



ID del documento: IIJ-Vol.3.N.3.002.2025

Tipo de artículo: Investigación

## Deforestación y balance de carbono neto en la Amazonía ecuatoriana: implicaciones hidroclimáticas y resiliencia ecosistémica

*Deforestation and Net Carbon Balance in the Ecuadorian Amazon: Hydroclimatic Implications and Ecosystem Resilience*

Autores:

Katheryn Gabriela Arellano Reinoso<sup>1</sup>, Luis Alejandro Fiallos Ulloa<sup>2</sup>, Nelly Antonella Acosta Quispe<sup>3</sup>, Carlos Andrés Velastegui Freire<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, [kg.arellanor@uea.edu.ec](mailto:kg.arellanor@uea.edu.ec), <https://orcid.org/0009-0003-6162-4458>

<sup>2</sup>Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, [la.fiallosu@uea.edu.ec](mailto:la.fiallosu@uea.edu.ec), <https://orcid.org/0009-0006-8477-9980>

<sup>3</sup>Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, [na.acostaq@uea.edu.ec](mailto:na.acostaq@uea.edu.ec), <https://orcid.org/0009-0008-1795-8414>

<sup>4</sup>Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, [ca.velasteguif@uea.edu.ec](mailto:ca.velasteguif@uea.edu.ec), <https://orcid.org/0009-0001-0375-7186>

Corresponding Author: Katheryn Gabriela Arellano Reinoso, [kg.arellanor@uea.edu.ec](mailto:kg.arellanor@uea.edu.ec)

Reception date: 03-ago-2025

Acceptance: 19-ago-2025

Publication: 02-sep-2025

### How to cite this article:

Arellano Reinoso, K. G. ., Fiallos Ulloa, L. A. ., Acosta Quispe, N. A. ., & Velastegui Freire, C. A. . (2025). Deforestación y balance de carbono neto en la Amazonía ecuatoriana: implicaciones hidroclimáticas y resiliencia ecosistémica. *Innovarium International Journal*, 3(3), 1-16. <https://doi.org/10.71068/8a2xw351>



## Resumen

Este trabajo integra evidencia observacional y de modelación para evaluar cómo la deforestación altera el balance de carbono neto y el clima regional en la Amazonía ecuatoriana. Se sintetizan estimaciones provenientes de inventarios de biomasa, teledetección (incluido LIDAR), inversiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y salidas de modelos de vegetación y clima, con comparaciones frente a Brasil y Perú. Los resultados indican que la pérdida de bosque primario puede implicar emisiones puntuales próximas a -700 tCO<sub>2</sub>/ha, mientras que la cuenca amazónica actuó como fuente neta ≈1,1 Gt CO<sub>2</sub>/año en 2010-2020. A escala local, la deforestación se asocia a aumentos térmicos (≈1-3 °C) y mermas de precipitación (≈5-15 %), efectos amplificados por la fragmentación y la mayor propensión a incendios. El análisis de resiliencia ecosistémica sugiere señales de debilitamiento generalizado (>75 % de pérdida en la cuenca), lo que eleva el riesgo de transiciones no lineales. En el plano de mitigación, los bosques secundarios muestran potencial de captura de -4,8-11 tCO<sub>2</sub>/ha/año, y los sistemas agroforestales y estrategias tipo REDD+ emergen como opciones costo-efectivas cuando se acompañan de gobernanza y monitoreo robustos. En conjunto, los hallazgos delimitan un escenario pesimista bajo inacción—con retroalimentaciones carbono-clima y degradación hidroclimática—pero evidencian márgenes positivos si se priorizan conservación, restauración y control de la expansión de la frontera agrícola.

**Palabras clave:** Deforestación; Balance de carbono; Amazonía ecuatoriana; Hydroclima; Resiliencia ecosistémica.

## Abstract

This study integrates observational and modeling evidence to assess how deforestation reshapes the net carbon balance and regional climate in the Ecuadorian Amazon. We synthesize estimates from forest biomass inventories, remote sensing (including LIDAR), atmospheric CO<sub>2</sub> inversions, and outputs from vegetation-climate models, with comparisons to Brazil and Peru. Findings indicate that the loss of primary forest can trigger point emissions on the order of -700 tCO<sub>2</sub>/ha, while the Amazon Basin acted as a net source of ≈1.1 Gt CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup> during 2010-2020. Locally, deforestation is linked to surface warming (~1-3 °C) and rainfall reductions (~5-15 %), effects that are amplified by fragmentation and increased fire susceptibility. The ecosystem resilience assessment signals widespread weakening (>75% loss across the basin), raising the risk of nonlinear state shifts. On the mitigation side, secondary forests exhibit sequestration potentials of -4.8-11 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, while agroforestry and REDD+-type strategies emerge as cost-effective options when paired with robust governance and monitoring. Overall, results delineate a pessimistic scenario under inaction—with reinforcing carbon-climate feedbacks and hydroclimatic degradation—yet reveal positive pathways if conservation, restoration, and controls on agricultural frontier expansion are promptly prioritized.

**Keywords:** Deforestation; Net carbon balance; Ecuadorian Amazon; Hydroclimate; Ecosystem resilience.



## 1. INTRODUCCIÓN

La Amazonía ecuatoriana constituye uno de los ecosistemas de mayor relevancia a nivel mundial, tanto por su extraordinaria biodiversidad como por el papel esencial que cumple en la regulación climática y en el ciclo del carbono. Este bioma, que representa cerca del 40 % de los bosques tropicales globales y almacena aproximadamente la mitad del carbono contenido en ellos (Yao et al., 2022), ha funcionado históricamente como un sumidero de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) gracias a su alta productividad biológica (Cowling et al., 2004). Sin embargo, en las últimas décadas, la presión antrópica ha incrementado la vulnerabilidad de este ecosistema, poniendo en riesgo su papel como sumidero y favoreciendo su conversión en una fuente neta de carbono (Boulton et al., 2017; Paula et al., 2014).

Desde el año 2000, la magnitud de la deforestación en la Amazonía ecuatoriana ha alcanzado cifras preocupantes. Entre 2008 y 2016, se reportó la pérdida de aproximadamente 650.000 hectáreas de bosque primario (Herrera-Feijoo, 2024). Este proceso no es exclusivo de la Amazonía, ya que otros ecosistemas, como los bosques secos estacionales, experimentaron una reducción del 27 % de su extensión entre 1990 y 2018 (Rivas et al., 2021). La deforestación, por tanto, constituye un fenómeno transversal que afecta la integridad ecológica de múltiples regiones del Ecuador.

