente) refleja el impacto de los daños por degradación forestal a los que están expuestos estos bosques permanentes fuera de zonas protegidas. Si bien el análisis de los impulsores concretos de estos procesos escapa del alcance del trabajo, estos hallazgos evidencian que futuras presiones por actividades humanas pueden derivar en picos similares de degradación del patrimonio natural del país.

El promedio de remociones en bosques ubicados fuera de ASPPA es de -1,3 millones de tCO₂-e (gráfico 3). Esto significa que, en promedio, por cada 2,4 tCO₂-e emitidas a la atmósfera, apenas 1 tCO₂-e es removida por mejoras en los bosques. Aunque las remociones también presentan un

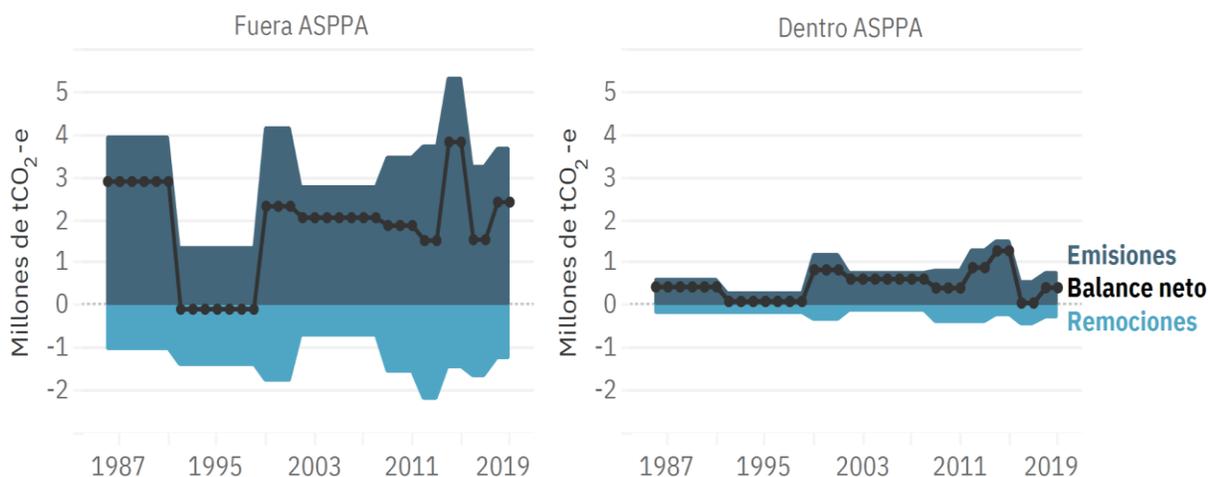
aumento promedio de 0,3 millones de tCO₂-e para la última década (con respecto al promedio de los 90s), no han sido suficientes. El balance de estos procesos es un resultado neto promedio por año de 1,8 millones de tCO₂-e de emisiones, que alcanzó los 2,4 millones de tCO₂-e emitidas en 2019.

Los resultados obtenidos para los últimos años coinciden con los estimados por la secretaría REDD+, que contabilizan un neto de emisiones para el 2018 de 2,1 millones de tCO₂-e (REDD+, 2021), esto es una diferencia de 0,3 millones de tCO₂-e con respecto al análisis del presente estudio. También existe una coincidencia en la tendencia reportada del aumento histórico de las emisiones con respecto al promedio del período de referencia de la estrategia (1998-2011).

Los flujos dentro de ASPPA tienen un peso considerablemente menor, con promedios anuales de emisiones y remociones de 0,7 y -0,2 millones de tCO₂-e durante el período analizado, respectivamente (gráfico 3).

Gráfico 3

Evolución de emisiones, remociones y balance neto por degradación y mejora de bosques permanentes, según ubicación



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

El análisis desde la perspectiva de la extensión de tierras forestales afectadas por degradación y mejora muestra el importante impacto de estos procesos en términos de la superficie afectada. Detrás de las emisiones analizadas anteriormente, están los daños de miles de hectáreas de bosque permanente, con su potencial pérdida de biodiversidad y efectos en los servicios ecosistémicos que brindan.

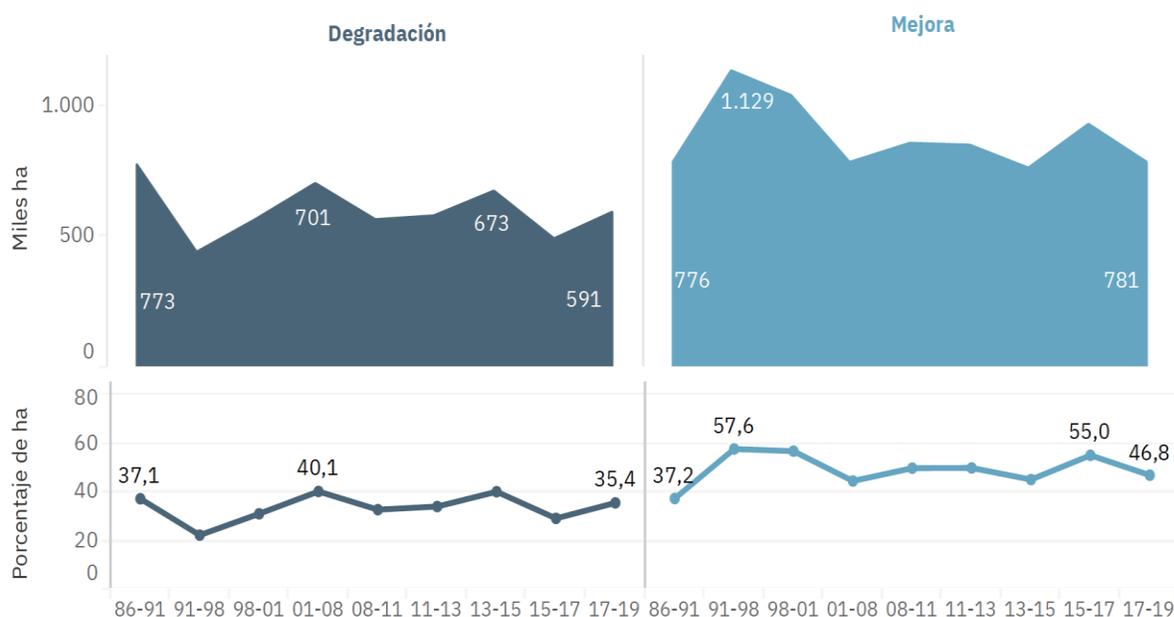
El análisis del total de hectáreas afectadas en cada período muestra que en promedio el 33,5% de estas tierras forestales permanentes que están expuestas a todo tipo de presiones por estar fuera de ASPPA han sufrido disminuciones en su cobertura de dosel (gráfico 4). Los valores más altos de afectación se registran para los períodos 1986-1991 y 2001-2008, en los cuáles se vieron afectadas más de 700.000 hectáreas.

El porcentaje de hectáreas que vieron mejoras en sus existencias de carbono presenta niveles mayores en contraste con la porción forestal degradada. El porcentaje promedio de hectáreas

de bosques permanentes que mejoraron su *stock* de C para las 9 cohortes asciende a 49,1%. Aunque el número de hectáreas que tuvieron incrementos del *stock* de C es mayor con respecto a las afectadas por degradación, la recuperación de las existencias es más lenta pues, la pérdida de biomasa tiene una pendiente más pronunciada que la de su recuperación. Así, esta diferencia favorable en el número de hectáreas mejoradas no se ha traducido en un balance neto favorable en los flujos de estos bosques que permanecen como bosques a través del tiempo. Es importante añadir que, por los supuestos conservadores utilizados, existe la posibilidad de que los cálculos de remociones estén algo subestimados. La validación de esta hipótesis requiere análisis a profundidad y trabajo de campo que están más allá de las posibilidades de esta investigación.

Gráfico 4

Hectáreas degradadas y mejoradas fuera de ASPPA, según período de análisis



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

Al integrar ambas perspectivas de análisis -i. e. flujos de GEI y hectáreas afectadas- es posible estimar la ratio de toneladas de emisiones por hectárea. Este indicador da una visión distinta, pues contempla la diferencia entre la proporción de la extensión de bosques permanentes dentro y fuera de ASPPA, es decir, genera una especie de indicador ponderado por la extensión de superficie distribuida según estas dos categorías, en la que ocurren los cambios de cobertura de copa y sus respectivos flujos.

