

Opinión

Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía

Fire and water: global change, forest resilience, and the risk of the point of no return for the Amazon

El bosque amazónico, uno de los ecosistemas más antiguos y biodiversos del planeta, esencial para la circulación del agua y el clima, enfrenta un punto crítico en su existencia (**Figura 1**). En años recientes, la Amazonía, bastión ecológico y corazón de la Tierra, ha sido azotada por incendios devastadores, exacerbados por el cambio climático y actividades humanas cada vez más intensivas (**Figura 2**). Estos incendios no sólo amenazan su vasta biodiversidad, también ponen en peligro la estabilidad climática regional y global. Es una región del planeta donde el fuego no ha sido parte de la evolución de los ecosistemas, pero sí de las prácticas de las comunidades que la habitan. Numerosos pueblos indígenas utilizaban el fuego antes de la llegada de los colonizadores europeos con diversos fines: facilitar el acceso a lugares de uso, desplazarse, cazar y realizar rituales, así como para la producción agrícola y la protección de sus aldeas (**Berlinck & Batista, 2020a**). No obstante, su uso ha sido radicalmente transformado por prácticas agrícolas expansivas y otras intervenciones humanas cada vez más intensivas. Esto ha hecho que los incendios sean ahora más frecuentes y severos, acelerando la pérdida de biodiversidad y liberando enormes cantidades de dióxido de carbono que deterioran la calidad del aire y alteran los ciclos hidrológicos y climáticos a nivel local, regional y global.

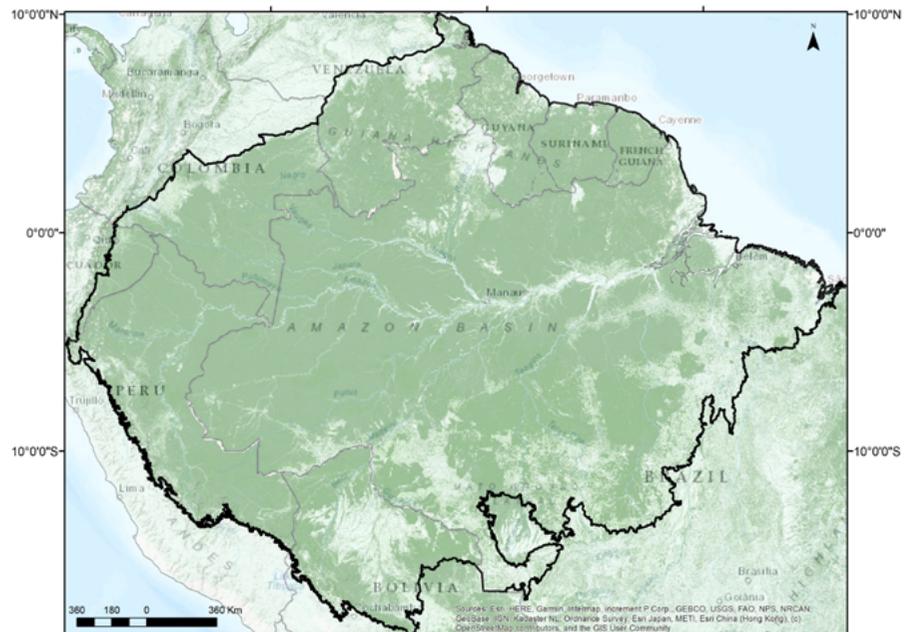


Figura 1. Distribución del bosque tropical en el bioma amazónico 2020. Elaboración propia. Fuente datos: Global Forest Watch (GFW), Tropical tree cover, Resolución 0.5 ha (<https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw:tropical-tree-cover/about>). Límite biomas. RAISG, 2023 - Biomas. Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada <https://www.raisg.org/es/mapas/>