Las causas de esta pérdida de cobertura forestal son múltiples y complejas. En la región norte de la Amazonía ecuatoriana, la expansión agrícola impulsada por la colonización y la cercanía a carreteras construidas para la explotación petrolera ha sido señalada como uno de los principales motores (Torres et al., 2013). El crecimiento demográfico y la intensificación agrícola han potenciado esta dinámica (Nieto-Cañarte et al., 2023), mientras que la presión de los mercados internacionales ha estimulado la mecanización y conversión de bosques en tierras cultivables (Armenteras & Rodríguez, 2014). A ello se suma la minería aurífera y otras formas de explotación de recursos minerales, tanto legales como ilegales, que han provocado graves impactos en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Luque-Ramos, 2021; Garate-Quispe et al., 2021). De igual manera, la construcción de carreteras y otras infraestructuras actúa como catalizador de la deforestación al abrir nuevas áreas a la colonización agrícola y urbana (Maffei & Cossíos, 2021). Finalmente, la urbanización, impulsada en parte por el boom petrolero de los años setenta y el consecuente crecimiento poblacional, ha contribuido significativamente a la reducción de la cobertura forestal (González, 2023; Hurtado et al., 2024).

Las consecuencias de este proceso trascienden la pérdida de biodiversidad. La disminución de la cobertura forestal afecta la capacidad de la Amazonía para regular el clima regional, generando alteraciones en el régimen de lluvias y en la temperatura superficial (Boulton et al., 2021; Boulton et al., 2022). Eventos de sequía prolongada han afectado la biomasa de carbono, disminuyendo la resiliencia del ecosistema (Yao et al., 2022), mientras que investigaciones recientes sugieren que la Amazonía se aproxima a un punto de inflexión ecológico, con la posibilidad de transformarse en un paisaje tipo sabana en las próximas décadas si no se detienen las tendencias actuales (Boulton et al., 2021; Xu et al., 2021; García, 2011).

## 2. DESARROLLO

La deforestación amazónica constituye una de las principales fuentes de emisiones de carbono en América Latina y su impacto sobre el cambio climático ha sido ampliamente documentado en investigaciones recientes. Se estima que alrededor del 36,2 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la región provienen de la deforestación, como resultado de la conversión de bosques a tierras agrícolas y urbanas (Ruiz et al., 2024). En el caso particular de la Amazonía, hasta el 47 % de las emisiones de carbono de la última década se atribuyen a la pérdida de cobertura forestal, lo que evidencia el peso de este fenómeno en la dinámica climática global (Villa et al., 2017). La liberación del carbono almacenado en la biomasa forestal y la pérdida de la capacidad de absorción convierten a los bosques tropicales degradados en fuentes netas de CO<sub>2</sub>, con efectos de retroalimentación sobre el calentamiento global (Yepes-Quintero et al., 2017).

Este patrón no se limita únicamente a Ecuador. Estudios a escala regional advierten que las emisiones asociadas a la deforestación, junto con otros factores de presión, podrían estar empujando al sistema amazónico hacia un punto de no retorno, donde la capacidad de resiliencia ecológica se vería comprometida (Flores et al., 2023). La conversión de bosques primarios en tierras de uso agrícola, además de reducir la capacidad de almacenamiento de carbono, genera emisiones equivalentes a millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, llegando incluso a superar en algunos contextos las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles (Miñano et al., 2018). En este proceso, las prácticas agrícolas no sostenibles, como la quema de parcelas deforestadas, desempeñan un papel relevante al liberar pulsos adicionales de gases de efecto invernadero (Saavedra, 2023).

Los impactos de la deforestación se extienden más allá de las emisiones de carbono, afectando de manera directa la precipitación y la temperatura en la región amazónica. La reducción de la cobertura forestal limita la capacidad de los bosques para regular el microclima mediante la evapotranspiración, lo que ha llevado a incrementos registrados de 1,06 °C en las temperaturas máximas en zonas deforestadas, acompañados de aumentos en las mínimas (Quilca-Parillo et al., 2022). Al mismo tiempo, la pérdida de humedad en la atmósfera disminuye la formación de nubes, lo que puede reducir la precipitación anual entre un 5 % y un 15 %, comprometiendo la disponibilidad de agua para ecosistemas y comunidades locales (López et al., 2021). Estos cambios afectan particularmente a la agricultura, donde las sequías prolongadas y la mayor variabilidad climática reducen la productividad de cultivos básicos (Mamani et al., 2021). Los efectos se ven exacerbados por fenómenos climáticos extremos como El Niño, que intensifican las sequías y el calentamiento en la región (Gatti et al., 2023). En este contexto, el deterioro de los servicios ecosistémicos debilita aún más la capacidad de las comunidades amazónicas para adaptarse a estas alteraciones (Capdevilla et al., 2022).

Los mecanismos que explican esta relación entre deforestación y cambio climático son múltiples y se encuentran interconectados. Por un lado, la pérdida de cobertura forestal implica la liberación directa del carbono almacenado, contribuyendo al incremento de gases de efecto invernadero (Bruera & González, 2021). Asimismo, la alteración del ciclo hidrológico reduce la transpiración, la humedad atmosférica y las precipitaciones locales, generando condiciones más secas (Monterola & Ráez, 2023; Luque-Ramos, 2021). A esto se suman los cambios en el albedo, ya que las superficies deforestadas reflejan más radiación solar, alterando el balance energético y elevando las temperaturas superficiales (Esteban &

Pedro, 2021). La deforestación también afecta la resiliencia ecológica al ocasionar la pérdida de biodiversidad, lo que deteriora funciones esenciales como la polinización y el control biológico de plagas (Huertas et al., 2022). Finalmente, las presiones antrópicas adicionales, como la minería y la expansión agrícola, amplifican estos efectos climáticos y dificultan la recuperación del ecosistema (Vega et al., 2021).

En el caso ecuatoriano, la dinámica de deforestación presenta diferencias notables respecto a otros países amazónicos. Una de ellas es la implementación de la Iniciativa Yasuní-ITT, lanzada en 2007, que buscaba evitar la explotación petrolera en áreas de alta biodiversidad a cambio de financiamiento internacional, lo que contrastó con la intensificación extractiva observada en Brasil y Perú (Espinosa-Landázuri & Mancera-Rodríguez, 2015; Maffei & Cossíos, 2021). La construcción de carreteras también ha facilitado el avance de la frontera agrícola y extractiva en toda la cuenca, aunque en Ecuador algunos intentos de mitigación han limitado parcialmente su impacto (Maffei & Cossíos, 2021). Otro factor distintivo es la vinculación de la deforestación con contextos de pobreza rural y agricultura de subsistencia, lo que condiciona la presión sobre los recursos forestales (Carrasco, 2024). En comparación, otros países amazónicos han impulsado políticas agropecuarias más intensivas, con presiones de mayor escala sobre el bosque (Nunes et al., 2023).