El análisis de este indicador muestra que las toneladas de emisiones por hectáreas fuera de ASPPA son superiores a las localizadas dentro de ASPPA en casi todos las cohortes analizadas y presentan una tendencia hacia el alza en los últimos años (gráfico 5). La excepción es el período 2011-2013, en el que se registra el pico más significativo de emisiones dentro de ASPPA. Entre los años 1986 y 2015 las diferencias son relativamente bajas y no superan las 0,5 tCO₂-e/ha. Sin embargo, al final de la serie, entre los años 2015 y 2019, se registran valores para emisiones

fuera de ASPPA de 1,9 y 2,2 tCO₂-e/ha, lo que significa un incremento importante en la brecha con respecto a las estimaciones de emisiones que tienen lugar dentro de ASPPA, con diferencias de 0,9 y 0,8 tCO₂-e/ha.

Uno de los aportes de este trabajo se deriva de este indicador de emisiones por hectárea. La definición actual que se utiliza a nivel nacional por la estrategia REDD+ para clasificar la degradación forestal entre antropogénica y natural se basa en la localización espacial de las emisiones. Los flujos dentro de ASP se catalogan como naturales y los que ocurren fuera de las ASP se consideran de origen antropogénico (MINAE, 2019b).

Sin embargo, existen procesos naturales que degradan los bosques permanentes tanto dentro, como fuera de las ASPPA. La metodología actual clasifica toda la degradación fuera de ASP como antropogénica y deja de lado la posibilidad de que parte de esos flujos también podrían estar asociados a causas naturales.

Se podría establecer el supuesto de que las medidas de protección dentro ASPPA son efectivas y que las emisiones dentro de los límites de estas áreas son totalmente naturales. En otras palabras, se podría asumir que las emisiones dentro de ASPPA son una buena medida para estimar la degradación natural por hectárea que ocurren en bosques permanentes, indistintamente de si esta tiene lugar dentro o fuera de las áreas protegidas.

Entonces, en un escenario ideal, las toneladas de emisiones por hectárea deberían ser idénticas tanto para procesos fuera de ASPPA como para los que ocurren dentro de estas áreas. Esto podría significar que toda la degradación -indistintamente de si ocurre dentro o fuera de una ASPPA- se genera por causas naturales, es decir, no existe degradación causada por los efectos del ser humano.

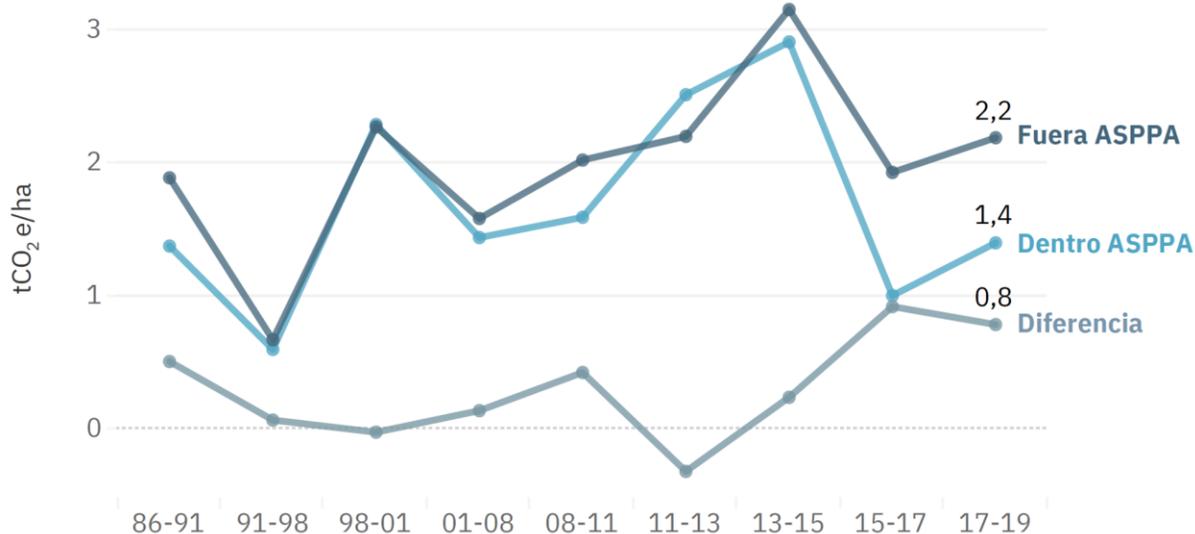
Los resultados del gráfico 5 muestran que esto no se cumple: la ratio de emisiones por hectárea es mayor fuera de ASPPA que dentro de estas áreas, y además, ha aumentado en los últimos años. Este diferencial entre esa ratio, calculado al comparar el valor dentro de las ASPPA, contra el que ocurren fuera las áreas protegidas, se podría considerar como una medida más precisa de las emisiones por degradación forestal antropogénica.

Esta redefinición conceptual tiene un enfoque distinto al actual, pues descuenta el peso de la degradación natural a la que también están expuestos los bosques permanentes fuera de ASPPA. Así, a partir de los resultados del presente trabajo, dado que para el año 2019 se registraron 1,7 millones de hectáreas de bosques permanentes fuera de ASPPA, una nueva estimación de emisiones podría indicar que los flujos antropogénicos de ese año (estimados según la diferencia en las tCO₂-e por ha dentro y fuera de ASPPA) podrían ascender a 1,3 millones de tCO₂-e.

Sin embargo, el replanteamiento de esta definición escapa de la frontera de investigación de este trabajo y, por tanto, los hallazgos anteriores y posteriores se basan en la definición de degradación forestal planteada para Costa Rica por la estrategia REDD+, que es el producto del consenso entre una serie de actores y personas expertas en la temática. Futuros análisis podrían profundizar más en este nuevo enfoque y la validez de sus supuestos, por ejemplo, la asunción de que no existe degradación antropogénica dentro de las ASPPA del país y que, por tanto, esta es una línea de base adecuada para cuantificar la degradación natural.

Gráfico 5

Toneladas de emisiones por hectárea, según periodo de análisis y ubicación



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE, 2019b, terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

Patrones espaciales de los flujos

El análisis histórico-espacial de los flujos de GEI refleja la incidencia de procesos de mejora y degradación forestal en el territorio. La distribución de las emisiones y remociones no es homogénea en términos espaciales y más bien muestra patrones de concentración en zonas específicas del territorio nacional que además han cambiado a través del tiempo. Aun así, se identifican zonas en las que las afectaciones son recurrentes entre períodos. Los mapas 2 y 3 muestran la especialización de los flujos para el inicio y fin de la serie, así como los principales momentos de picos de emisiones y remociones.

Al inicio de la serie, durante el período comprendido entre los años 1986-1991 se observan cuatro focos de concentración de emisiones (mapa 2). El primero de gran actividad entre Cartago y Limón en la periferia del PN Barbilla. Se identifica otro conglomerado de emisiones muy amplio en extensión e intenso en el Caribe Norte, abarca una franja en la costa que va desde el centro hasta el norte, pasando por el PN Tortuguero y su periferia. También se identifican dos zonas con valores altos de emisiones en las inmediaciones del PN Braulio Carrillo y en la Zona Norte en la periferia del PN Volcán Arenal.

En el primer pico registrado de emisiones, entre los años 1998-2001, se identifican procesos importantes de degradación forestal en una franja a lo largo de las cordilleras de Tilarán y Volcánica de Guanacaste, que inicia en la Reserva Biológica Manuel Brenes, pasando por el PN Volcán Arenal en la zona norte y hasta alcanzar los límites del PN Guanacaste en el norte de esa provincia. Además, se identifica otro foco más localizado en la Península de Osa.

