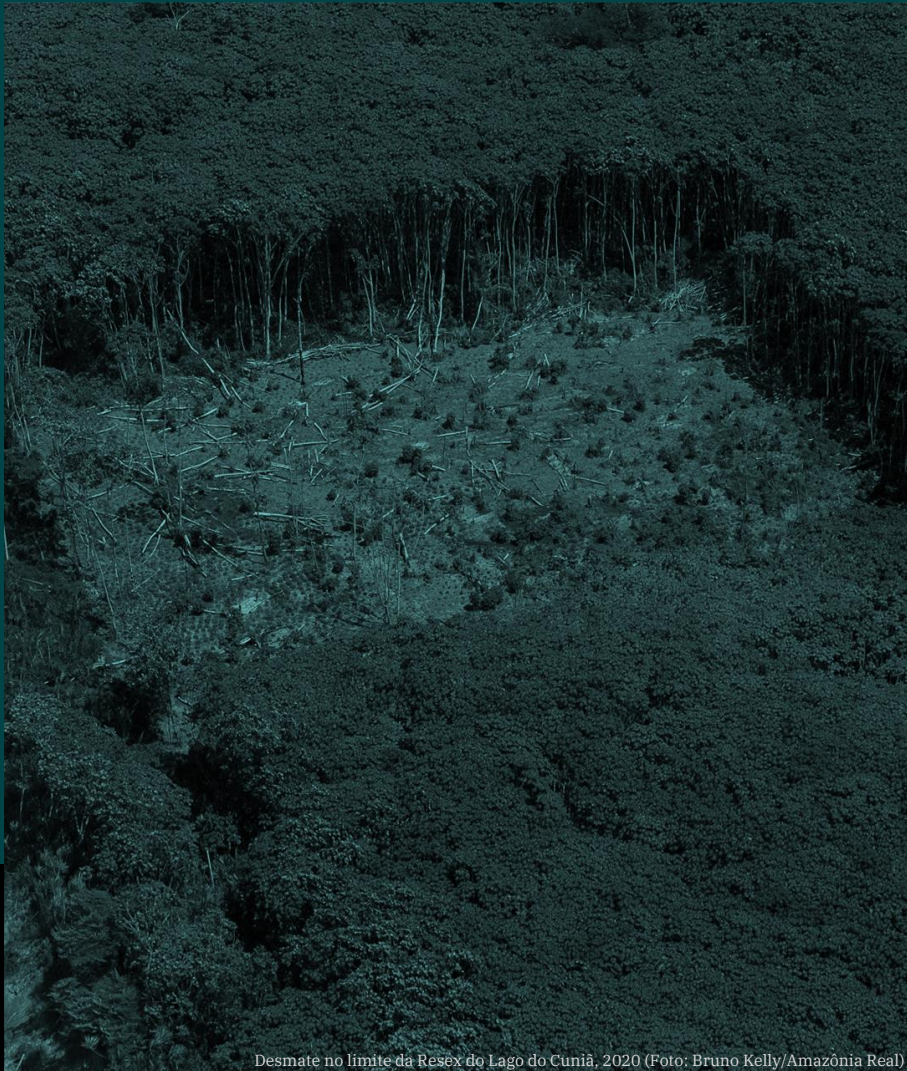


Capítulo 23 En Resumen

Los impactos de la deforestación y el cambio climático en la biodiversidad, los procesos ecológicos y la adaptación ambiental



Desmate no limite da Resex do Lago do Cuniã, 2020 (Foto: Bruno Kelly/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Los impactos de la deforestación y el cambio climático en la biodiversidad, los procesos ecológicos y la adaptación ambiental

Paulo Artaxo^a, Vera Almeida-Val^b, Bibiana Bilbao^c, Paulo Brando^d, Mercedes Bustamante^e, Michael T. Coe^f, Sandra Bibiana Correa^g, Francisco Cuesta^h, Marcos Heil Costaⁱ, Fernando Miralles-Wilhelm^j, Norma Salinas^k, Divino Vicente Silvério^a, Adalberto Luis Val^b