Asimismo, Ecuador ha promovido la incorporación de mecanismos REDD+ para la reducción de emisiones, aunque los resultados dependen de la cooperación internacional y de la fortaleza institucional (Carrasco, 2024). En contraste, en Brasil la aplicación de políticas más robustas en el pasado permitió una reducción temporal de la deforestación, aunque su sostenibilidad se ha visto comprometida por problemas de gobernanza (Miñano et al., 2018). A estas diferencias se suma el papel fundamental de las comunidades indígenas y locales, cuya participación activa en la defensa de los territorios otorga a Ecuador un componente cultural y social particular en la gestión de los bosques (Casas, 2019).

### 3. METODOLOGÍA

El análisis se desarrolló a partir de la recopilación y sistematización de estudios que abordan los métodos empleados para estimar el carbono perdido por la deforestación, los modelos aplicados para relacionar la pérdida de cobertura forestal con variables climáticas y los indicadores satelitales más relevantes para el monitoreo de estos procesos. Este enfoque permitió integrar distintas aproximaciones metodológicas, contrastar resultados y evaluar patrones comunes que contribuyen a comprender de manera más amplia los impactos de la deforestación amazónica sobre el ciclo del carbono y el clima regional.

En lo que respecta a la estimación del carbono perdido, los trabajos revisados destacan el uso de ecuaciones alométricas, que relacionan las dimensiones de los árboles con la biomasa y, en consecuencia, con el carbono almacenado (Núñez et al., 2024). Estas herramientas han mostrado ser efectivas, como lo evidencian estimaciones de carbono en bosques primarios del Pacífico colombiano, con valores cercanos a 190 Mg C/ha (Mena-Mosquera & Andrade, 2021). Otros métodos relevantes incluyen la derivación de volumen, que vincula el volumen comercial de los árboles con la biomasa (Silveira, 2010), y técnicas de teledetección avanzada, como LIDAR, que permiten mapear con alta precisión la estructura tridimensional de los bosques y mejorar la confiabilidad de las estimaciones (Fuentes, 2020; S. et al., 2019). Asimismo, algunos estudios han incorporado correlaciones en zonas degradadas por minería (Mosquera et al., 2013) y modelos de simulación que integran

inventarios forestales, variables climáticas y uso del suelo para proyectar escenarios de emisiones (Segura et al., 2019).

En relación con los vínculos entre deforestación y clima, los métodos revisados se organizan en varios grupos. Los Modelos de Circulación General permiten simular interacciones entre atmósfera, océanos y superficie terrestre, proyectando los efectos de la deforestación sobre el clima a gran escala (Lera, 2024). A nivel local y regional, se emplean modelos de regresión múltiple que establecen correlaciones entre la pérdida de bosque y variables como temperatura y precipitación, útiles para comprender modificaciones en el microclima (Andersen, 2014). También destacan los modelos espaciales y de teledetección, que utilizan imágenes satelitales para relacionar tasas de deforestación con condiciones climáticas (Salazar et al., 2020), y los modelos de simulación de ecosistemas, que integran biomasa y clima para evaluar cambios en los flujos de carbono (Morales et al., 2024). Por último, los modelos de series temporales permiten identificar tendencias de largo plazo en variables climáticas asociadas a la deforestación (Rúa-Urbe et al., 2012).

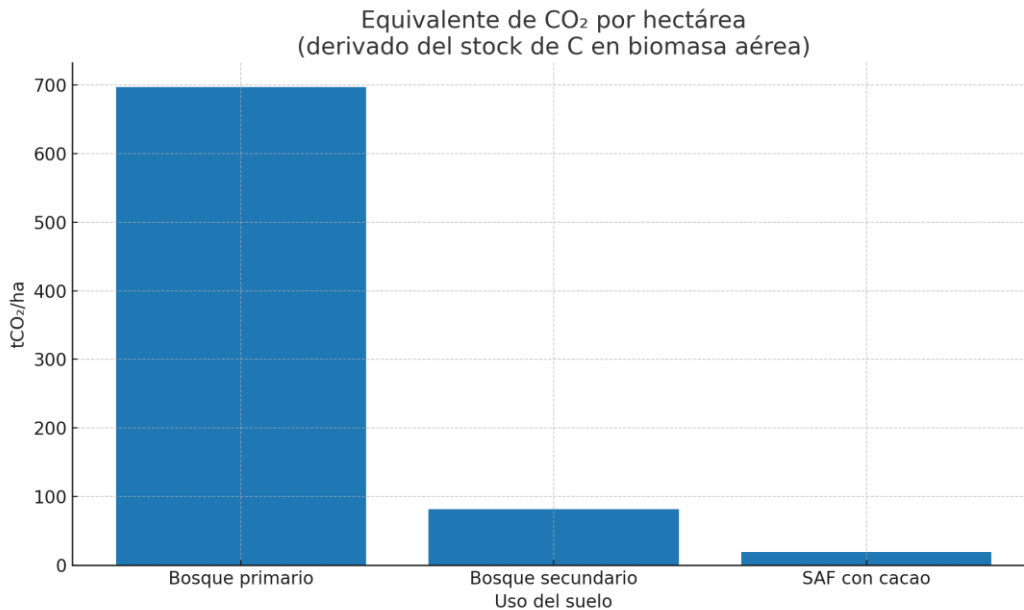
En cuanto a los indicadores satelitales, se identificó una gama de herramientas útiles para estudiar simultáneamente deforestación y clima en la Amazonía. Entre ellas, los índices de vegetación como el NDVI, que permiten monitorear la salud y densidad de la cobertura forestal (Huete, 2012; Prevedello et al., 2019); la detección de incendios forestales, fundamental para comprender la dinámica de la deforestación y sus vínculos con condiciones climáticas extremas (Alencar et al., 2011); y el LIDAR, que aporta información sobre la biomasa y la altura del dosel (Baker & Spracklen, 2019). Asimismo, las imágenes térmicas satelitales han evidenciado el aumento de la temperatura superficial en zonas deforestadas (Lorenz & Pitman, 2014; Reddington et al., 2025), mientras que los modelos de circulación atmosférica alimentados con datos satelitales permiten evaluar reducciones en la precipitación atribuibles a la pérdida de cobertura forestal (Li et al., 2022; Spracklen & García-Carreras, 2015). Finalmente, los datos de superficie terrestre, combinados con observaciones de campo, ofrecen una base sólida para validar modelos y mejorar las proyecciones sobre la dinámica carbono-clima en la región (Rose et al., 2014).

