

Futuros plausibles para la Amazonía

Modelización de escenarios de deforestación en la Panamazonía e implicaciones para las políticas nacionales de conservación

Centro de Sensoramiento Remoto — Universidad Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG)

- La integración de infraestructura transfronteriza en América del Sur (las rutas de integración sudamericanas) tiende a reducir los costos de transporte, elevar el valor de la tierra y empujar las fronteras de deforestación sobre los nueve territorios de la Panamazonía.
- El **NewSimAmazonia** — modelo espacialmente explícito desarrollado en el CSR-UFMG — proyecta la deforestación hasta 2050 para los ocho países de la OTCA y la Guayana Francesa, comparando tres escenarios: **tendencial (BAU)**, **cumplimiento de las NDC** (Contribución Determinada a Nivel Nacional) y **línea de base**.
- Cada escenario se traduce en **emisiones de CO₂** y **pérdida de biodiversidad**, y en el potencial de generación de **créditos de carbono REDD+** bajo la arquitectura ART TREES.
- Una **plataforma pública e interactiva** permite estimar los ingresos de REDD+ a distintos precios del carbono, respaldando decisiones basadas en la evidencia.

La Amazonía bajo nueva presión

Los paisajes amazónicos experimentarán grandes transformaciones en las próximas décadas. Más decisivos que los proyectos aislados de infraestructura — carreteras, ferrocarriles, hidrovías y puertos — son los planes transfronterizos que los integran. Al reducir los costos de transporte, estos corredores aumentan la rentabilidad de la actividad agropecuaria y de la extracción maderera y elevan el valor de la tierra, lo que deriva en la concentración de la tenencia de la tierra y en la expansión de las fronteras de deforestación. Anticipar estos efectos, de manera ex ante, es condición para planificar un desarrollo ambientalmente sostenible, es decir, sin comprometer el clima, la sociobiodiversidad, la diversidad cultural ni los servicios ecosistémicos de la Amazonía (1, 2).

NewSimAmazonia

NewSimAmazonia es una versión mejorada de SimAmazonia que abarca los territorios amazónicos de los ocho países de la OTCA más la Guayana Francesa. Simula, en pasos anuales hasta 2050, dónde y a qué ritmo tiende a avanzar la deforestación, integrando el efecto de la infraestructura de transporte, las políticas de conservación y el uso de la tierra. Está construido sobre la plataforma libre [Dinamica EGO](#), con código y datos de entrada abiertos, lo que garantiza transparencia y replicabilidad.

Tres escenarios para orientar la decisión

Tendencial (BAU). Mantiene las tendencias actuales y la implementación de la infraestructura planificada, sin nuevas intervenciones de conservación: la trayectoria que se debe evitar.

Meta de las NDC. Incorpora los compromisos climáticos de cada país y los traduce en una reducción progresiva de la deforestación hacia la neutralidad de emisiones.

Línea de base. Adopta el promedio histórico de 2019–2023 como referencia para medir las reducciones de la deforestación y las emisiones de CO₂ evitadas.

De la deforestación al clima, la biodiversidad y el financiamiento

Cada escenario se traduce en emisiones de CO₂ — a partir de mapas de biomasa — y en impactos sobre la biodiversidad (riqueza de especies, endemismo, diversidad y endemismo filogenéticos). La integración entre los escenarios de deforestación y los mapas de biodiversidad permite identificar dónde las futuras presiones territoriales coinciden con áreas de elevado valor biológico. Esas regiones deben recibir atención prioritaria en la planificación de áreas protegidas, en la fiscalización y en la implementación de políticas de uso de la tierra. La distancia entre el escenario tendencial y el de las

NDC revela el esfuerzo de conservación necesario y el volumen de emisiones evitables, que pueden convertirse en créditos REDD+ bajo la arquitectura ART TREES (3) — un canal de financiamiento climático a gran escala para gobiernos nacionales y subnacionales.

Plataforma en línea

La [plataforma Online](#) contiene mapas y gráficos interactivos. Se presentan las tasas de deforestación y las emisiones de CO₂ resultantes, así como la posibilidad de créditos REDD+, modificando los parámetros de la contabilidad financiera para cada escenario modelado en cada país. Además, la plataforma constituye un repositorio público de todos los datos de entrada y de salida de NewSimAmazonia, que pueden visualizarse, consultarse y descargarse, junto con un conjunto de gráficos interactivos por país y tipo de resultado.

Implicaciones y recomendaciones

La tabla siguiente presenta los resultados acumulados hasta 2035 para cada país en términos de reducción de la deforestación y las emisiones de CO₂ asociadas, bajo el escenario **NDC**, tomando como punto de partida el escenario de línea de base.