Mensajes clave y recomendaciones

- 1) Para diagnosticar los cambios en curso se necesita una amplia red de observatorios ambientales de la Amazonía y un sistema para compartir bases de datos comparables.
- 2) Las lagunas de conocimiento sobre el balance de carbono (C) son significativas. Es necesario integrar la teledetección de las mediciones de CO₂, los datos de las torres de flujo terrestres, las mediciones con aeronaves, y las herramientas de modelización para cubrir estas lagunas.
- 3) Reducir las emisiones de la quema de biomasa es fundamental para minimizar los impactos negativos en los ecosistemas y la salud humana.
- 4) Se necesitan más estudios integrados sobre la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, por ejemplo, sobre la resiliencia de las especies.
- 5) Es vital realizar más estudios sobre las retroalimentaciones entre el cambio climático y el funcionamiento de los ecosistemas Amazónicos, y deben conocerse y cuantificarse mejor, especialmente en lo que respecta al carbono y al vapor de agua.
- 6) Se necesitan estudios de balance hídrico en toda la cuenca que integren todos los aspectos del ciclo hidrológico.
- 7) Los estudios paleo climáticos son esenciales para comprender la variabilidad natural del clima y el papel histórico del ser humano en la configuración del paisaje a lo largo del tiempo.
- 8) Es necesario realizar estudios sobre la resiliencia de los ecosistemas y las especies ante el aumento de las temperaturas y la reducción de las reservas de agua.
- 9) Además de reducir la deforestación, también es esencial reducir la quema de combustibles fósiles, que es la principal causa del calentamiento global.

Resumen Este capítulo presenta el impacto observado y previsto del cambio climático en los ecosistemas Amazónicos, centrándose en la biodiversidad, los servicios ecosistémicos, el ciclo del carbono, la pesca y las emisiones de la quema de biomasa. También se examinan las repercusiones del cambio climático y del uso de suelo y se destacan las lagunas de conocimiento para comprender mejor estas complejas interacciones.

^a Instituto de Física, Universidad de São Paulo, Rua do Matão 1371, CEP 05508-090, São Paulo - Estado de São Paulo, Brasil, artaxo@if.usp.br

^b Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis, Manaus - AM, 69067-375, Brasil

^c Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080, Venezuela

^d Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Av. Rômulo Maiorana, 700, Torre Vitta Office, sala 1011, Bairro Marco, Belém - PA, Brasil

^e Departamento de Ecología, Universidad Federal de Brasilia, Brasilia, Distrito Federal, 70910-900, Brasil

^f Woodwell Climate Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth MA 02540-1644, EE.UU.

^g Mississippi State University, 75 B. S. Hood Road, Mississippi State, MS 39762, EE.UU.

^h Universidad de las Americas, De Los Colimes esq, Quito 170513, Ecuador

ⁱ Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, Brasil

^j University of Maryland, College Park, MD 20742, EE.UU.