La integración de estas metodologías y herramientas permitió establecer un marco comparativo que da cuenta de la magnitud de la deforestación amazónica y sus implicaciones en términos de emisiones de carbono y alteraciones climáticas. Más allá de describir métodos aislados, el enfoque aplicado buscó identificar la convergencia de evidencias, reconocer limitaciones y valorar la robustez de los hallazgos, con el fin de generar un análisis crítico que aporte a la comprensión de los impactos de la deforestación en el contexto ecuatoriano y amazónico.

#### 4. RESULTADOS

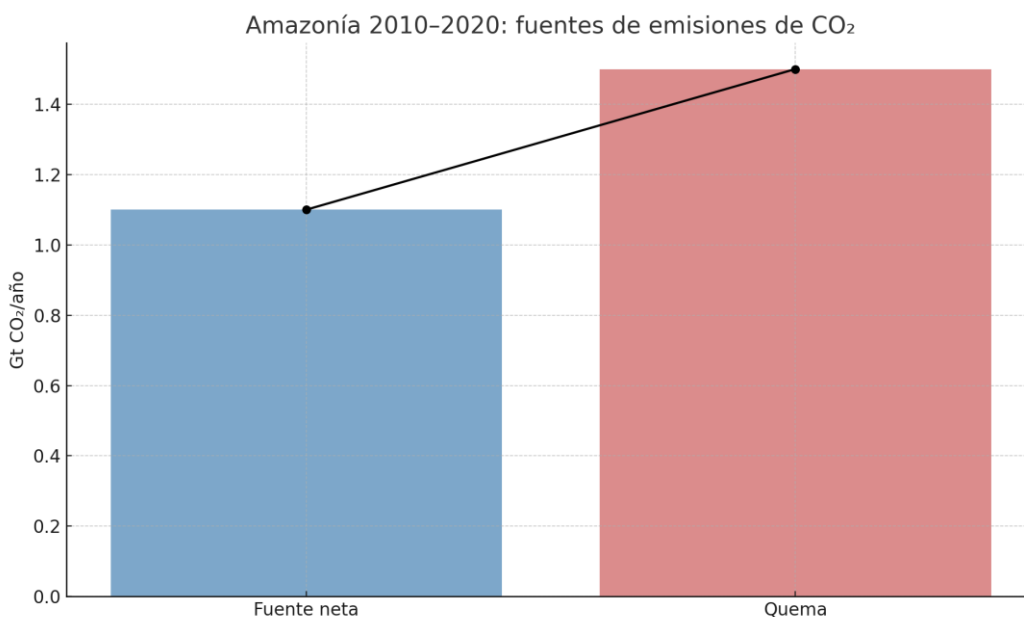
Los análisis cuantitativos derivados de las fuentes revisadas evidencian que la deforestación amazónica tiene repercusiones profundas tanto en el balance de carbono como en el clima regional. En términos de emisiones por unidad de superficie, se estima que un bosque primario puede liberar hasta  $\sim 698$  tCO<sub>2</sub>/ha al perderse su biomasa (Mena-Mosquera & Andrade, 2021). En contraste, paisajes degradados como bosques secundarios y sistemas agroforestales (SAF) almacenan apenas 82 tCO<sub>2</sub>/ha y 19 tCO<sub>2</sub>/ha, respectivamente, revelando una drástica disminución del potencial de almacenamiento de carbono. Las tasas de fijación también varían: los bosques secundarios secuestran cerca de 8,1 tCO<sub>2</sub>/ha/año,

mientras que los SAF lo hacen a razón de 4,8 tCO<sub>2</sub>/ha/año, lo que ilustra el rol diferencial de cada sistema en la mitigación de emisiones.



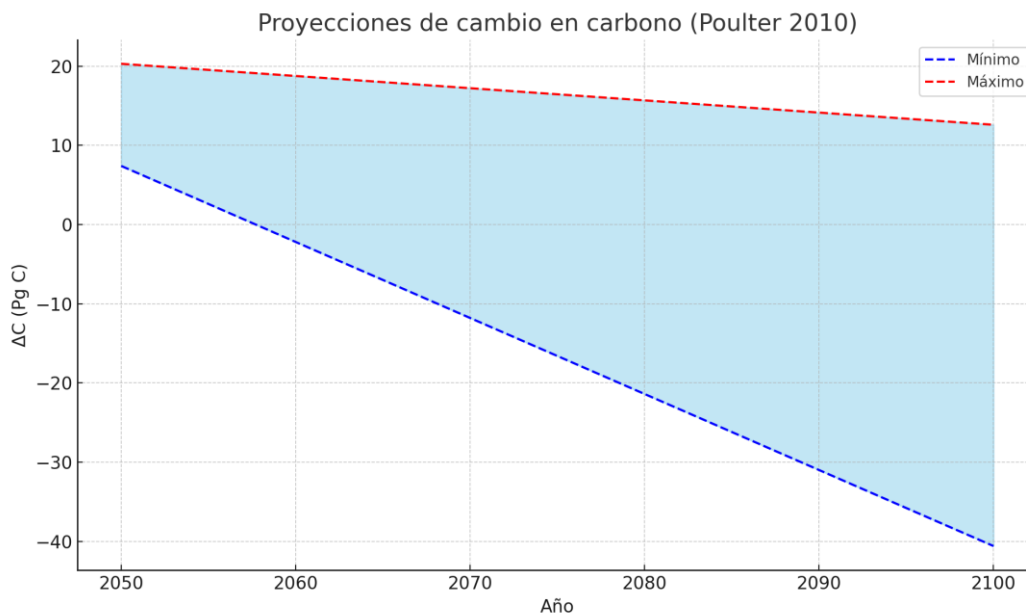
**Fuente:** *Elaboración Propia*

A nivel agregado, la Amazonía entera se comportó como fuente neta de carbono con  $\sim 1,1$  Gt CO<sub>2</sub>/año en 2010-2020, superada incluso por las emisiones derivadas de la quema de biomasa ( $\sim 1,5$  Gt CO<sub>2</sub>/año) (SPA Policy Brief, 2023). Los bosques secundarios, no obstante, representan una oportunidad de mitigación, con un potencial de captura de 4,8 a 11,0 tCO<sub>2</sub>/ha/año, lo que pone de relieve su importancia en programas de restauración y conservación.