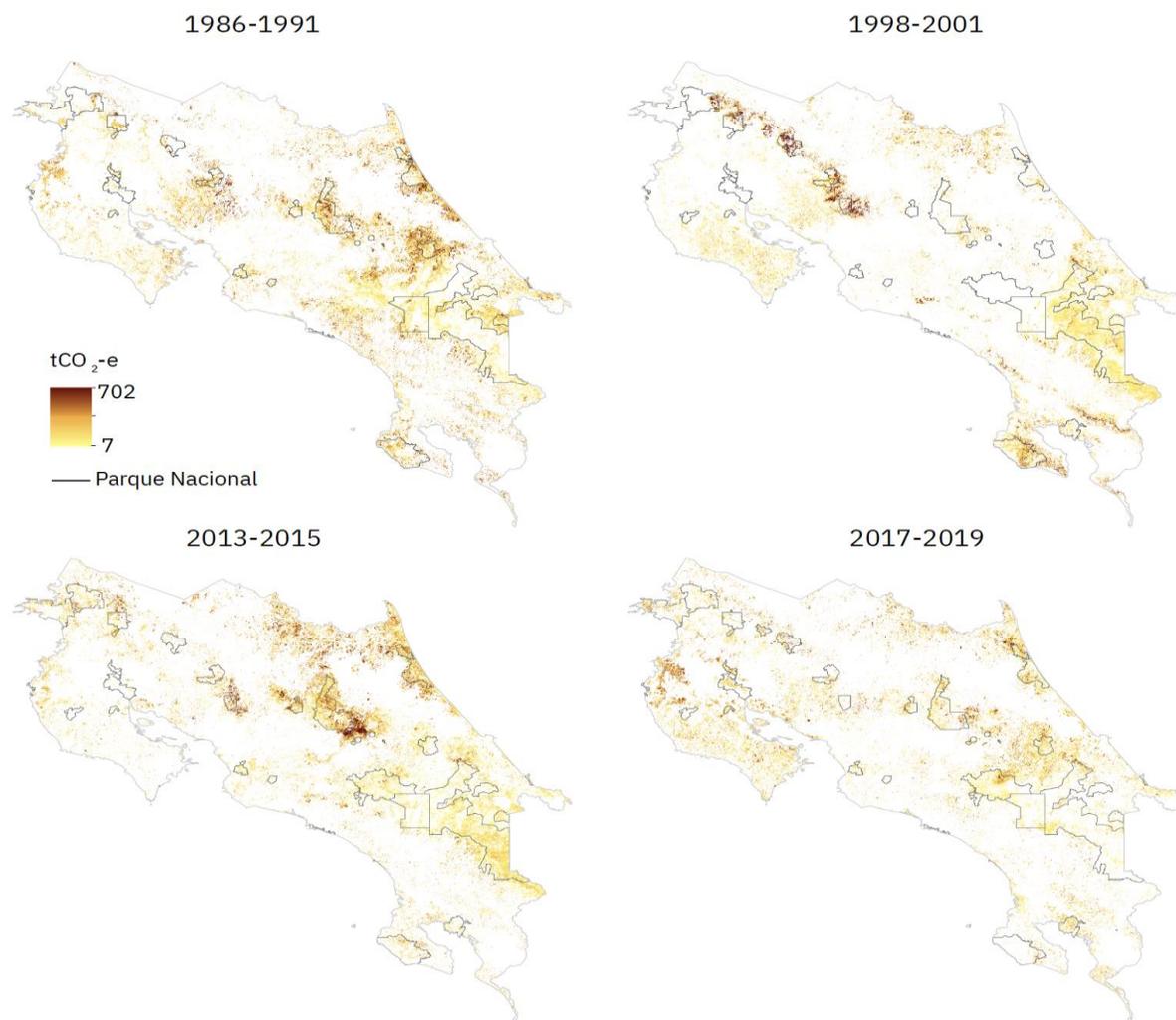
Durante el pico más importante de emisiones por degradación forestal de las últimas tres décadas, que tuvo lugar entre los años 2013-2015, se observaron la mayor cantidad de focos de actividad. El más intenso se localiza en la Periferia del PN Braulio Carrillo. Le siguen dos

conglomerados más acotados en el Occidente del Valle Central, en la Reserva Biológica Manuel Brenes en las inmediaciones de San Ramón y la periferia del PN Volcán Poás en Alajuela. También se observa un cuarto foco de gran dispersión en la Zona Norte del país. El último foco es de gran tamaño y ya había sido identificado en períodos previos, se trata del conglomerado de emisiones en la costa del Caribe Norte. Al cierre del período de análisis, entre los años 2017-2019 las emisiones están más dispersas, pero se evidencia gran actividad a lo largo de toda la península de Nicoya.

El análisis espacial muestra la dispersión de los procesos, pero también la existencia de focos de emisiones recurrentes -que aparecen, desaparecen y vuelven a aparecer con el paso del tiempo-. Algunos son más localizados - PN Volcán Arenal, PN Braulio Carrillo o la Reserva Biológica Manuel Brenes-. Otros son de gran extensión -Caribe Norte- e incluso en zonas con escasa presencia de PN -como la Zona Norte y Península de Nicoya-.

Mapas 2

Distribución espacial de las emisiones totales por degradación de bosques en períodos seleccionados