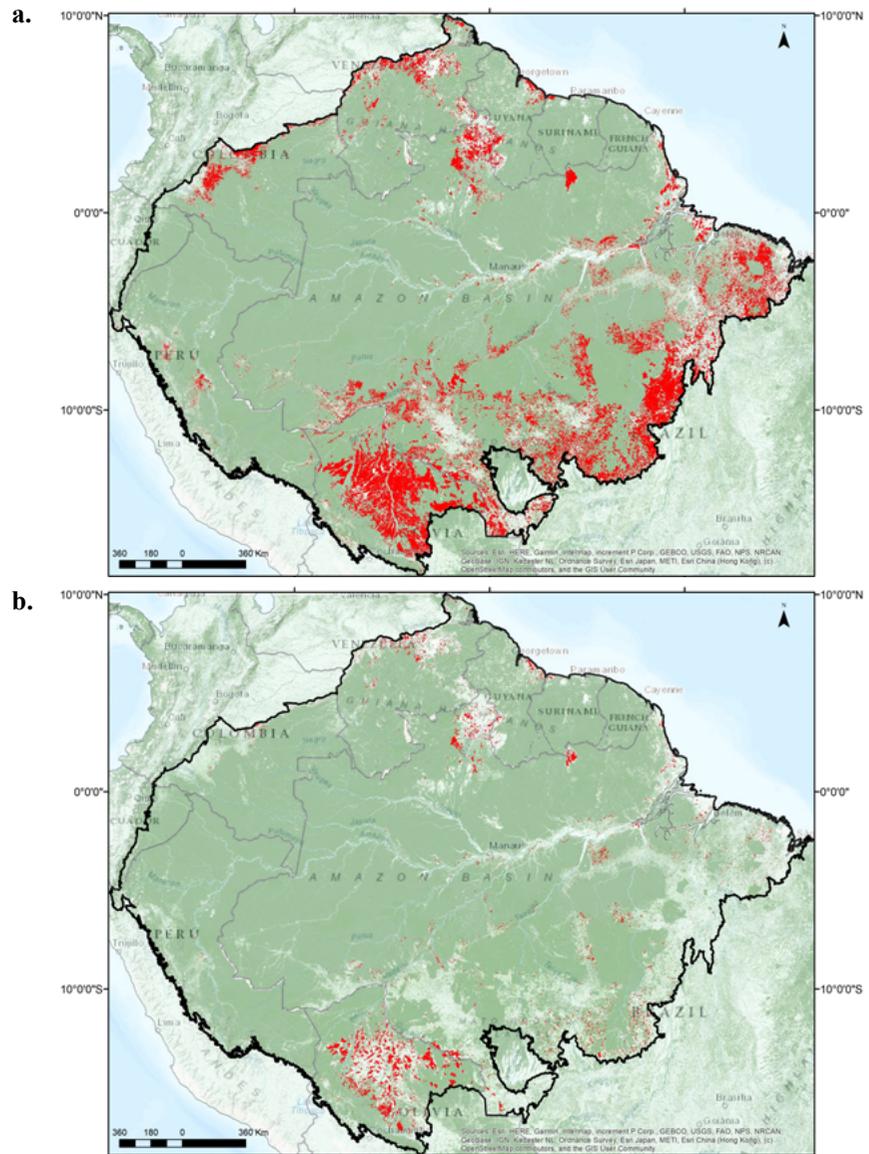


Figura 2. Área quemada **a)** Enero 2001 hasta abril 2024, **b)** Enero 2023 a abril 2024. Elaboración propia. Fuente datos: Google Earth Engine, Catálogo de Datos MODIS producto Área quemada MCD64A1

¿Son suficientes la evolución y la adaptación de los bosques tropicales para resistir perturbaciones y no superar los umbrales críticos?

Los bosques de la Amazonía han desarrollado a lo largo de millones de años un conjunto de estrategias de adaptación complejas para recuperarse de perturbaciones naturales como las inundaciones, las enfermedades y los incendios ocasionales. Estas estrategias incluyen la gran diversidad genética, la rápida regeneración de plantas, y la intrincada red de interacciones ecológicas que facilitan la resiliencia y la recuperación del ecosistema (Flores *et al.*, 2024). Sin embargo, la situación actual presenta desafíos sin precedentes que amenazan estas adaptaciones naturales. La magnitud de la degradación ambiental, impulsada por una deforestación rampante y un cambio climático acelerado, está poniendo a prueba la capacidad de resiliencia de estos bosques. El cambio climático, en particular, está alterando los patrones de precipitación y aumentando las temperaturas, lo que no sólo

afecta el crecimiento y la salud de las plantas, sino que también cambia la composición de especies del bosque. Estas alteraciones climáticas pueden reducir la humedad del suelo y de la vegetación, incrementando su vulnerabilidad ante los incendios, que históricamente han sido raros y de baja intensidad en estas regiones húmedas.