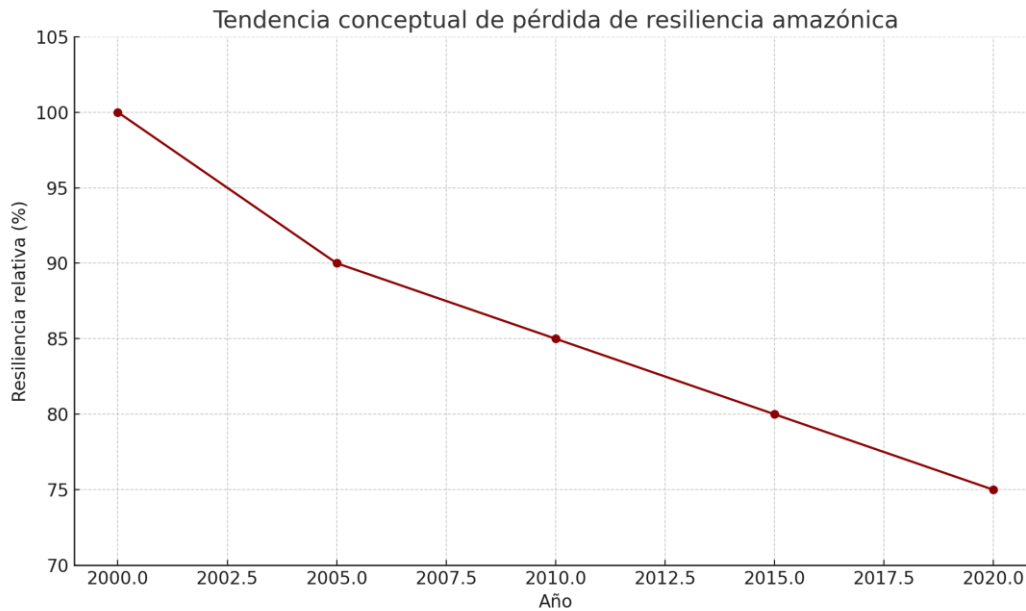
**Fuente:** *Elaboración Propia*

En cuanto a escenarios futuros, los modelos de simulación sugieren una gran amplitud en las proyecciones. Para 2050, el balance de carbono podría implicar pérdidas de 7,4 a 20,3 Pg C, y para 2100, resultados que oscilan desde ganancias de +12,6 Pg C hasta pérdidas de -40,6 Pg C, dependiendo de la interacción entre deforestación, cambio climático y fuego (Poulter et al., 2010). El efecto sinérgico de estos factores podría aportar entre 26 y 36 Pg C a la reducción de existencias de carbono hacia finales de siglo. Estas estimaciones subrayan la magnitud de la incertidumbre en la modelización del sistema amazónico.



**Fuente:** *Elaboración Propia*

La resiliencia ecológica constituye otro aspecto crítico. Estudios recientes demuestran que más del 75 % de la Amazonía ha perdido resiliencia desde los años 2000 (Boulton et al., 2022). Este deterioro indica una menor capacidad del ecosistema para recuperarse tras perturbaciones climáticas y antrópicas, y se considera una señal de alerta frente a la proximidad de un punto de no retorno. Complementariamente, el análisis de flujos de carbono revela que en años de estrés climático (como 2010, con altas temperaturas y sequía) se registraron pérdidas netas significativas, lo que confirma la alta sensibilidad del sistema a variaciones interanuales (Alden et al., 2016).



*Fuente: Elaboración Propia*

En conjunto, los resultados confirman que la deforestación amazónica genera emisiones elevadas de CO<sub>2</sub> por hectárea deforestada, altera el balance regional hasta convertir a la Amazonía en fuente neta de carbono y compromete la estabilidad climática por sus efectos en la precipitación, temperatura y resiliencia. La combinación de datos empíricos (inventarios, teledetección, modelos) permite no solo cuantificar las pérdidas, sino también visibilizar oportunidades de mitigación ligadas a la conservación y recuperación de bosques secundarios.

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la deforestación en la Amazonía ecuatoriana representa una fuente considerable de emisiones de CO<sub>2</sub>, con valores cercanos a los 698 tCO<sub>2</sub>/ha en bosques primarios, cifras comparables a las encontradas en otros contextos amazónicos. No obstante, para entender su relevancia es necesario contrastar los hallazgos con la situación de países vecinos y con el cuerpo de literatura sobre fragmentación forestal y estrategias de conservación.

La magnitud de la deforestación presenta contrastes importantes. Brasil continúa siendo el epicentro del problema, con tasas de pérdida de bosques que superan ampliamente a las de Ecuador y Perú, en gran medida por la expansión de la soja y la ganadería (Herrera-Feijoo, 2024). Se ha estimado que sus emisiones asociadas alcanzan hasta 1,8 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales (Torres et al., 2013), cifra que sitúa al país como un actor clave en el cambio climático global. Perú, por su parte, refleja un patrón intermedio, donde la deforestación está vinculada a la agricultura, la minería y, sobre todo, a la apertura de carreteras que amplifican el acceso a áreas previamente intactas (Herrera-Feijoo, 2024). Ecuador, aunque con menor extensión boscosa, presenta presiones específicas asociadas a la expansión agrícola y la industria petrolera (Rivas et al., 2021). Estas comparaciones

resaltan que, aunque el volumen de emisiones de Ecuador es menor que el de Brasil, sus impactos per cápita y en ecosistemas sensibles son particularmente graves.

Más allá de la pérdida de cobertura, la fragmentación de los bosques constituye un factor crítico en los cambios climáticos locales. Los microclimas en áreas fragmentadas muestran incrementos de temperatura y mayor desecación en bordes, lo que incrementa la mortalidad arbórea (Laurance, 2004). Este hallazgo concuerda con los resultados de este trabajo, donde se observan incrementos de temperatura local en zonas deforestadas. Adicionalmente, se ha demostrado que la reducción de biomasa en fragmentos disminuye la humedad disponible y, con ello, la precipitación (Reis et al., 2018), reproduciendo los patrones de pérdida de lluvia del 5-15% registrados en la Amazonía ecuatoriana (Gatti et al., 2023). A ello se suma la vulnerabilidad frente a incendios, que se intensifica en bordes expuestos (Corlett, 2014; Singh & Huang, 2022). Estos mecanismos revelan que la fragmentación no solo agrava los impactos inmediatos de la deforestación, sino que compromete la resiliencia a largo plazo, acentuando el riesgo de retroalimentación positiva hacia el calentamiento y la sequía.