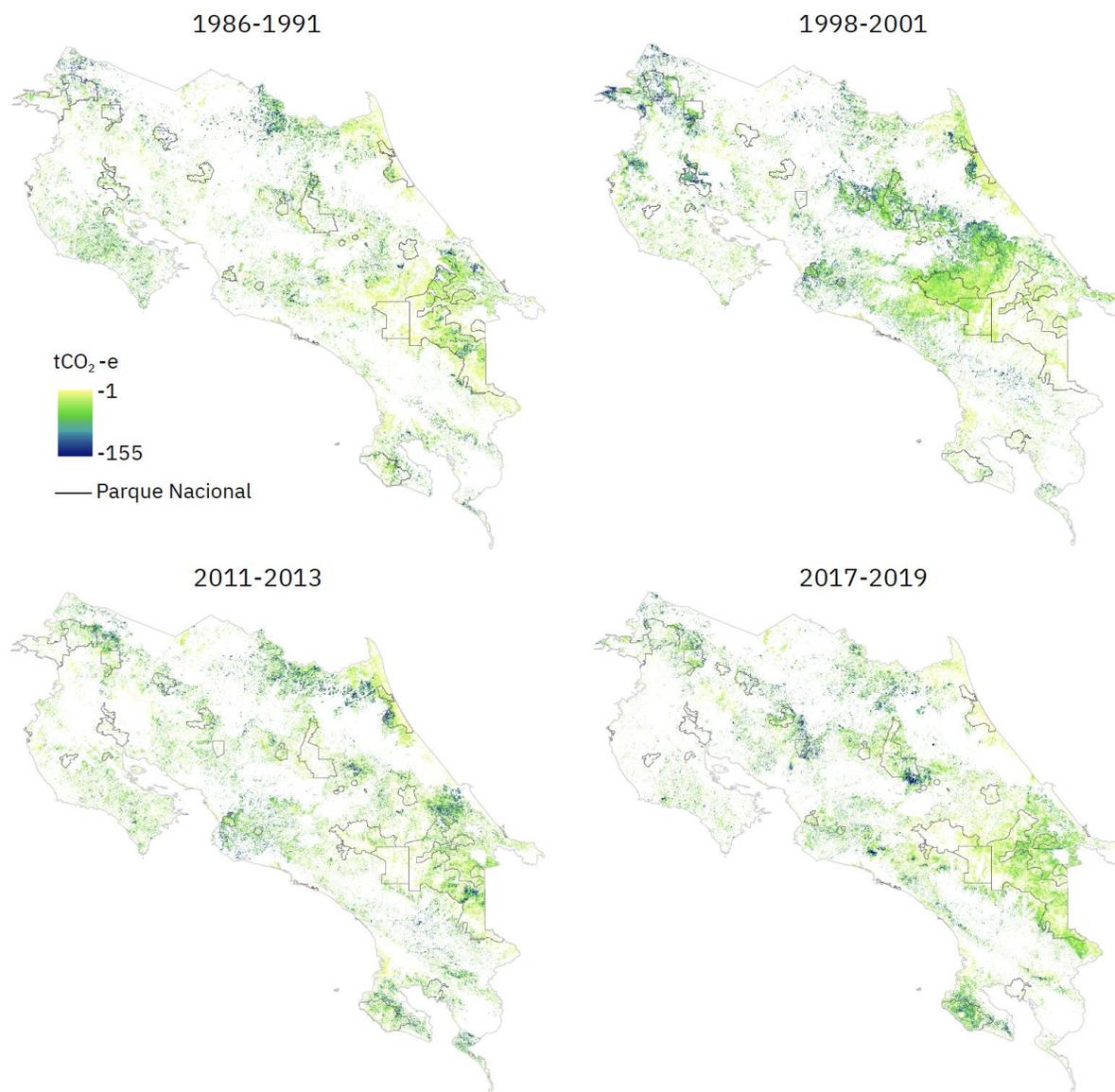


Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

En general, las remociones presentan patrones espaciales más dispersos. Sin embargo, se identifican algunos focos (mapas 3). Tal es el caso de las zonas de Guanacaste, Zona Norte y Caribe Sur entre los años 1986-1991. Además, durante el pico de remociones de los años 1998-2001 se identifica una gran actividad en el Norte de Guanacaste y todo el centro del país. Hacia el cierre del período de análisis entre los años 2017-2019 se ubican conglomerados de remociones en el Caribe Sur, Osa, PN Braulio Carrillo y la Cordillera Volcánica de Guanacaste.

Mapas 3

Distribución espacial de las remociones totales por mejora de bosques en períodos seleccionados



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

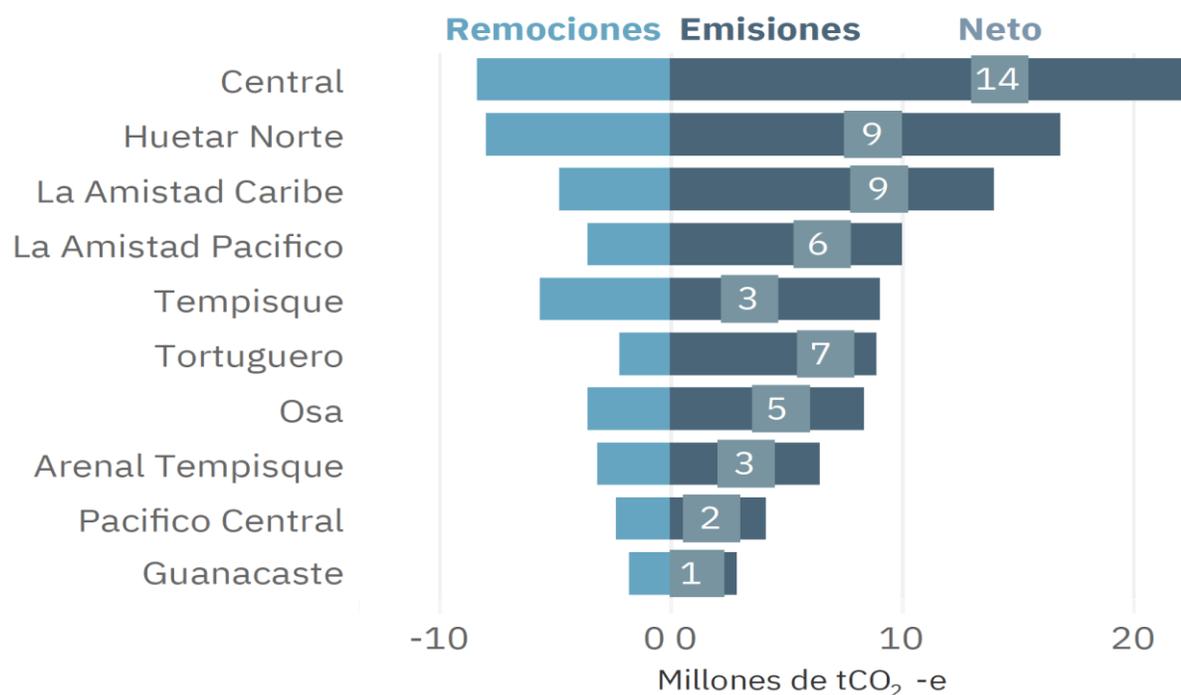
El análisis de la distribución espacial se puede sintetizar utilizando como unidad analítica las áreas de conservación del país. Estas son el punto de referencia para la planificación y desarrollo de políticas de conservación y sostenibilidad en el manejo del patrimonio natural del Estado.

Se evidencia un patrón de concentración de emisiones fuera de ASPPA que sigue la distribución según el tamaño de las AC (gráfico 6). Las tres áreas de mayor extensión, que en conjunto representan el 46,2% del territorio total del país, acumulan el 51,7% de las emisiones (53,2 millones de tCO₂-e). Estas son las AC que históricamente han sufrido los mayores impactos por degradación forestal y han tenido los mayores efectos sobre su potencial de mitigación del cambio climático. El aporte más grande es del AC Central, que, si bien acumula el 16,8% del territorio total nacional, aportó el 21,9% de las emisiones durante el período 1986-2019 (22,5 millones de tCO₂-e). Las restantes AC presentan aportes en emisiones más modestos, que oscilan entre el 2,7% en AC Guanacaste hasta 9,7% en el AC Amistad Pacífico.

El balance histórico entre emisiones y remociones por degradación y mejora de bosques es negativo para todas las AC -todas son emisoras netas de GEI-. Nuevamente las tres AC de mayor extensión ocupan las primeras posiciones en el balance neto como emisoras. También destaca el caso de AC Tortuguero, que según se demostró en el análisis espacial estuvo ampliamente expuesta a picos de degradación forestal. Como resultado, si bien ocupa la sexta posición en términos de emisiones brutas (8,9 millones de tCO₂-e), sube a la cuarta posición en emisiones netas. En contraste, las AC Tempisque que ocupa la quinta posición en emisiones totales brutas, baja a la séptima posición en el neto. El AC de Guanacaste, una de las más pequeñas en tamaño, muestra el resultado neto más balanceado entre los años 1986 y 2019 (1,0 millones de tCO₂-e).

Gráfico 6

Balance de emisiones fuera de ASPPA, según área de conservación. 1986-2019



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

El detalle de histórico de emisiones según AC permite analizar con mayor profundidad los cambios que generan el balance neto analizado anteriormente y seguir la tendencia para cada una de estas unidades analíticas.

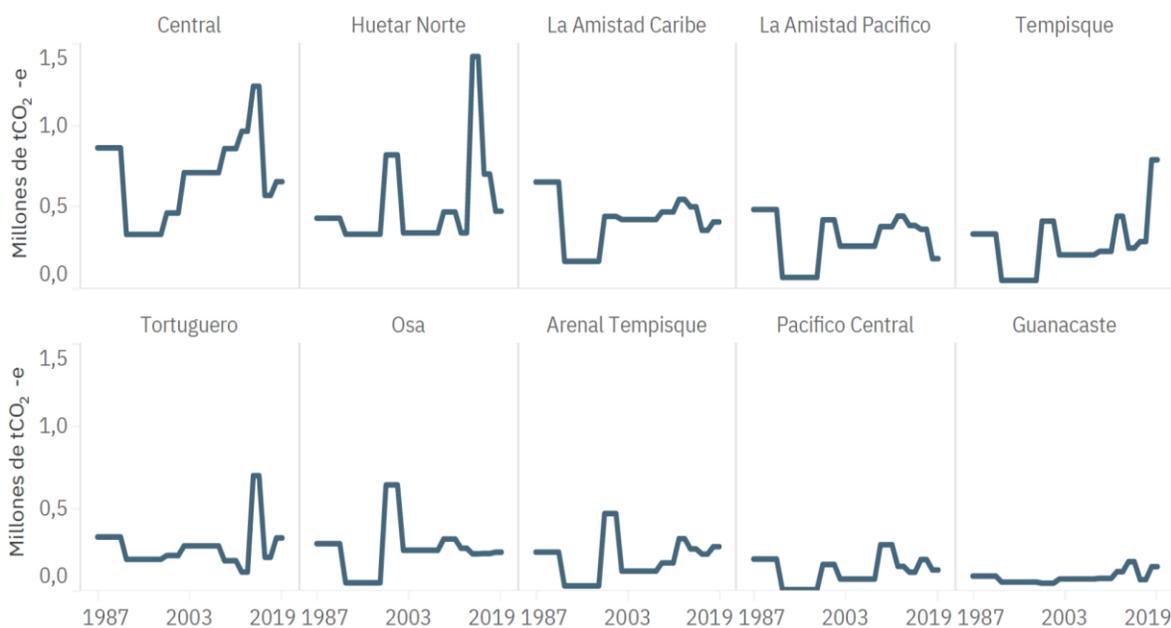
Los resultados indican que el pico más intenso de emisiones fuera de ASPPA (2013-2015) se relaciona con un aumento atípicamente alto en las dos AC de mayor tamaño, a saber, Central y Huetar Norte, así como un incremento de emisiones en la AC Tortuguero.