En Brasil se han determinado los umbrales críticos de los factores de estrés hídrico que podrían desencadenar el colapso forestal y llevar a un punto de no retorno, o de inflexión, en la región amazónica. Estos umbrales críticos están asociados con los siguientes factores (**Flores et al., 2024**).

- Calentamiento global: hay un rango de umbrales críticos potenciales en el calentamiento global entre los 2 y los 6 °C, más allá de los cuales el sistema forestal amazónico podría enfrentar desafíos significativos.

- Cambios en las condiciones climáticas de los patrones de lluvia (con un umbral de 1.800 mm de lluvia anual), los aumentos de temperatura y la duración de la temporada seca (con un umbral de cinco meses), que podrían exponer el bosque a niveles sin precedentes de déficit de presión de vapor y estrés hídrico (con un umbral de 350 mm), con la posibilidad de llevarlo al colapso forestal.

- Perturbaciones compuestas: el 20 % de la deforestación en la región sigue siendo uno de los umbrales críticos a partir del cual se acelerarían los cambios. Para el 2050, se estima que entre el 10 y el 47 % de los bosques amazónicos estará expuesto a perturbaciones compuestas que pueden desencadenar transiciones ecosistémicas inesperadas, exacerbando el cambio climático regional y aumentando el riesgo de colapso.

Nos encontramos ante un escenario inédito en el que las nuevas interacciones entre el bosque y las condiciones ambientales están impactando la resiliencia del ecosistema amazónico y alterando los mecanismos de retroalimentación que tradicionalmente habían sostenido la estabilidad de estos bosques. Con la región sometida a presiones sin precedentes, como el aumento de las temperaturas, sequías extremas, deforestación e incendios, estos ciclos de retroalimentación y los cambios en los mecanismos de interacción ecológica pueden, adicionalmente, reducir la vulnerabilidad de los bosques amazónicos ante nuevas perturbaciones y reducen aún más su capacidad de recuperación.

El buen fuego y el mal fuego en la Amazonía

El uso del fuego puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo del contexto y los actores involucrados (**Berlinck & Batista, 2020a**). En algunos ecosistemas, el fuego cumple una función crucial para mantener la salud ecológica, como en el manejo de combustibles o en la regeneración de especies que dependen del fuego para su reproducción y supervivencia. No obstante, en la Amazonía, donde el fuego es un elemento ajeno, su impacto suele ser mayoritariamente negativo. Las selvas tropicales húmedas, altas y de dosel cerrado de la Amazonía, con su microclima húmedo y elevadas precipitaciones, crean condiciones casi ininflamables, haciendo que los incendios naturales sean prácticamente imposibles, pero a la vez las hace particularmente vulnerables a los efectos del fuego. De hecho, el fuego se considera una de las perturbaciones que podrían desencadenar transiciones ecosistémicas inesperadas en los bosques amazónicos (**Flores et al 2024**). En este sentido, además de otros factores como las tendencias de calentamiento global, los eventos repetidos de sequías extremas y la permanente deforestación, los incendios pueden contribuir a una mayor vulnerabilidad y posibles transiciones irreversibles del bosque.

El fuego es, todavía, mayoritariamente utilizado como herramienta en la deforestación del bosque amazónico y causa incendios que exacerbaban estos desafíos (**Armenteras & Retana, 2012; Armenteras et al., 2013**). A diferencia de los incendios naturales, que el bosque podría resistir o incluso aprovechar para ciertos procesos ecológicos, los incendios provocados por actividades humanas son generalmente más intensos y frecuentes. El fuego sigue empleándose para despejar el bosque y convertirlo en pasto o en sistemas agrícolas, una práctica intensificada por su uso ilegal en la expansión de pastizales y el acaparamiento de tierras para la agroindustria. La mayoría de los incendios en el