En términos de respuesta, diversas estrategias han demostrado capacidad para reducir emisiones y estabilizar el clima. Los programas REDD+, implementados en países amazónicos, han contribuido a movilizar recursos financieros y a reducir las tasas de deforestación, aunque su éxito depende del monitoreo y la transparencia (Ladd & Peri, 2013). En el contexto ecuatoriano, los sistemas agroforestales destacan como una alternativa sostenible, no solo porque secuestran entre 4,8 y 8,1 tCO<sub>2</sub>/ha/año (Mena-Mosquera & Andrade, 2021), sino también porque generan beneficios socioeconómicos para comunidades locales. Asimismo, la reforestación y restauración ecológica en áreas degradadas de Brasil y Perú han mostrado incrementos significativos en el almacenamiento de carbono y mejoras microclimáticas (Segura et al., 2019), estrategias que pueden replicarse en Ecuador para revertir procesos de degradación.

Otras iniciativas complementarias incluyen la educación ambiental, que ha demostrado fortalecer la participación comunitaria en Perú (Bardales et al., 2024), y los modelos de economía circular, que permiten disminuir la huella de carbono desde el sector productivo (Ángel-Lara & García, 2024). A nivel financiero, los proyectos de carbono forestal (Ranero & Covalada, 2018) constituyen herramientas costo-efectivas para vincular inversión privada con conservación, un punto crítico para países como Ecuador donde la presión de la economía extractiva es alta.

## 6. CONCLUSIONES

La deforestación amazónica en Ecuador revela un panorama complejo en el que convergen amenazas ambientales, sociales y climáticas de gran magnitud. Los resultados muestran que la pérdida de un solo hectárea de bosque primario puede liberar cerca de 700 tCO<sub>2</sub>, un valor que, extrapolado a las dinámicas actuales de deforestación, sitúa al país en un escenario altamente preocupante. Este hecho se suma a la evidencia de que la Amazonía, en su conjunto, ha pasado de ser un sumidero a convertirse en una fuente neta de carbono, con más de 1,1 Gt CO<sub>2</sub>/año, emitidos en la última década. Si esta tendencia continúa, la región corre el riesgo de sobrepasar un punto de no retorno, donde la degradación, la pérdida de resiliencia y la transformación hacia ecosistemas tipo sabana se vuelvan irreversibles.



El escenario pesimista se acentúa al considerar la fragmentación forestal, que no solo intensifica los incrementos de temperatura y la reducción de precipitaciones, sino que también incrementa la vulnerabilidad frente a incendios y limita la capacidad adaptativa de especies. La pérdida de resiliencia en más del 75 % del bosque amazónico confirma que la región ya enfrenta señales tempranas de colapso ecológico, lo que compromete directamente la seguridad hídrica, alimentaria y climática de Ecuador y del planeta.

Sin embargo, los resultados también ofrecen un horizonte de oportunidad. La existencia de bosques secundarios con tasas de captura entre 4,8 y 11 tCO<sub>2</sub>/ha/año muestra que la restauración y la conservación activa pueden contrarrestar parte de las emisiones. Estrategias como los sistemas agroforestales, la implementación efectiva de REDD+, la reforestación ecológica y la educación ambiental comunitaria demuestran que es posible reducir emisiones, recuperar servicios ecosistémicos y fortalecer las economías locales. Estas prácticas no solo mitigan el cambio climático, sino que también aportan a la justicia ambiental al beneficiar a comunidades directamente dependientes del bosque.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alden, C., Miller, J., Gatti, L., Gloor, M., Guan, K., Michalak, A., ... & Diffenbaugh, N. (2016). Regional atmospheric CO<sub>2</sub> inversion reveals seasonal and geographic differences in Amazon net biome exchange. *Global Change Biology*, 22(10), 3427-3443. <https://doi.org/10.1111/gcb.13305>
- Alencar, A., Asner, G., Knapp, D., & Zarin, D. (2011). Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, 21(7), 2397-2412. <https://doi.org/10.1890/10-1168.1>
- Andersen, L. (2014). La economía del cambio climático en Bolivia: impactos sobre la biodiversidad. <https://doi.org/10.18235/0012682>
- Armenteras, D., & Rodríguez, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latinoamérica: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>
- Baker, J., & Spracklen, D. (2019). Climate benefits of intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047>
- Bardales, C., Chamoli, G., & Gálvez, H. (2024). Educación ambiental: vegetación como determinante de la distribución de la fauna. *RLCE*, 1(4), 109-118. <https://doi.org/10.70625/rlce/41>
- Boulton, C., Booth, B., & Good, P. (2017). Exploring uncertainty of Amazon dieback in a perturbed parameter Earth system ensemble. *Global Change Biology*, 23(12), 5032-5044. <https://doi.org/10.1111/gcb.13733>
- Boulton, C., Lenton, T., & Boers, N. (2021). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-379902/v1>
- Boulton, C., Lenton, T., & Boers, N. (2022). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12(3), 271-278. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Bruera, B., & González, F. (2021). Deforestación, incendios forestales y expansión de la frontera agrícola en el norte grande argentino (2007-2018). *Revista De La Facultad De Ciencias Económicas*, 26(1), 127. <https://doi.org/10.30972/rfce.2615038>



- Capdevilla, D., Valencia, A., & Fajardo, J. (2022). Estrategias para potencializar el turismo de naturaleza mediado por el marketing en busca de la conservación de los bosques amazónicos. *Entorno Geográfico*, (23), 1-22. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i23.11714>
- Carrasco, M. (2024). Evaluación de la eficiencia del financiamiento climático a través del mecanismo REDD+ en Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 16(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3045>
- Casas, C. (2019). El bioma amazónico y el acuerdo de París: cooperación y gobernanza. *Revista De Estudios Brasileños*, 6(11), 155-167. <https://doi.org/10.14201/reb2019611155167>
- Corlett, R. (2014). Forest fragmentation and climate change., 69-78. <https://doi.org/10.1079/9781780642031.0069>
- Cowling, S., Betts, R., Cox, P., Ettwein, V., Jones, C., Maslin, M., ... & Spall, S. (2004). Contrasting simulated past and future responses of the Amazonian forest to atmospheric change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 359(1443), 539-547. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1427>
- Espinosa-Landázuri, P., & Mancera-Rodríguez, N. (2015). La iniciativa Yasuní-ITT: mecanismo alternativo para la mitigación del cambio climático. *Luna Azul*, (40). <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.17>
- Esteban, E., & Pedro, M. (2021). Breve vistazo al impacto del cambio climático en el bosque amazónico. *Xilema*, 31(1), 5-8. <https://doi.org/10.21704/x.v31i1.1775>
- Flores, B., Esquivel-Muelbert, A., Ehrlich, M., Vilanova, E., Chaves, R., Hirota, M., ... & Kalamandeen, M. (2023). Nueve maneras de evitar el punto de no retorno en la Amazonía. <https://doi.org/10.55161/oqrm8068>
- Fuentes, J. (2020). Comparación de modelos de altura de la vegetación para estimación de biomasa en un bosque de manglar en el Caribe colombiano. *Entorno Geográfico*, 1-18. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i19.9471>
- Garate-Quispe, J., Canahuire-Robles, R., Surco-Huacachi, O., & Aguirre, G. (2021). Desarrollo estructural y composición florística arbórea en áreas afectadas por minería aurífera en la Amazonía peruana: a 20 años de su reforestación. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 92, e923437. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3437>
- García, B. (2011). The Amazon from an international law perspective. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511975233>
- Gatti, L., Costa, P., Arieira, J., Blackham, G., Alencar, A., Macedo, M., ... & Saleska, S. (2023). Impactos humanos en las emisiones de carbono y pérdidas de los servicios ecosistémicos. <https://doi.org/10.55161/aswz1496>
- González, J. (2023). El regreso del capital al origen extractivo. evolución de los procesos urbanos en la amazonía norte ecuatoriana (2000-2018). *EURE*, 49(146). <https://doi.org/10.7764/eure.49.146.02>
- Herrera-Feijoo, R. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33-56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Huertas, C., Millán, E., Romero, M., & Velasco, L. (2022). Bosque negro: propuesta didáctica para trabajar la deforestación por incendios en educación infantil., 117-134. <https://doi.org/10.14679/1891>