Solo tres de las diez AC presentan una tendencia hacia la baja en emisiones más marcada en la última cohorte analizado del 2017-2019: Huetar Norte, La Amistad Pacífico y Pacífico Central. La mayoría de AC presentan comportamientos hacia el alza en emisiones, aunque en la mayoría de los casos no son muy abruptos, como la Central, Amistad Caribe o Tortuguero, entre otras. Llama la atención el caso de AC Tempisque con una subida sin precedentes para los últimos años analizados, esto es un aumento de 0,3 millones de tCO₂-e en el 2017 a 0,8 millones de tCO₂-e al 2018 y 2019.

Especial atención requiere el caso de AC Guanacaste, que como se indicó anteriormente presenta el resultado neto más balanceado. El análisis histórico refleja que este comportamiento neto es producto de una relativa estabilidad en las emisiones, con poca presencia de picos o valles a lo largo de la serie.

Gráfico 7

Evolución de emisiones antropogénicas, según área de conservación



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse y proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023.

La integración del análisis por AC y los mapas con focos de emisiones y remociones, representa un instrumento de utilidad para atender la degradación forestal con enfoque espacial, que puede dar luces sobre dónde concentrar los esfuerzos para lograr política de mayor precisión para mitigar los impactos de la degradación. Además, son un punto de partida para generar conocimiento sobre cómo dirigir de manera eficiente los recursos para la mejora de bosques. Generar inteligencia espacial para cuantificar y monitorear estos procesos es el primer paso para gestionar sus impactos y resguardar el capital natural e impulsar el potencial de mitigación del cambio climático de los bosques permanentes.

El balance del sector forestal y su posición con respecto a otros sectores

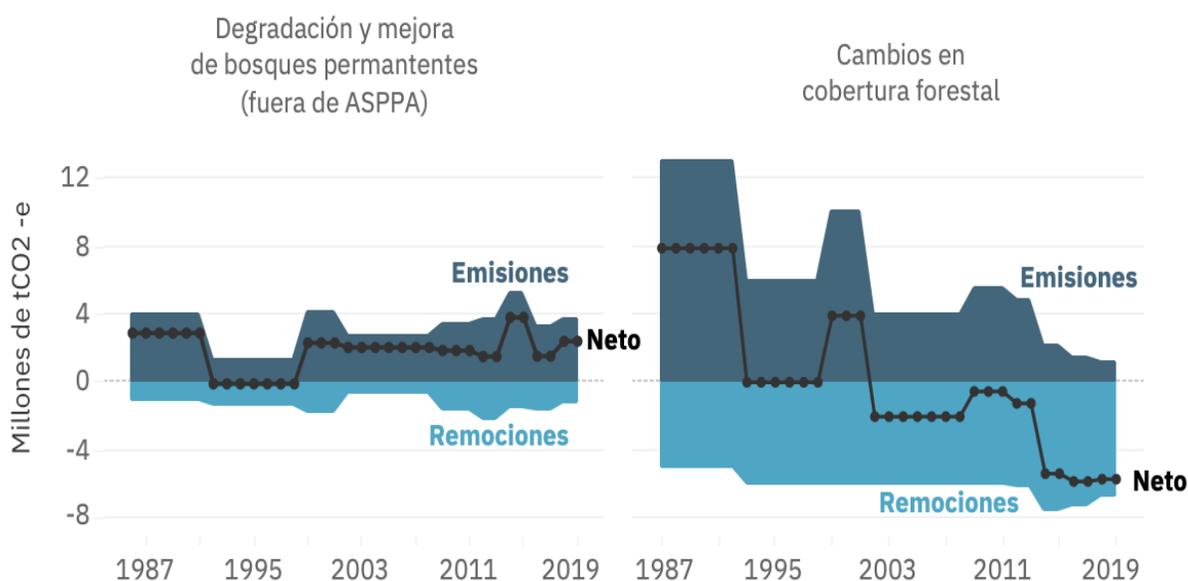
Estudios previos realizados por el Programa Estado de la Nación con el apoyo técnico de la Secretaría REDD+ (Durán-Monge y Aragón, 2021) permiten comparar los resultados del presente trabajo, contra el balance de emisiones y remociones derivados de cambios en usos del suelo que implican cambios en la cobertura forestal. Dichos resultados incluyen los procesos de reforestación y deforestación, que, en conjunto con las nuevas estimaciones de mejora y degradación forestal, dan una visión más completa del sector forestal.

En primer lugar, destaca la marcada diferencia en la tendencia del balance neto entre ambos grupos de procesos. El análisis de los procesos de cambios en cobertura forestal -que incluye deforestación, reforestación y crecimiento de bosques secundarios- muestra una reducción importante de las emisiones por deforestación. Estas pasaron de 13,0 millones de tCO₂-e en 1986, el valor más alto registrado, a 1,1 millones de tCO₂-e en 2019, momento en que se alcanza el nivel mínimo (gráfico 8). Como resultado, en ese ámbito el país tuvo un balance como sumidero de carbono (reservorio que acumula y almacena el carbono secuestrado) del año 2002 en adelante y cerró en el 2019 con una remoción total de -5,7 millones de tCO₂-e.

En contraposición, los procesos de mejora y degradación fuera de ASPPA muestran un aumento en el promedio de emisiones, con una tasa de crecimiento del 82,4% entre las décadas de 1990-1999 y 2010-2019. El balance de estos procesos es un resultado neto promedio por año de 1,8 millones de tCO₂-e de emisiones, que alcanzó los 2,4 millones de tCO₂-e en el año 2019. Así, para el último periodo 2017-2019, las emisiones por degradación en bosques permanentes superan las estimadas por deforestación en 1.3 millones de tCO₂-e (gráfico 8).

Gráfico 8

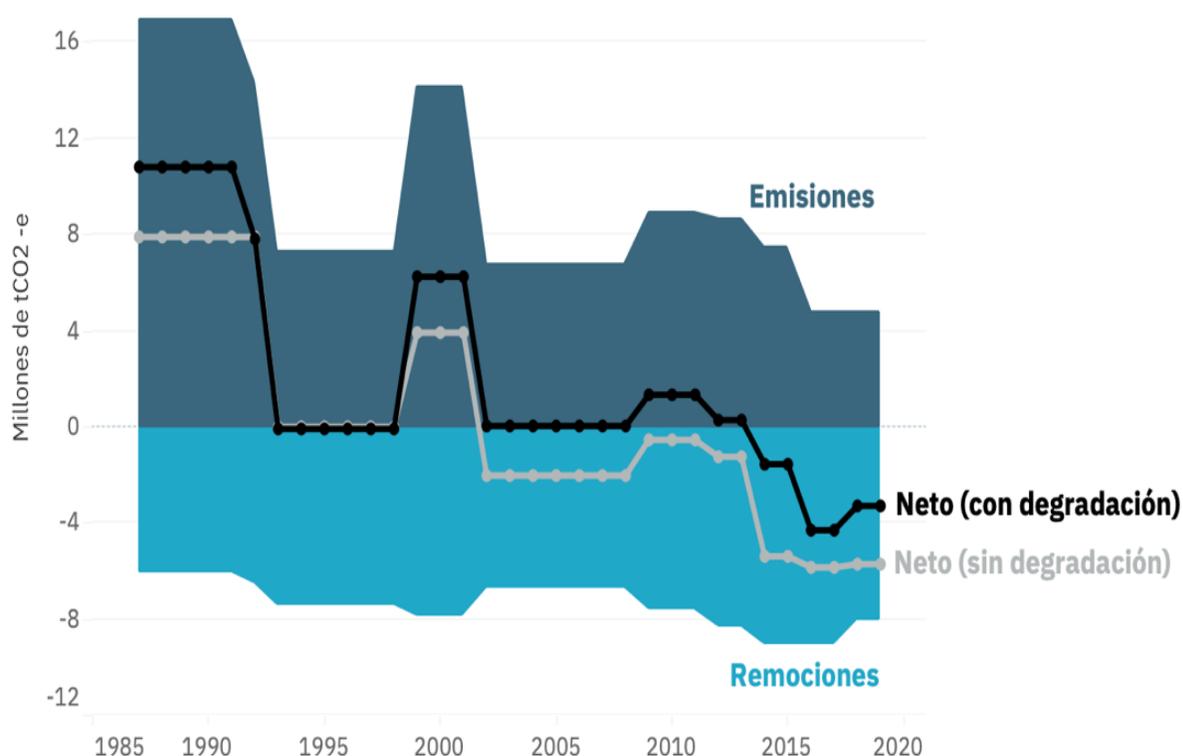
Balance entre emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal, degradación y mejora de bosques permanentes