	Ha	CO ₂
Brasil	10.6E+6	4.6E+9
Colombia	1.6E+6	407.8E+6
Perú	900.8E+3	345.8E+6
Venezuela	465.3E+3	55.6E+6
Bolivia	304.3E+3	141.0E+6
Guyana	162.0E+3	26.2E+6
Ecuador	156.0E+3	82.4E+6
Surinam	62.8E+3	22.6E+6
Guayana Francesa	000.0E+0	1.2E+6

La plataforma facilita la visualización de escenarios, a medida que los formuladores de políticas plantean preguntas del tipo "qué pasaría si" sobre el impacto de los planes forestales y de los programas de reducción de las emisiones de carbono, traduciendo esos resultados en capacidad de captación de recursos financieros de REDD+. De este modo, la plataforma ahorra tiempo y esfuerzo a los formuladores de políticas y planificadores en un campo en rápida transformación. Por lo tanto, es una herramienta importante para apoyar a los gobiernos en la gestión de áreas forestales.

En resumen, al ofrecer un análisis detallado de la dinámica y de las fronteras de deforestación predominantes en cada país, NewSimAmazonia permite evaluar de modo ex ante impactos ambientales como la fragmentación de hábitats, la pérdida de biodiversidad, las alteraciones del ciclo hidrológico y las emisiones de CO₂. Por ello, estas proyecciones constituyen un valioso insumo para formuladores de políticas, ambientalistas y planificadores del uso de la tierra que buscan desarrollar estrategias que equilibren el desarrollo con la preservación ambiental en la región amazónica. Las fronteras de deforestación siguen corredores de integración transnacionales, por lo que la respuesta de política también debe ser regional — respaldada por la plataforma pública, que permite probar escenarios "qué pasaría si" y estimar los ingresos de REDD+.

Metodología

Arquitectura del modelo. Modelos acoplados en dos niveles — subregiones socioeconómicas y celdas ráster de 500 m (una malla de 6.167×8.007 celdas). Un modelo superior distribuye las tasas de deforestación entre las subregiones; en cada una, el álgebra de mapas y los autómatas celulares generan la simulación espacialmente explícita. Se ejecuta en la plataforma libre [Dinamica EGO](#), cuyo procesamiento paralelo hace viable la escala continental. Un módulo dedicado simula la [expansión de la red vial](#), principal vector de apertura de nuevos frentes (9).

Datos y calibración. Mapas anuales de deforestación de 2009–2023 — PRODES/INPE en Brasil (12) y el mapeo global de Hansen et al. en los demás países (13) — y la densidad de biomasa sobre el suelo (10, 14). Los modelos se calibran en 2009–2015, se validan en 2016–2023 y se proyectan en pasos anuales hasta 2050.

Emisiones de CO₂. Calculadas a partir de la biomasa forestal suprimida, sumando un 20% de biomasa bajo el suelo y asumiendo que el 85% del carbono se libera durante y después de la deforestación (11).

Construcción de escenarios. El escenario tendencial proyecta 2019–2023 mediante regresión lineal (mínimos cuadrados); la línea de base fija el promedio 2019–2023; el escenario NDC convierte las metas climáticas de cada país (15–27) en trayectorias lineales de reducción de la deforestación hasta 2030–2050, alineadas con la neutralidad de emisiones del Acuerdo de París.

Biodiversidad. 8,6 millones de registros de ocurrencia (GBIF y GABI) fueron depurados y georreferenciados con BioDinamica (28). El sesgo de esfuerzo de muestreo se corrigió mediante el método USSE (29), y se generaron superficies predictivas mediante redes neuronales profundas (30), utilizando como predictores el clima (WorldClim (31)), la topografía y un Índice Compuesto de Vegetación (altura del dosel por LiDAR + varianza del NDVI/MODIS). Métricas: riqueza de especies; endemismo ponderado (WEIc); diversidad filogenética (32); endemismo filogenético (33, 34); y regiones biogeográficas obtenidas a partir de la diversidad beta (índice de Sørensen (36) modelada mediante GDM (37) y agrupada mediante k-means (38). La proyección para 2050 sustituye únicamente el índice de vegetación por los mapas de deforestación simulada.

Créditos REDD+ (ART TREES). Se define un nivel de crédito a partir del promedio histórico de cinco años de emisiones; los créditos equivalen a la diferencia entre ese nivel y las emisiones observadas, descontadas las porciones destinadas a la reserva de amortiguación (buffer), las incertidumbres y las fugas, y valoradas según el precio de la tonelada de CO₂ (3).