bosque amazónico están vinculados a delitos ambientales como la ocupación irregular, la apropiación de tierras, la deforestación y, en el caso de Brasil, a conflictos con agencias ambientales (**Berlinck & Batista, 2020b**). Las sequías, cada vez más frecuentes por el cambio climático en la Amazonía, también aumentan el riesgo de incendios al incrementar la flamabilidad y la sequedad del aire y disminuir la humedad en el combustible presente en el bosque, además de reducir la humedad del suelo e, indirectamente, aumentar la mortalidad de la vegetación (**Berlinck & Batista, 2020b**). Más allá de la deforestación, la fragmentación del bosque húmedo tropical no solo aumenta la frecuencia e intensidad de los incendios, sino que también los localiza principalmente en los bordes del bosque, lo que aumenta la vulnerabilidad y el avance de la frontera de colonización (**Armenteras et al., 2013**)

Después de los incendios en la Amazonía, la irreversibilidad de la deforestación tropical

La flora y la fauna amazónicas están gravemente amenazadas por los incendios, ya que se trata de especies que históricamente no evolucionaron ni fisiológica ni morfológicamente para adaptarse al fenómeno. Cuando están asociados a la tala y quema del bosque, los incendios no sólo consumen grandes áreas de bosque talado, sino que degradan el bosque en pie al alcanzarlo y penetrar en él. Esto causa una alta mortalidad de árboles, incluso cuando son incendios de superficie, asimismo, destruye semillas y reduce los bancos de germoplasma, cruciales en los procesos de regeneración natural (**Berlinck & Batista, 2020b**). Además, el suelo sufre de erosión y pérdida de nutrientes, lo que dificulta aún más el rebrote de la vegetación nativa. En estudios recientes se ha demostrado el impacto negativo del fuego al impedir el rebrote posterior al fuego en el 56 a 82 % del área boscosa de la Amazonía (**Drüke et al., 2023**). La presencia de fuego crea una biestabilidad (bosque-sabana), la cual produce un efecto de bloqueo que depende de la historia y promovería el estado de sabana en más de la mitad de la cuenca del Amazonas, ya que el fuego obstaculiza en gran medida la recuperación del bosque amazónico (**Drüke et al., 2023**).

Por otro lado, recientes modelos indican que un clima regional más cálido y seco, resultante del estado de sabana, aumentaría aun más la actividad del fuego, llevando a que una mayor extensión del bosque amazónico se transforme y permanezca en dicho estado de sabana, impidiendo, así, la recuperación del bosque. Esta combinación de factores está empujando a los bosques amazónicos hacia un punto de inflexión crítico. Un punto de inflexión en ecología se refiere a un umbral que, una vez cruzado, causa cambios drásticos y a menudo irreversibles en el funcionamiento de un ecosistema. En el caso de la Amazonía, esto podría significar la transición de selvas tropicales húmedas a sabanas o matorrales, ecosistemas con menor biodiversidad y servicios ecológicos diferentes, lo cual tendría consecuencias catastróficas para la biodiversidad regional y el clima global, dado el rol de la Amazonía en el almacenamiento de carbono y la regulación de los ciclos de agua.

¿El aumento de la deforestación y los incendios forestales y sus efectos resulta de la ineficacia de las políticas de emergencia?

El impacto de los incendios, exacerbado por prácticas humanas y por el cambio climático, plantea serios desafíos para la sostenibilidad de estos ecosistemas. Frente a esta realidad, se hace imprescindible la implementación de políticas efectivas que reconozcan algunos roles ecológicos pero aborden las causas subyacentes y emergentes de la crisis actual.

Sin duda, las amenazas que la Amazonía enfrenta debido principalmente a la deforestación y los incendios son múltiples y complejas, y su control efectivo requiere un enfoque integral que reconozca que no hay una única estrategia de manejo para todos los ecosistemas. Por ejemplo, a pesar de las políticas para reducir la deforestación en la Amazonía, el mercado de tierras, influenciado por un contexto de caos institucional y una presencia estatal débil, fomenta la deforestación a gran escala (**de Assis Costa et al.,**

2023). Los incendios forestales volvieron a incrementarse desde finales del 2023 e inicios del 2024 (Figura 2), particularmente en Colombia, con un remonte de la deforestación que representa una amenaza significativa para la biodiversidad regional y el clima global (Armenteras & González, 2024; de Oliveira *et al.*, 2023).