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE (2019b), terraPulse, proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica" (2023) y Durán-Monge y Aragón, 2021.

Al integrar ambos grupos de procesos, el balance neto para el año 2019 sería de aproximadamente -3,3 millones de tCO₂-e (gráfico 9), es decir, en su conjunto el sector forestal continuaría con un resultado neto como sumidero de carbono, pero el balance reportado en estudios previos (Durán-Monge y Aragón, 2021) no es tan favorable como se estimaba. En otras palabras, al incluir las emisiones por degradación fuera de ASPPA, se da un deterioro en la capacidad del sector forestal como un todo para mitigar el cambio climático, que para el año 2019 es de aproximadamente -2.3 millones de tCO₂-e (que se observa al comparar las líneas de color negro y gris que muestran los valores netos en el gráfico 9). Además, los análisis históricos de ambos estudios han mostrado que las presiones por deforestación y degradación de origen antropogénico pueden ocasionar picos que reduzcan el balance favorable e incluso invertir la relación. El impacto de estas presiones es un tema que requiere atención en el contexto de la política del sector forestal, pues representan un riesgo, que de materializarse puede derivar en un retroceso de los resultados positivos a lo interno del sector.

Gráfico 9
Balance entre emisiones y remociones en el sector forestal



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE, 2019b, terraPulse, proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023 y Durán-Monge y Aragón, 2021.

Por otro lado, la contabilidad de emisiones de los otros sectores¹ (IMN, 2021) muestra una evolución hacia el alza en casi todos los ámbitos, estos están lejos de alcanzar un balance

¹ El INGEI no tiene estimaciones de emisiones y remociones por degradación y mejora de bosques. En el caso de deforestación y reforestación hay emisiones, pero difieren de los resultados de Durán y Aragón (2021) pues utilizan una metodología distinta. Aun así, se presentan los resultados de los otros sectores con datos del INGEI para dar un contexto sobre la posición general del país en estos otros ámbitos.

positivo (gráfico 10). Solo el sector de energía, responsable de la mayor proporción de emisiones a nivel nacional, registra un total de 8,0 millones de tCO₂-e de emisiones al año 2017. Así, hacia el cierre del periodo de análisis, las emisiones netas por degradación de bosques permanentes fuera de ASPPA superan las de los sectores de procesos industriales y residuos, tienen casi el mismo peso que las de todo el sector agro (pues este tiene un balance como emisor neto cuando se separa del sector forestal) y representan casi un tercio de las emisiones del sector energía.

Gráfico 10

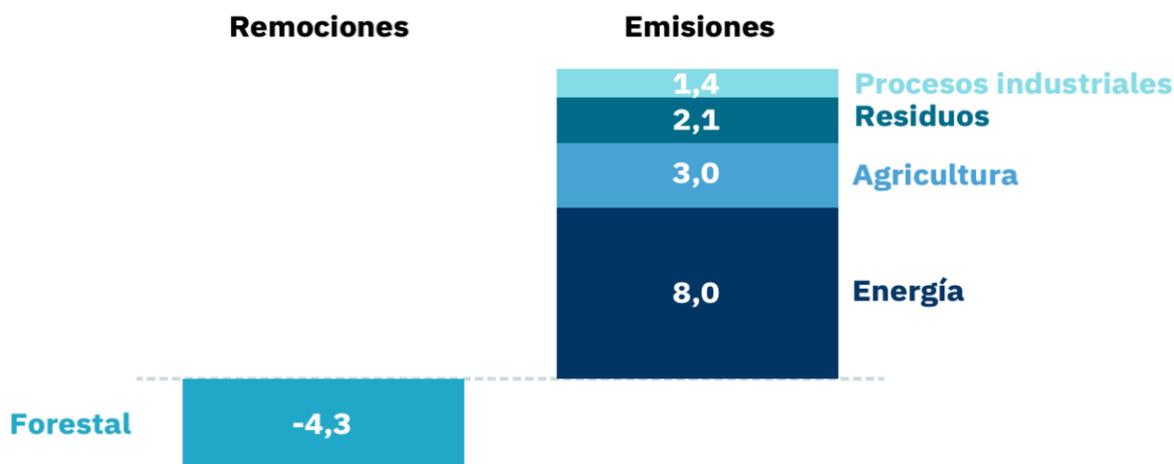
Comparación entre emisiones y remociones del sector forestal y las emisiones de otros sectores



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE, 2019b, terraPulse, proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023, Durán-Monge y Aragón, 2021 y el INGEI de IMN, 2021.

Para el año 2017 se estima un balance neto del sector forestal de -4,3 millones de tCO₂-e de remociones (que integra los balances por cambios en cobertura forestal, degradación y mejora de bosques permanentes). Si este nuevo balance se compara con los flujos de los otros sectores (gráfico 11), se observa que los resultados favorables derivados de esos procesos que generan remociones son insuficientes dados los niveles de emisiones de los sectores de energía, agricultura, residuos y procesos industriales. En conjunto las emisiones de estos sectores sumaron un total de 14.5 millones de tCO₂-e. Este resultado es de gran relevancia en materia de las políticas nacionales de carbono neutralidad y descarbonización.

Gráfico 11
Emisiones y remociones, según sector. 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de MINAE, 2019b, terraPulse, proyecto "Representación geoespacial histórica de Costa Rica", 2023, Durán-Monge y Aragón, 2021 y el INGEI de IMN, 2021.

Impulsores de la degradación forestal: perspectivas desde la revisión de literatura y algunas hipótesis

El análisis detallado de motores de degradación forestal requiere la integración de otras capas de información -como factores sociales, económicos y naturales- que expliquen los patrones identificados en las secciones anteriores. El desarrollo de este análisis va más allá del alcance de la presente investigación y se vislumbra como una línea de trabajo futuro. Sin embargo, en esta sección se realiza un ejercicio preliminar, basado en la revisión de literatura para el país y la región.

La tala ilegal es una de las fuentes de degradación forestal de origen antropogénica más importante (MINAE, 2017; Armenteras, 2016; Programa ONU-REDD -Silva Carbón-CATIE- Programa Regional de Cambio Climático USAID, 2016). Esta es motivada principalmente para el aprovechamiento de madera o con el objetivo de dar un uso distinto al suelo a través del establecimiento de tierras para desarrollar otras actividades.

Según MINAE (2017) en este tipo de procesos se tala el bosque ilegalmente (práctica conocida como socola) y una vez que se logra la disminución en la cobertura de copa, se solicitan permisos para aprovechamiento forestal de la madera remanente. Luego la persona propietaria decide si mantiene el terreno como pastizal para desarrollar ganadería o permite la regeneración del bosque. Según se detalla en dicha fuente, las diferencias en los requisitos para aprovechamiento en *Sistemas Agroforestales* y *Bosque Manejado*, y las deficiencias en el control del SINAC de esos requisitos, propician este fenómeno.

Así, en muchas ocasiones la degradación forestal se ha convertido en una etapa temprana de la deforestación, aunque en otros casos los bosques se mantienen degradados durante largos períodos de tiempo sin desaparecer por completo (Armenteras, 2016).