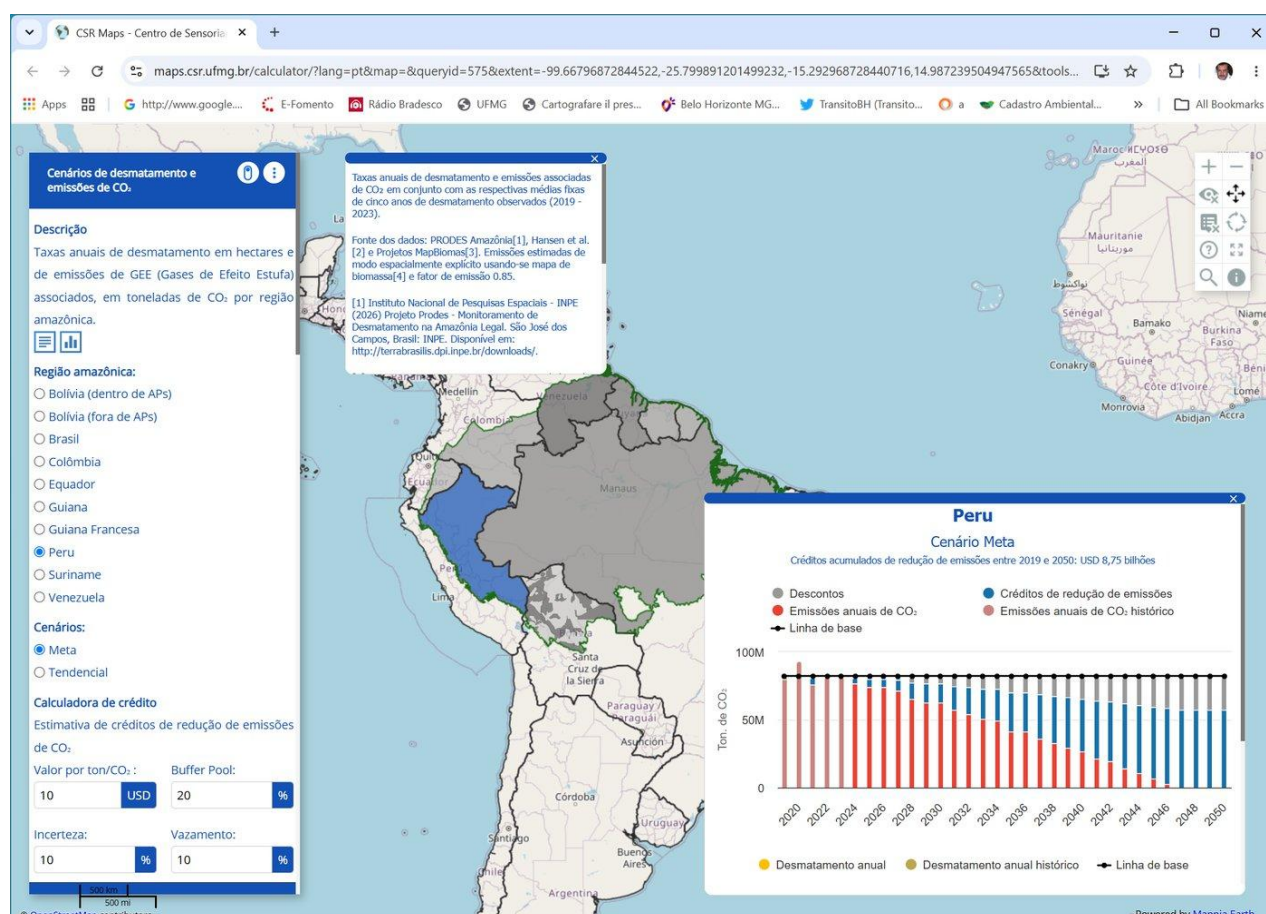


Figura 1. Interfaz de la plataforma para el componente REDD+, que incluye una calculadora de créditos basada en la metodología ART-TREES.