^k Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, San Miguel 15088, Perú

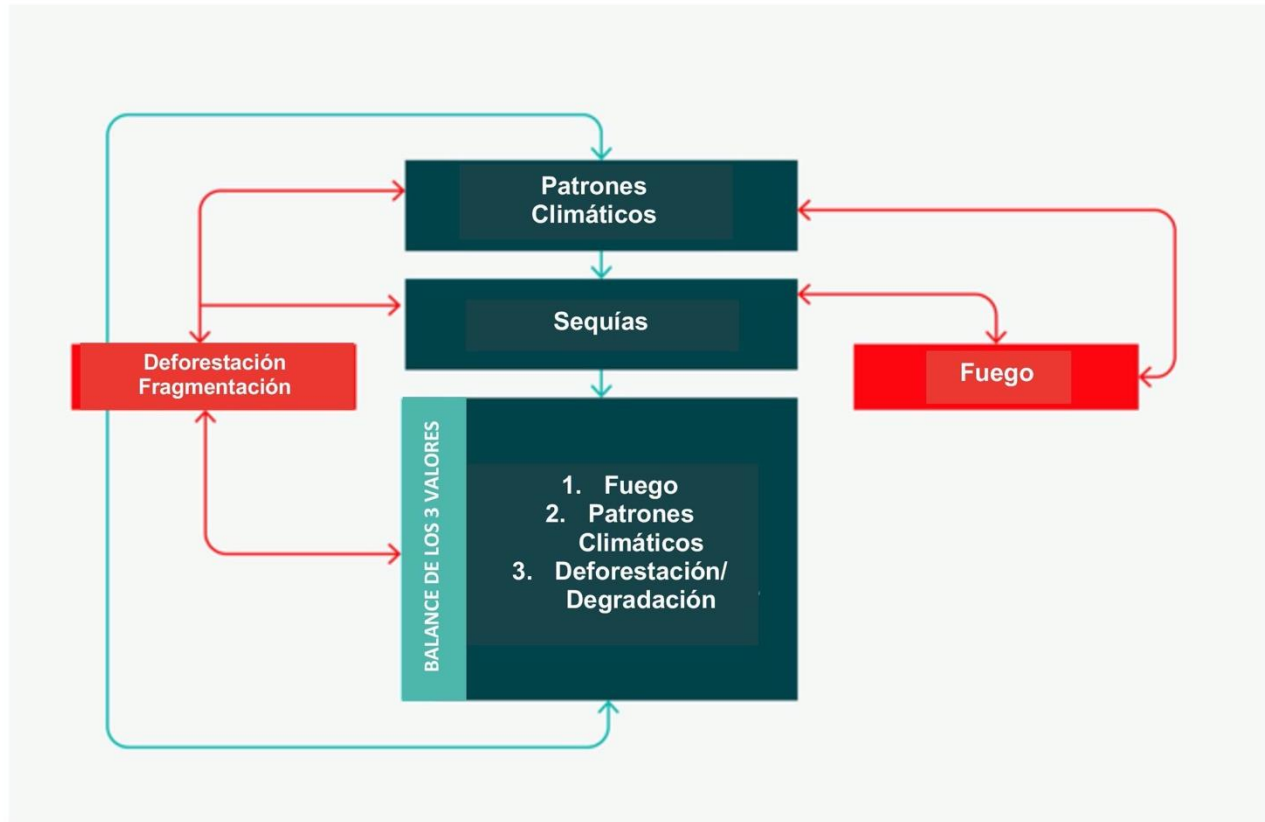


Figura 23.1 Vínculos entre los impactos del clima, la deforestación, la degradación de los bosques y los incendios en el ecosistema Amazónico.

Cambios en la biodiversidad y en los servicios de los ecosistemas provocados por la deforestación y el cambio climático El cambio climático y la deforestación combinados podrían causar una disminución de hasta el 58% en la riqueza de especies arbóreas de la Amazonía para el año 2050, y las especies podrían perder una media del 65% de su superficie original y ambientalmente adecuada¹. Las regiones que podrían verse más afectadas son el este, el suroeste y el sur de la Amazonía. La figura 23.1 ilustra los complejos vínculos entre los impactos del clima, la deforestación, la degradación forestal y los incendios en el ecosistema Amazónico.

En los últimos 30 años, las comunidades arbóreas se han visto cada vez más dominadas por taxones de

gran tamaño y géneros tolerantes a la sequía². Aunque el cambio climático afecta a la biodiversidad, la diversidad de rasgos vegetales puede permitir que las selvas Amazónicas se ajusten a las nuevas condiciones climáticas, protegiendo las funciones del ecosistema Amazónico³ (véase el capítulo 24). Sin embargo, según el escenario RCP 8.5 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la alteración brusca de los conjuntos ecológicos podría exponer simultáneamente a la mayoría de las especies a climas más allá de los límites de sus nichos, lo que afectaría a los bosques tropicales para el año 2050. La escasa variabilidad climática histórica y los gradientes térmicos poco profundos significan que muchas especies de la región ya experimentan una situación cercana a sus límites térmicos máximos en toda su área de

distribución. La Amazonía es una de las regiones del mundo con mayor riesgo, con la posibilidad de que más del 90% de las especies estén expuestas a temperaturas sin precedentes para el año 2100⁴.

La migración hacia hábitats más húmedos y fríos, donde los Andes representan un refugio potencial para muchas especies, podría provocar una pérdida neta de especies en los bosques de las zonas bajas⁵. Sin embargo, el aumento de la riqueza de especies en los Andes puede verse contrarrestado por otras amenazas a la biodiversidad, como la pérdida de hábitat. La protección de la conectividad de las regiones bajas con las altas, que son más frías, puede proporcionar una vía de escape para muchas especies.