Informes más recientes (REDD+, 2021) indican que desde el año 2002 el MINAE ha atendido la degradación forestal al establecer estrategias de control de la tala ilegal y los permisos de

aprovechamiento forestal en tierras agrícolas. Se estima que 49% de los productos de madera provienen de plantaciones, 34% es importado, 12% de tierras agrícolas y sólo 5% de bosques naturales. Además, el programa de Pago de Servicios Ambientales (PSA) del MINAE es otra de las apuestas para enfrentar la degradación.

Aun así, dadas las tendencias observadas en la presente investigación en la degradación en bosques permanentes del año 2000 en adelante, no se puede descartar la hipótesis de que la tala ilegal continúe afectando los bosques permanentes del país tanto dentro como fuera de ASPPA. El último reporte de monitoreo de reducción de emisiones de REDD+ (2021) también reconoce que, a pesar de estos esfuerzos, la degradación ha aumentado significativamente a través de los períodos monitoreados.

Según se plantea en MINAE (2017) la falta de recursos para ejercer control por parte del Estado ante las acciones de precaristas, madereros ilegales, cazadores y mineros, sigue siendo una importante amenaza. Futuros estudios podrían basarse en esta metodología para abordar este fenómeno en detalle, con el objetivo de evaluar la efectividad de estas acciones institucionales.

La sustitución de bosques por otros usos más rentables -como cultivos o pastizales- es otro motor importante de degradación forestal (REDD+, 2021). La falta de reconocimiento del valor de los servicios ecosistémicos que brindan los bosques en parte incentiva esta sustitución; pues otras actividades brindan mayores beneficios económicos que la conservación con propósitos turísticos u otros esquemas de manejo forestal, incluso bajo el programa de PSA. De hecho, los análisis de REDD+ (2021) indican que la mayor parte de los bosques regenerados (bosques secundarios) eventualmente regresa al uso de suelo que tenía previo a la regeneración. Esto evidencia el efecto de acciones humanas para la recuperación de la capacidad productiva de la tierra sobre fenómenos como la degradación y la deforestación.

La falta de derechos sobre las tierras forestales es otro impulsor que está asociado al factor anterior (REDD+, 2021). Esto afecta principalmente a pequeños propietarios, pueblos indígenas y grupos no indígenas que ocupan territorios indígenas, pues evita que estas tierras sean incorporadas en el programa de PSA.

Varios autores reconocen también que los incendios forestales son un factor importante de degradación de los bosques en Costa Rica y la región (Thompson et al., 2013; MINAE, 2017; Bustamante et al., 2015; Armenteras, 2016; Programa ONU-REDD-SilvaCarbon-CATIE-Programa Regional de Cambio Climático de USAID, 2016). Según indica Thompson et al. (2013) tanto la frecuencia, como el alcance de los incendios se han incrementado por otros impulsores como la expansión de la agricultura y la ganadería, la fragmentación y la tala de bosques. Los efectos de los incendios forestales son múltiples, van desde afectaciones en la estructura de los bosques, reducción en su capacidad de almacenamiento de carbono, cambios en microclimas y afectaciones sobre la biodiversidad (Bustamante et al., 2015).

La fragmentación de los bosques también es otro de los procesos causantes de degradación en bosques tropicales en la región (Armenteras, 2016). Esta se genera por cambios en el uso del suelo derivados de intervenciones humanas, que reducen la superficie forestal y generan la división de tierras forestales en parches. Con el tiempo estos bloques pueden reducir su tamaño y ocasionar un aislamiento de los ecosistemas (Thompson et al. 2013). Como resultado se dan afectaciones en la composición, el funcionamiento y los procesos de esos ecosistemas, que

implican reducciones en las capacidades de almacenamiento de carbono e incrementan la susceptibilidad de los bordes -en los parches fragmentados- a perturbaciones como incendios u especies invasoras. De hecho, estos autores señalan que la fragmentación y los incendios están relacionados, pues se estima que la frecuencia de fuegos en bosques está asociada a su estado de fragmentación.

Además de estos impulsores de degradación forestal de carácter más antropogénicos, también hay otros que tienen su origen en eventos naturales. Entre estos factores se encuentran los procesos naturales de degradación de bosques, que se generan por el desarrollo de procesos biológicos propios dentro de estos ecosistemas.

Pero también la influencia de eventos meteorológicos, muchos de estos asociados con el cambio climático, son un motor de la degradación en los bosques. Factores como huracanes, fuertes vientos, cambios en los regímenes de distribución de precipitaciones, fenómenos como El Niño o La Niña, entre otros, pueden tener efectos directos sobre la cobertura de copa en bosques permanentes. También pueden afectar el desarrollo y salud de los árboles, que eventualmente se traducen en degradación y pérdida de capacidad para mitigar el cambio climático.

Los impulsores abordados en esta sección son algunos de los más destacados según la literatura para el caso de Costa Rica y los bosques tropicales en América Latina. Sin embargo, para abordar con la profundidad adecuada los motores asociados con los procesos analizados en esta investigación, se requiere un nuevo esfuerzo. Este se debe basar en una combinación de metodologías, de manera que integre herramientas como el análisis de datos de diversas fuentes, análisis de información espacial y trabajo de campo como entrevistas con actores clave y grupos vinculados al sector forestal. Este nuevo estudio es uno de los temas pendientes que se espera abordar como parte del trabajo futuro.

Conclusiones y trabajo futuro

El estudio demuestra la persistencia de procesos de degradación forestal fuera de ASPPA en miles de hectáreas de bosques permanentes del país. Estos daños han ocasionado la pérdida de existencias de C en esas tierras forestales y emisiones anuales promedio de 3,7 millones de tCO₂-e. Los procesos de degradación forestal se han intensificado en los últimos años. Se estima un aumento del 82,4% en la tasa de crecimiento del promedio anual de emisiones entre las décadas de los años 1990-1999 y 2010-2019. Además, se calcula un incremento en el *ratio* de emisiones por hectárea desde el año 2015 en adelante. Como resultado, en el ámbito de la degradación y mejora de bosques permanentes, el país muestra un balance neto como emisor de carbono durante las últimas tres décadas que asciende a 2,4 millones de tCO₂-e en el año 2019. En otras palabras, el potencial de mitigación dado por los procesos analizados en este trabajo es más bien negativo.

El análisis espacial muestra un patrón de concentración de los procesos de degradación y mejora en bosques permanentes. Se identifican sitios que concentran altas proporciones de emisiones y focos recurrentes de puntos calientes -que aparecen, desaparecen y vuelven a aparecer con el paso del tiempo-. Se trata de zonas de cientos de hectáreas de bosques que han perdido biomasa y existencias de C en varios momentos durante las últimas tres décadas. Estos patrones se traducen en un balance histórico entre emisiones y remociones por degradación y mejora de bosques negativo para todas las AC. Además, ciertas áreas de conservación han experimentado

pérdidas de sus depósitos de C con mayor intensidad, que impactan con mayor fuerza sus respectivos potenciales para enfrentar el cambio climático.

Una mirada más completa de los flujos del sector forestal -que incluye procesos de deforestación, reforestación, degradación y mejora en tierras forestales- muestra que, al incluir las estimaciones de emisiones por degradación y mejora en la ecuación del sector, se obtiene un deterioro en su balance neto. Tomando como referencia el año 2019, si bien el balance continúa siendo positivo, los flujos asociados a la degradación en bosques permanentes implican una reducción del 42,1% en las remociones netas del país, al pasar de un balance de 5,7 millones de tCO₂-e a uno de 3,3 millones de tCO₂-e. Esto significa una reducción importante en el potencial del sector forestal y el país para la mitigación del cambio climático.

Así, los hallazgos reflejan el logro alcanzado en materia de la significativa reducción de emisiones por deforestación, pero también evidencian que los esfuerzos se han concentrado en esa línea de acción y como resultado, los procesos de degradación forestal parecen estar desatendidos. De hecho, las emisiones por degradación en bosques permanentes ya superan las generadas por procesos de deforestación. Es importante aclarar que detrás de este aumento en las emisiones por degradación pueden existir tanto motores antropogénicos, como naturales. Como se menciona al final de esta sección, la identificación de estos impulsores y la cuantificación del peso que tiene cada uno, requiere una investigación adicional, que forma parte futuras líneas de investigación que se espera abordar.