Las políticas de emergencia, como las prohibiciones temporales de quemas, aunque populares y mediáticas, no han logrado abordar las causas profundas de los incendios en la Amazonía (Machado *et al.*, 2024). Estas medidas suelen tener un impacto limitado y no sustituyen las estrategias más sostenibles y bien planificadas. Por ejemplo, aunque la prohibición de fuego del 2019 en Brasil tuvo cierto éxito inicial en la reducción de incendios, en años siguientes estas no fue efectiva, lo que subraya la necesidad de intervenciones más estructurales que trasciendan las medidas de emergencia. Se necesita una acción gubernamental decidida para combatir estas ilegalidades, detener el acaparamiento de tierras, reconocer su legítima propiedad e implementar en la práctica medidas de largo plazo (Armenteras *et al.*, 2019).

Control de la deforestación, ¿realmente sabemos lo que tenemos, o lo perderemos irremediablemente?

Para evitar el punto de no retorno en el Amazonas y mantener la resiliencia de sus vastos ecosistemas forestales, el Panel Científico de la Amazonia (<https://www.theamazonwewant.org/>) recomienda varias acciones urgentes (Flores *et al.*, 2023). En primer lugar, es esencial reducir significativamente las emisiones globales de gases de efecto invernadero y detener las actividades locales de deforestación y degradación forestal. Si no implementamos políticas efectivas y coordinadas para mitigar la deforestación, podríamos perder irremediablemente este recurso invaluable, cuyas consecuencias ambientales, sociales y económicas serían devastadoras. Estas medidas son cruciales para prevenir un mayor debilitamiento del flujo de humedad a través del Amazonas, lo cual es vital para mantener la resiliencia del bosque y evitar un colapso ecosistémico a gran escala.

Prevenir la deforestación es más efectivo y menos costoso que intentar restaurar ecosistemas una vez dañados. Los procesos de restauración pueden ser largos y complejos, y no siempre garantizan la recuperación de la biodiversidad original o de las funciones ecosistémicas perdidas. Además, la Amazonía es hogar de una biodiversidad incomparable; perder especies a causa de la deforestación podría llevar a algunas a la extinción permanente, imposibilitando su recuperación incluso con esfuerzos de restauración, dado que estos ecosistemas pueden tardar décadas en recuperar completamente su funcionalidad. Además, las comunidades indígenas y locales dependen de los bosques para su subsistencia, su cultura y su salud, y la deforestación amenaza directamente su modo de vida.

Asimismo, la implementación de proyectos de restauración a gran escala, como la regeneración natural y la reforestación, especialmente a lo largo de un ‘arco de restauración’, es crucial (Flores *et al.*, 2023), ya que ello fortalecerá los mecanismos de retroalimentación entre el bosque y la lluvia en todo el Amazonas, reduciendo así el riesgo de eventos críticos y mejorando la conectividad del bosque, especialmente a través de la vulnerable frontera andino-amazónica.

La combinación de ciencia, política y prácticas comunitarias puede ser crucial para prevenir un punto de no retorno climático en la Amazonía.

El Panel Científico (Flores *et al.*, 2023) también propone que se debe reconocer y empoderar el liderazgo de los pueblos indígenas y las comunidades locales en la gobernanza amazónica. Su profundo conocimiento ecológico y sus conexiones bioculturales son invaluable para mejorar la resiliencia del bosque frente a cambios globales. Es crucial reconocer y apoyar de forma más categórica los derechos territoriales de los pueblos

indígenas, quienes han demostrado ser guardianes efectivos de la Amazonía. Sus territorios albergan aproximadamente 24,5 Gt de carbono sobre el suelo y actúan como barreras significativas contra la deforestación y la degradación forestal (**Moutinho et al.**, 2022).

Además, el monitoreo continuo de la dinámica del bosque amazónico y su respuesta a los factores de estrés ambientales es necesario para proporcionar información oportuna que pueda ayudar a fortalecer la gobernanza local y las estrategias de manejo forestal (**Flores et al.**, 2023). Todo esto sin olvidar la ciencia, ya que es urgente invertir en investigaciones que se centren en los impactos de las perturbaciones sinérgicas y compuestas en la resiliencia del bosque para informar y optimizar los esfuerzos de conservación y desarrollo sostenible.