Referencias

1. B. S. Soares-Filho et al., Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* **440**, 520–523 (2006).
2. B. S. Soares-Filho et al., Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107**, 10821–10826 (2010).
3. Architecture for REDD+ Transactions (ART), *The REDD+ Environmental Excellence Standard (TREES), v1 – Executive Summary* (ART, 2020); <https://www.artredd.org/wp-content/uploads/2020/02/TREES-v1-Exec-Summary-Feb-2020.pdf>.
4. G. Sampaio et al., Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L17709 (2007).
5. A. T. Leite-Filho, B. S. Soares-Filho, J. L. Davis, G. M. Abrahão, J. Börner, Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* **12**, 2591 (2021).
6. D. Nepstad et al., The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* **326**, 1350–1351 (2009).
7. A. Leite-Filho, B. Soares-Filho, S. Carvalho, A. Krogh, "How deforestation-induced local and regional climate changes affect agricultural production in the Brazilian Amazon" (Rainforest Foundation Norway, 2024); <https://dv719tqmsuwyb.cloudfront.net/documents/RFN-Rainforest-Payback.pdf>.
8. M. Coe, M. Costa, B. S. Soares-Filho, The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River — land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* **369**, 165–174 (2009).
9. H. J. Geist, E. F. Lambin, Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* **52**, 143–150 (2002).
10. A. Baccini et al., Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nat. Clim. Change* **2**, 182–185 (2012).
11. R. A. Houghton, D. L. Skole, C. A. Nobre et al., Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* **403**, 301–304 (2000).
12. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), *Projeto PRODES — Monitoramento de Desmatamento na Amazônia Legal* (INPE, São José dos Campos, 2026); <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>.
13. M. C. Hansen et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* **342**, 850–853 (2013).
14. N. L. Harris et al., Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change* **11**, 234–240 (2021).
15. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Nationally Determined Contributions (NDC) Registry (UNFCCC, 2025); <https://unfccc.int/NDCREG>.
16. Estado Plurinacional de Bolivia, *Contribución Nacionalmente Determinada (NDC 3.0), 2026–2035* (Ministerio de Medio Ambiente y Agua / Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, La Paz, 2025); <https://unfccc.int/documents/650130>.
17. República Federativa do Brasil, *Brazil's Second Nationally Determined Contribution (NDC)* (Governo Brasileiro, Brasília, 2024).
18. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, *Plano Clima Mitigação: Plano Setorial de Mudanças do Uso da Terra em Áreas Rurais Privadas* (MMA/MCTI/MAPA/MDA/CC-PR, Brasília, 2026).
19. República de Colombia, *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC 3.0) — Transformaciones para la Vida* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, 2025).
20. República del Ecuador, *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional 2026–2035* (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Quito, 2025).
21. R. A. Houghton, K. T. Lawrence, J. Hackler, L. S. Brown, The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Glob. Change Biol.* **7**, 731–746 (2001).
22. Republic of Guyana, *Guyana's Revised Intended Nationally Determined Contribution* (Government of Guyana, Georgetown, 2015).
23. European Union and its Member States, *The Nationally Determined Contribution of the European Union and its Member States* (Danish Presidency of the Council of the EU / European Commission, 2025).
24. Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (Citepa), *Inventaire National d'Émissions de Gaz à Effet de Serre et de Polluants Atmosphériques en Outre-mer* (Citepa, 2024).
25. Gobierno del Perú, *Tercera Contribución Determinada a Nivel Nacional del Perú* (Ministerio del Ambiente, Lima, 2025).
26. Republic of Suriname, *Republic of Suriname's Third Nationally Determined Contribution (NDC 3.0)* (Ministry of Oil, Gas, and Environment, Paramaribo, 2025).
27. República Bolivariana de Venezuela, *Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada* (Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo, Caracas, 2021).
28. U. Oliveira, B. Soares-Filho, R. F. M. Leitão, H. O. Rodrigues, BioDinamica: a toolkit for analyses of biodiversity and biogeography on the Dinamica-EGO modelling platform. *PeerJ* **7**, e7213 (2019).
29. U. Oliveira, B. Soares-Filho, F. Nunes, Controlling the effects of sampling bias in biodiversity models. *J. Biogeogr.* (2024); <https://doi.org/10.1111/jbi.14851>.
30. J. Schmidhuber, Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Netw.* **61**, 85–117 (2015).
31. S. E. Fick, R. J. Hijmans, WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **37**, 4302–4315 (2017).
32. D. P. Faith, Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biol. Conserv.* **61**, 1–10 (1992).
33. D. Rosauer, S. W. Laffan, M. D. Crisp, S. C. Donnellan, L. G. Cook, Phylogenetic endemism: a new approach for identifying geographical concentrations of evolutionary history. *Mol. Ecol.* **18**, 4061–4072 (2009).
34. M. D. Crisp, S. Laffan, H. P. Linder, A. Monro, Endemism in the Australian flora. *J. Biogeogr.* **28**, 183–198 (2001).
35. R. H. Whittaker, Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecol. Monogr.* **30**, 279–338 (1960).
36. T. Sørensen, A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *K. Dan. Vidensk. Selsk. Biol. Skr.* **5**, 1–34 (1948).
37. S. Ferrier, G. Manion, J. Elith, K. Richardson, Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. *Divers. Distrib.* **13**, 252–264 (2007).
38. J. MacQueen, in *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (Univ. of California Press, Berkeley, 1967), vol. 1, pp. 281–297.