Biodiversidad, ecosistemas y servicios acuáticos

Los efectos del cambio climático sobre los peces de la Amazonía aún no se conocen en su totalidad, aunque parecen ser significativos cuando se exponen a los diferentes escenarios del IPCC que tratan sobre la temperatura, el CO₂ y la humedad para el año 2100. Un efecto significativo sobre la función y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos es la alteración del ciclo hidrológico natural debido a los picos inusualmente bajos y altos de los niveles de agua durante los eventos de sequía e inundaciones extremas⁶ (véase el capítulo 22). Estos eventos pueden conducir a cambios en el tamaño, la reproducción, la abundancia y la composición comunitaria de varias especies, incluyendo peces, aves limícolas y delfines de río⁷.

Muchas especies Amazónicas de peces son susceptibles de sufrir pequeños aumentos de temperatura, y la temperatura crítica máxima de algunos grupos de peces está ya muy cerca de la máxima media⁸. El aumento del metabolismo de las especies de aguas cálidas en los hábitats de las regiones bajas puede provocar una mayor ingesta de alimentos y causar consecuencias imprevistas en las redes alimentarias locales. Especies andinas Amazónicas de peces

son muy susceptibles de contracción en su área de distribución, lo que eventualmente llevará a su extinción⁹. Además, los bajos niveles de agua durante los eventos de sequía extrema pueden provocar la fragmentación temporal de los ríos, el bloqueo de migraciones de peces y extinciones locales¹⁰. Los peces de la Amazonía están adaptados a condiciones extremas como un pH bajo, oxígeno disuelto variable, tipos de agua y carbono orgánico disuelto variables y diferentes pH. Sin embargo, aún estamos lejos de comprender cómo la compleja red de impactos antropogénicos recientes modificará la biota acuática.

El cálculo de las pérdidas económicas provocadas por la reducción en la producción pesquera inducida por el cambio climático es un reto debido al escaso conocimiento de la producción pesquera por tipo de hábitat¹¹⁻¹³.

La dinámica forestal en un clima cambiante El cambio climático antropogénico está alterando gravemente la dinámica de los bosques en toda la cuenca, exacerbando los factores crónicos de cambios forestales y el alcance, frecuencia e intensidad de eventos de perturbación simples y compuestos, como los incendios forestales, las sequías, volcánicos por el viento y ataques bióticos¹⁴. Una cuestión pendiente es si esas interacciones entre los factores de estrés y las perturbaciones serán lo suficientemente grandes como para superar la capacidad de los bosques tropicales de resistir y responder a esos cambios, especialmente cuando interactúan con el cambio de uso del suelo y los incendios (véase el capítulo 24).

Si bien los bosques han evolucionado para resistir algún nivel de perturbación, estos nuevos regímenes pueden causar una degradación forestal severa y prolongada, reduciendo la riqueza de especies forestales y la capacidad de almacenamiento de carbono, y causando cambios significativos en la composición de las especies hacia una comunidad

vegetal más generalista y menos diversa. Los bosques más susceptibles a estas perturbaciones crecen a lo largo de los márgenes más secos del sur y del este de la Amazonía, donde la sequía, los incendios forestales y la fragmentación ya interactúan sinérgicamente^{15,16}. Los bosques de las regiones bajas también son especialmente vulnerables¹⁷. A pesar de la extensa degradación causada por las interacciones entre la sequía y los incendios en la Amazonía, todavía no está claro en qué medida está causada por el propio cambio climático, dadas las complejas interacciones que implican el cambio de uso de la tierra.

Aunque los bosques afectados por fenómenos extremos combinados pueden llegar a recuperarse, el plazo no está claro. Una sola incidencia de perturbación puede matar a las especies más susceptibles y seleccionar a las más resistentes, lo que puede reducir la mortalidad de los árboles en sucesivas incidencias. Incluso los bosques más perturbados pueden recuperar algunas de las características anteriores a la perturbación en cuestión de décadas¹⁸. Sin embargo, se espera que el cambio climático aumente el riesgo de nuevas perturbaciones, quizás con incidencias posteriores que impidan la recuperación. Perturbaciones más frecuentes provocarían un empobrecimiento crónico de la biomasa y la biodiversidad, especialmente en los paisajes fragmentados. A medida que el clima regional cambie, se espera que la resiliencia de los bosques disminuya¹⁹. Para mejorar nuestra comprensión de los posibles impactos del cambio climático en un futuro próximo es necesario realizar un seguimiento a largo plazo, desde la escala de los árboles individuales hasta la de todo el continente, y mejorar los actuales modelos dinámicos de vegetación global.