Por último, debemos adoptar un enfoque equilibrado que respete las prácticas tradicionales, como, por ejemplo, el uso tradicional del fuego, mientras se aplican controles rigurosos y técnicas modernas para mitigar los incendios destructivos. Estas estrategias deben ser integradas y gestionadas de manera que respeten tanto la biodiversidad única de la Amazonía como los derechos y modos de vida de las comunidades indígenas y locales. La cooperación internacional y el financiamiento adecuado son urgentes para apoyar y asegurar un enfoque sostenible y efectivo, sobre todo para mejorar la resiliencia del bosque amazónico, y alcanzar una Amazonía con menos fuego.

Agradecimientos

A mi estimado colega, el profesor Jhon Charles Donato, por sus comentarios y sugerencias.

Dolors Armenteras

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia; Académica Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; miembro del Panel Científico por la Amazonia (SPA).
darmenterasp@unal.edu.co

Referencias

- Armenteras, D. & González, T. M.** (2024). Repensando la gestión de incendios forestales en Suramérica: un enfoque integrado en la era del cambio climático. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48 (186), 210-215. <https://doi.org/10.18257/racefyn.2600>
- Armenteras, D., González, T. M., Retana, J.** (2013). Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests. *Biological Conservation*, 159, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.10.026>
- Armenteras, D., Negret, P., Melgarejo, L. F., Lakes, T. M., Londoño, M. C., García, J., Krueger, T., Baumann, M., Davalos, L. M.** (2019). Curb land grabbing to save the Amazon. *Nature Ecology and Evolution*, 3 (11), 1497. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1020-1>
- Armenteras, D. & Retana, J.** (2012). Dynamics, patterns and causes of fires in Northwestern Amazonia. *PLoS One*, 7 (4), e35288. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035288>
- Berlinck, C. N. & Batista, E. K. L.** (2020a). Good fire, bad fire: It depends on who burns. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 268, 151610. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151610>
- de Assis Costa, F., Larrea, C., Araújo, R., Benatti, J. H., Giraldo, V., Hecht, S., Murmis, M. R., Peters, S., Schmink, M., Terán, E., Treccani, J.** (2023). *Land market and illegalities: the deep roots of deforestation in the Amazon*. <https://doi.org/10.55161/SLBQ1069>
- de Oliveira, G., Mataveli, G., Stark, S. C., Jones, M. W., Carmenta, R., Brunsell, N. A., Santos, C. A. G., da Silva Junior, C. A., Cunha, H. F. A., da Cunha, A. C., dos Santos, C. A. C., Stewart, H., Boanada Fuchs, V., Hellenkamp, S., Artaxo, P., Alencar, A. A. C., Moutinho, P., Shimabukuro, Y. E.** (2023). Increasing wildfires threaten progress on halting deforestation in Brazilian Amazonia. *Nature Ecology and Evolution*, 7 (12), 1945-1946. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02233-3>
- Drüke, M., Sakschewski, B., von Bloh, W., Billing, M., Lucht, W., Thonicke, K.** (2023). Fire may prevent future Amazon forest recovery after large-scale deforestation. *Communications Earth and Environment*, 4(1), 248. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00911-5>

- Flores, B. M., Esquivel-Muelbert, A., Ehrlich, M., Vilanova, E., Tupinambá, R., Hirota, M., Kalamandeen, M. (2023).** *Nine ways to avoid the amazon tipping point.* <https://doi.org/10.55161/SVVO2555>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024).** Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555-564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Machado, M. S., Berenguer, E., Brando, P. M., Alencar, A., Oliveras Menor, I., Barlow, J., Malhi, Y. (2024).** Emergency policies are not enough to resolve Amazonia's fire crises. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 204. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01344-4>
- Moutinho, P., Leite, I., Baniwa, A., Mirabel, G., Josse, C., Macedo, M., Alencar, A., Salinas, N., Ramos, A. (2022).** *Policy Brief: The role of Amazonian Indigenous Peoples in fighting the climate crisis.* Science Panel for the Amazon. <https://doi.org/10.55161/HWOO4626>