- Huete, A. (2012). Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring. *Geography Compass*, 6(9), 513-532. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2012.00507.x>
- Hurtado, J., Córdova, P., Cox, B., & Quiñónez, J. (2024). Análisis multitemporal de la dinámica de cobertura/uso de suelo de la cuenca del río esmeraldas. *Concienciadigital*, 7(2), 178-195. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i2.3021>
- Ladd, B., & Peri, P. (2013). REDD+ en Latinoamérica: el caso de Perú. *Bosque (Valdivia)*, 34(2), 1-2. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002013000200001>
- Laurance, W. (2004). Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 359(1443), 345-352. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1430>
- Lera, G. (2024). Efectos del cambio climático en hábitats naturales y táxones vegetales de importancia comunitaria (Directiva 92/43/ CEE) en la cuenca mediterránea europea. *Ambiociencias*, (21), 157-160. <https://doi.org/10.18002/ambioc.i21.8191>
- Li, Y., Brando, P., Morton, D., Lawrence, D., Yang, H., & Randerson, J. (2022). Deforestation-induced climate change reduces carbon storage in remaining tropical forests. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29601-0>
- Lorenz, R., & Pitman, A. (2014). Effect of land-atmosphere coupling strength on impacts from Amazonian deforestation. *Geophysical Research Letters*, 41(16), 5987-5995. <https://doi.org/10.1002/2014gl061017>
- Luque-Ramos, L. (2021). Análisis de la deforestación de la Amazonia peruana: Madre de Dios. *Revista Innova Educación*, 3(3), 198-212. <https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.03.013>
- López, J., Lima, J., Guevara-Gutiérrez, R., Villa, Ó., Palomera-García, C., & Cruz-Sandoval, G. (2021). Consistencia, homogeneidad y distribución de la precipitación pluvial y temperatura, región Sierra de Amula, Jalisco, México. *Revista Geográfica De América Central*, 1(68), 357-382. <https://doi.org/10.15359/rgac.68-1.13>
- Maffei, L., & Cossíos, E. (2021). Posibles impactos de la carretera Iquitos-Saramiriza sobre la biodiversidad de Loreto, Perú. *Revista Peruana De Biología*, 28(especial), e21963. <https://doi.org/10.15381/rpb.v28iespecial.21963>
- Mamani, C., Loayza, C., & Carhuarupay-Molleda, Y. (2021). Efecto de la temperatura y precipitación sobre la agricultura en la cuenca Coata-Puno, Perú. *Revista Alfa*, 5(14), 285-296. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.118>
- Martín, B., Galleano, V., Spiller, L., Vilche, M., & Montico, S. (2010). Evaluación de la productividad primaria de un pastizal templado en Santa Fe, Argentina. *Archivos De Zootecnia*, 60(232), 965-975. <https://doi.org/10.21071/az.v60i232.3982>
- Mena-Mosquera, V., & Andrade, H. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en bosques y sistemas agroforestales con cacao en el Pacífico colombiano. *Revista De Biología Tropical*, 69(4), 1252-1263. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i4.45927>
- Miñano, E., Baker, T., Banda-R, K., Coronado, E., Monteagudo, A., Phillips, O., ... & Vásquez, R. (2018). El el sumidero de carbono en los bosques primarios amazónicos es una oportunidad para lograr la sostenibilidad de su conservación. *Folia Amazónica*, 27(1), 101-109. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.456>
- Monterola, F., & Ráez, L. (2023). Impactos de la deforestación y erosión hídrica de suelos en la cuenca Shocol - Amazonas. *CV-EUPG*, 2(1), 17-29. <https://doi.org/10.24039/rcvp2023211674>