Polinización y dispersión de semillas Las aves son buenos indicadores biológicos del impacto del cambio climático en los servicios de los ecosistemas. En un estudio realizado por Miranda et al.²⁰, los autores

recopilaron amplios datos sobre la presencia de especies representativas del sureste de la Amazonía para evaluar el impacto potencial del cambio climático en los conjuntos de aves. Estimaron que entre el 4 y el 19% de las especies no encontrarían un hábitat adecuado. Dentro de las áreas protegidas (AP) actualmente establecidas, la pérdida de especies podría ser superior al 70%. Los frugívoros serían los más sensibles, con consecuencias para la dispersión de semillas y la regeneración natural. Las partes occidental y septentrional de la zona de estudio se consideraron climáticamente estables.

Costa et al.²¹ concluyeron que el 57% de las 83 especies de murciélagos no encontrarían lugares adecuados en el Parque Nacional de Carajás (Brasil) en los escenarios de cambio climático estudiados. Los polinizadores, los dispersores de semillas y los murciélagos omnívoros serían potencialmente los más afectados, sufriendo una disminución del 28% al 36% de las áreas adecuadas en el marco del año 2070, lo que afectaría las interacciones entre plantas y murciélagos. El cambio climático también afectaría a la distribución de las abejas y, en consecuencia, a la polinización de los cultivos. El análisis y las proyecciones de la distribución de 216 especies en el Bosque Nacional de Carajás mostraron que el 95% de las especies de abejas se enfrentarían a una disminución del área total de ocurrencia²².

Las proyecciones también indicaron que los polinizadores de la nuez de Brasil perderían cerca del 50% de su distribución habitual en el futuro, lo que llevaría a una reducción de casi el 80% del potencial de co-ocurrencia²³ y generaría impactos negativos en las economías y el bienestar humanos. Otro estudio examinó la pérdida de servicios de dispersión de semillas por parte de los primates, indicando reducciones medias del 56% en las áreas de distribución habituales de los primates estudiados²³.

Repercusiones del cambio climático y el cambio de uso de suelo

Las reacciones entre el cambio climático y el de uso de la tierra pueden amplificar sus efectos negativos²⁴. Una cuestión clave es si existe una tendencia general a largo plazo hacia las condiciones de sequía y, de ser así, en qué medida está asociada a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a la deforestación. Para responder a esta pregunta es necesario analizar las causas de la variabilidad interanual e interdecadal de las precipitaciones.

Ciclo y almacenamiento de carbono La variabilidad espacial de la captación de carbono y la productividad de los bosques Amazónicos está estrechamente relacionada con los gradientes climáticos de la cuenca. En la actualidad, los bosques Amazónicos

almacenan alrededor de 110 Pg de carbono en la superficie²⁵, lo que equivale a diez años de quema de combustibles fósiles en todo el mundo. Los bosques primarios amazónicos eliminan el carbono de la atmósfera a un ritmo de unos 50 gramos por metro cuadrado al año ($g\ m^{-2}\ año^{-1}$)²⁶⁻²⁸. Sin embargo, esta tasa ha disminuido drásticamente en las últimas dos décadas debido a la reducción del crecimiento de los árboles y al aumento de la mortalidad de los mismos, asociados a las sequías^{29,30}, y posiblemente al aumento del CO₂ atmosférico, que promueve mayores tasas de renovación de los bosques³¹. Además, muchos árboles Amazónicos operan cerca de su límite bioclimático. Se calcula que la acumulación de carbono en los bosques Amazónicos disminuye casi 9 MgC/ha por cada grado centígrado de aumento de la temperatura³². Las temperaturas diurnas