Esta investigación aspira a generar cuatro tipos de aportes en materia de contabilidad de carbono asociada a la degradación forestal. En primer lugar, buscar dar una visión histórica y espacialmente explícita del estado de situación de estos procesos que afectan los bosques permanentes de Costa Rica. Estos hallazgos son nuevos conocimientos para una discusión del tema basada en datos, el posicionamiento de la degradación forestal como una problemática que debe ser atendida y el diseño de política en el sector forestal para resguardar el capital natural del país y su potencial de mitigación del cambio climático.

Otro aporte es de carácter metodológico. Los métodos y protocolos de procesamiento utilizados son innovadores y aprovechan nuevas fuentes de datos espaciales basados en información de todo el territorio nacional. Esto implica a su vez técnicas distintas de preparación y análisis de datos, que permitan obtener estimaciones ajustadas a la definición de bosque del país. Así, el abordaje brinda nuevo conocimiento metodológico para una posible futura inclusión de las emisiones derivadas de estos procesos en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) y el nivel de referencia de la estrategia REDD+.

El tercer aporte es conceptual. Los hallazgos derivados del indicador de emisiones por hectárea proponen una definición más robusta de degradación forestal para el país. Esta redefinición plantea descontar el peso de la degradación natural a la que también están expuestos los bosques permanentes fuera de las ASPPA. Este elemento no es menor y tiene importantes implicaciones en términos de la contabilidad nacional de carbono y de política pública. El uso de este enfoque distinto produce estimaciones diferentes de emisiones antropogénicas, que consideran que en las áreas de influencia de actividad antropogénica -i. e. fuera de ASPPA-, no se puede aspirar a tener emisiones menores a las generadas por procesos naturales -i. e. las emisiones registradas dentro de ASPPA-. Como resultado el planteamiento de futuras metas del país para atender la degradación y reducir sus emisiones podría contemplar este enfoque.

Por último, los resultados demuestran el potencial de la combinación de estas fuentes y técnicas para el desarrollo de instrumentos de inteligencia espacial. Estas herramientas pueden orientar la toma de decisiones y el monitoreo de procesos en bosques permanentes y otras tierras forestales. La combinación de datos históricos con información de gran detalle espacial puede dar luces sobre cómo canalizar recursos de manera más eficiente para resguardar y potenciar los bosques permanentes. Además, la integración de técnicas prospectivas de estadística espacial puede ser un punto de partida para la detección de puntos calientes y picos de degradación forestal de manera temprana.

En conjunto, estos cuatro tipos de aportes representan conocimientos inéditos que, bien aprovechados, se pueden convertir en insumos para identificar objetos concretos de política pública. Estos van desde el desarrollo de herramientas de inteligencia espacial para la localización de territorios que requieren acciones para detener, revertir o mejorar los procesos analizados, hasta el diseño de nuevos lineamientos de contabilidad de GEI. Este segundo aspecto en el fondo puede significar cambios en los ingresos que percibe el país por su participación en los mercados globales de carbono. La metodología propuesta, la clasificación de procesos según su ubicación en relación con ASP y los resultados del análisis, también son insumos para futuras evaluaciones del desempeño ambiental del país, que incluso se podrían convertir en herramientas de gestión para el SINAC.

Las alternativas de investigación y trabajo futuro ligadas a este estudio son varias. Uno de los retos pendientes es el análisis de los impulsores de la degradación forestal. Esto implica combinar otras fuentes de información para correlacionar los resultados de esta investigación con factores socioeconómicos o naturales, que expliquen los patrones identificados. El uso de trabajo de campo y de metodologías de discusión participativa son buenas alternativas para el desarrollo de este tipo de análisis que permitan entender los motores históricos asociados a estos procesos.

Otra línea de trabajo pendiente es una comparación detallada entre metodologías de estimación de degradación forestal. Esta debe considerar el contraste de i) el abordaje y resultados de esta ponencia, contra ii) el método actual utilizado por la Estrategia REDD+ basado en muestras de imágenes satelitales de alta resolución y iii) una tercera metodología a partir de mapas de biomasa generados mediante sensores y teledetección. Este trabajo implica el uso de tests estadísticos y otras herramientas comparativas. Como parte de la validación de los datos de *terraPulse*, se hicieron algunos ejercicios en esta línea, pero las posibilidades para profundizar e identificar la metodología más apropiada son amplias.

Como parte de futuros esfuerzos de investigación, se debe considerar la estimación de la incertidumbre asociada a la metodología de este trabajo. Esto amerita la propagación de las medidas de incertidumbre de cada una de las fuentes mediante el método de Montecarlo, pero aplicado según el contexto espacial de los datos. Las mejoras metodológicas que permitan reducir la incertidumbre se pueden traducir en el acceso del país a un mayor reconocimiento económico por la disminución de emisiones.

Bibliografía

- Agresta-Dimap-UCR-UPM. 2015. Informe Final: Generating a consistent historical time series of activity data from land use change for the development of Costa Rica's REDD plus reference level: Protocolo metodológico. Informe preparado para el Gobierno de Costa Rica bajo el Fondo de Carbono del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF).
- Armenteras, D. et al. 2016. Degradación de bosques en Latinoamérica síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales. IBERO-REDD+.
- BID. 2021. Latin America and Caribbean Forests in the 2020s: Trends, Challenges, and Opportunities. En: <<https://publications.iadb.org/en/latin-american-and-caribbean-forests-2020s-trends-challenges-and-opportunities>>.
- Budiharta, S. et al. 2014. Restoring degraded tropical forests for carbon and biodiversity. En *Environmental Research Letters*, 9 (114020).
- Bustamante, M. et al. 2015 Towards an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Glob Change Biol*. Accepted Author Manuscript. doi:10.1111/gcb.13087
- Cifuentes, M. 2008. Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in tropical secondary forests growing in six life zones of Costa Rica. [Tesis de Doctorado, Oregon State University]. En: <http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/cifuentes_m._2008_-_dissertation_agb_secondary_forests_cr.pdf>
- Durán-Monge, E. y Aragón, A. 2021. Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica durante el período 1986-2019. San José: PEN, Conare.
- FAO. 2013. Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales. Estudio FAO Montes N° 172. Roma: FAO.
- IMN. 2021. Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica, 1990-2017. San José: IMN.
- IPCC. 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. 2021. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. En: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html>
- Maxwell, S.L. et al. 2019. Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. En: *Science Advances*, 5.
- Minae. 2017. Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica. En: <https://redd.unfccc.int/files/4863_1_fon_estrategia_red_cr_lr.pdf>.
- Minae. 2019a. Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. En: <<https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>>.

- Minae. 2019b. Technical Annex of the Republic of Costa Rica in accordance with the provisions of decision 14 / cp. 19.
- Morison, J. et al. 2012. Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain. Edimburgo: Forestry Commission.
- Olofsson, P. et al. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. En: Remote Sensing of Environment, 148 (42-57).
- Pedroni, L. y Villegas, J. 2016. Manual de la Herramienta Excel “AAAA.MM.DD - FREL&MRV TOOL CR.xlsx.” Carbon Decisions International. En: <https://drive.google.com/file/d/14CsE_rpBBREJgyUTplziKKsGGVm_YtL_/view?usp=sharing>.
- Programa ONU-REDD-SilvaCarbon-CATIE-Programa Regional de Cambio Climático de USAID. 2016. Informe sobre el primer taller sobre degradación: Elementos para la definición, método y herramientas. En: <<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9415>>.
- REDD+. 2021. ER Monitoring Report (ER-MR). En: <pendiente consultar con REDD+>.
- terraPulse. 2022. Technical Report. En: <pendiente consultar con REDD+>.
- Thompson, I. et al. 2013 An Operational Framework for Defining and Monitoring Forest Degradation. Ecol Soc 18:art20. doi: 10.5751/ ES-05443-180220
- USAID-REDD+. 2015. Definiendo la Reducción de Emisiones por Degradación Forestal en el Marco de REDD+ en Costa Rica. En: <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9387/Definiendo_la_reduccion_de_emisiones_por_degradacion_forestal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.