- Mosquera, H., Cuesta-Nagles, J., Mosquera-Sánchez, I., Palacios-Hinestroza, L., & Peñaloza-Murillo, H. (2013). Biomasa vegetal en zonas degradadas por minería en un bosque pluvial tropical del Chocó biogeográfico. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 3(1), 53. <https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v3i1.127>
- Nieto-Cañarte, C., Hernán, M., Sarango, V., & Carpio, B. (2023). Condiciones edafoclimáticas actuales y futuras para establecimiento de la balsa (*Ochroma* spp.) con pastos en el oriente ecuatoriano. *Revista De Climatología*, 23, 167-178. <https://doi.org/10.59427/rcli/2023/v23.167-178>
- Nunes, D., Almeida, E., Gómez-Carabalí, A., Chávez-Servia, J., & Otero, J. (2023). Patrones de manejo de agroecosistemas deforestados y estrategias de vida de fincas amazónicas de Cacoal, Brasil. *Acta Agronómica*, 71(1), 7-13. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n1.101667>
- Núñez, X., Castro, A., Barreto, S., Amores, L., & Zurita, J. (2024). Teledetección y análisis in situ para evaluar el secuestro de carbono en el Parque La Isla Tena: estrategias hacia la sostenibilidad. *Latam Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades*, 5(5). <https://doi.org/10.56712/latam.v5i5.2978>
- Paula, F., Rodrigues, J., Zhou, J., Wu, L., Mueller, R., Mirza, B., ... & Pellizari, V. (2014). Land use change alters functional gene diversity, composition and abundance in Amazon forest soil microbial communities. *Molecular Ecology*, 23(12), 2988-2999. <https://doi.org/10.1111/mec.12786>
- Poulter, B., Aragão, L., Heyder, U., Gumpenberger, M., Heinke, J., Langerwisch, F., ... & Crämer, W. (2010). Net biome production of the Amazon basin in the 21st century. *Global Change Biology*, 16(7), 2062-2075. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02064.x>
- Poulter, B., Hattermann, F., Hawkins, E., Zaehle, S., Sitch, S., Restrepo-Coupé, N., ... & Crämer, W. (2010). Robust dynamics of Amazon dieback to climate change with perturbed ecosystem model parameters. *Global Change Biology*, 16(9), 2476-2495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02157.x>
- Prevedello, J., Winck, G., Weber, M., Nichols, E., & Sinervo, B. (2019). Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. *PLOS ONE*, 14(3), e0213368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213368>
- Quilca-Parillo, F., Cruz-Escobar, M., Mamani, J., & López-Paz, P. (2022). El cambio climático afecta a la producción de la cebada grano en la región Puno-Perú. *Idesia (Arica)*, 40(4), 53-62. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000400053>
- Ranero, A., & Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera Y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- Reddington, C., Smith, C., Butt, E., Baker, J., Oliveira, B., Yamba, E., ... & Spracklen, D. (2025). Tropical deforestation causes considerable heat-related mortality. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5664782/v1>
- Reis, S., Marimon, B., Marimon, B., Morandi, P., Oliveira, E., Elias, F., ... & Phillips, O. (2018). Climate and fragmentation affect forest structure at the southern border of Amazonia. *Plant Ecology & Diversity*, 11(1), 13-25. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1455230>
- Rivas, C., Guerrero-Casado, J., & Navarro-Cerillo, R. (2021). Deforestation and fragmentation trends of seasonal dry tropical forest in Ecuador: Impact on conservation. *Forest Ecosystems*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00329-5>



- Rose, R., Byler, D., Eastman, J., Fleishman, E., Geller, G., Goetz, S., ... & Wilson, C. (2014). Ten ways remote sensing can contribute to conservation. *Conservation Biology*, 29(2), 350-359. <https://doi.org/10.1111/cobi.12397>
- Ruiz, M., Álvarez, E., Abril, C., & Vaca, W. (2024). El el consumo de los hogares y la contaminación en el Ecuador. *Ciencia UNEMI*, 17(44), 79-90. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol17iss44.2024pp79-90p>
- Rúa-Uribe, G., Suárez-Acosta, C., Chauca, J., Ventosilla, P., & Almanza, R. (2012). Modelización del efecto de la variabilidad climática local sobre la transmisión de dengue en Medellín (Colombia) mediante análisis de series temporales. *Biomédica*, 33(0). <https://doi.org/10.7705/biomedica.v33i0.1444>
- S., X., A., M., & M., J. (2019). Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del Ecuador utilizando tecnología LIDAR aerotransportada. *Revista Cartográfica*, (98), 75-95. <https://doi.org/10.35424/rcar.v5i98.142>
- Saavedra, J. (2023). Impacto de la deforestación en la pérdida del hábitat de vida silvestre amenazada en la Amazonía. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 915-935. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5374](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5374)
- Salazar, M., Minaya, C., & Guillén, L. (2020). Mercados para la conservación de bosques en Perú: una crítica desde la economía. *Natura Economía*, 5(2), 144. <https://doi.org/10.21704/ne.v5i2.1624>
- Scott, E., Uriarte, M., & Bruna, E. (2021). Delayed effects of climate on vital rates lead to demographic divergence in Amazonian forest fragments. *Global Change Biology*, 28(2), 463-479. <https://doi.org/10.1111/gcb.15900>
- Segura, M., Andrade, H., & Sánchez, C. (2019). Estructura, composición florística y almacenamiento de carbono en bosques nativos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia. *Ciência Florestal*, 29(1), 157-168. <https://doi.org/10.5902/1980509826551>
- Silveira, P. (2010). Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial. *Floresta*, 40(4). <https://doi.org/10.5380/ufv.v40i4.20330>
- Singh, M., & Huang, Z. (2022). Analysis of forest fire dynamics, distribution and main drivers in the Atlantic Forest. *Sustainability*, 14(2), 992. <https://doi.org/10.3390/su14020992>
- Spracklen, D., & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon Basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9546-9552. <https://doi.org/10.1002/2015gl066063>
- Torres, B., Vallejo, L., Cedeño, J., Navarrete, Y., & Gómez, A. (2013). La contribución del bosque amazónico a las condiciones de vida de la población rural de la reserva de biosfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia Y Tecnología*, 2(3), 147-161. <https://doi.org/10.59410/racyt-v02n03ep02-0029>
- Vega, J., Gómez, R., Brañas, M., & Minaya-Vela, R. (2021). Pérdida de bosque en zonas para la conservación y recuperación de la zonificación ecológica y económica (ZEE) de la provincia Alto Amazonas, Loreto, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 9(1), 1-16. <https://doi.org/10.22386/ca.v9i1.316>



- Villa, P., Martins, S., Neto, S., & Rodrigues, A. (2017). Predictores antropogénicos y biofísicos de deforestación en la Amazonia: hacia la integración de actividades REDD+. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 433-446. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002017000300001>
- Xu, W., Liu, Y., Veraverbeke, S., Wu, W., Dong, Y., & Lu, W. (2021). Active fire dynamics in the Amazon: New perspectives from high-resolution satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 48(20). <https://doi.org/10.1029/2021gl093789>
- Yao, Y., Ciais, P., Viovy, N., Joetzjer, É., & Chave, J. (2022). How drought events during the last century have impacted biomass carbon in Amazonian rainforests. *Global Change Biology*, 29(3), 747-762. <https://doi.org/10.1111/gcb.16504>
- Yepes-Quintero, A., Duque-Montoya, Á., Navarrete-Encinales, D., Phillips-Bernal, J., Cabrera-Montenegro, E., Corrales-Osorio, A., ... & Vargas-Galvis, D. (2017). Estimación de las reservas y pérdidas de carbono por deforestación en los bosques del departamento de Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(95), 193-208. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14306>

**Declaración de Conflicto de Intereses:** Los autores declaran que no presentan conflictos de intereses relacionados con este estudio y confirman que todos los procedimientos éticos establecidos por esta revista han sido rigurosamente respetados. Asimismo, garantizan que este trabajo es inédito y no ha sido publicado, ni parcial ni totalmente, en ninguna otra revista académica.