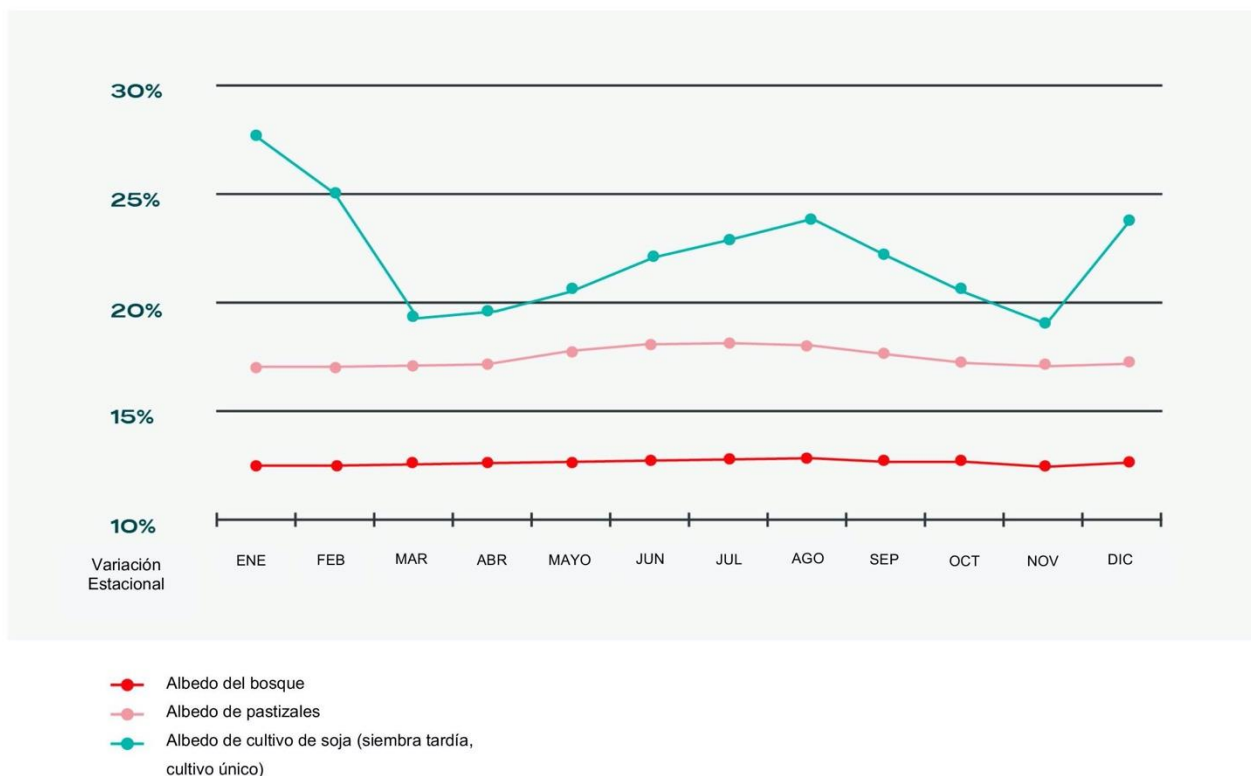


Figura 23.2 Variación estacional de albedo del bosque, pastizales y soja. Se observa un aumento sustancial del albedo de la superficie cuando el bosque se convierte en pastizal o soja. El albedo aumenta del 13% (bosque) al 17% (pastizal).

extremas y las sequías son decisivas al reducir las tasas de crecimiento de los árboles. Como resultado, la capacidad de acumulación de carbono de los bosques Amazónicos no perturbados se está debilitando, con la posibilidad de que los bosques se conviertan en fuentes globales de carbono en pocos años^{29,32}. La deforestación también ha sido un impulsor esencial de las reducciones de almacenamiento de carbono. En 2019, la deforestación en la Amazonía brasileña liberó unas 559 MtCO₂³³. Más de la mitad de las emisiones de CO₂ de los países Amazónicos son resultado de la deforestación y la degradación. Las emisiones netas sólo de 2003 a 2016 se estimaron en 4,7 Gt CO₂³⁴. Los bordes de los bosques restantes se han vuelto mucho más inflamables y propensos a quemarse³⁵. Una vez que los bosques se queman, tienden a ser más gravemente afectados por tormentas de viento que los bosques primario s, lo que explica por qué las reservas de carbono de los bosques pueden disminuir en un 90% cuando se ven afectadas por estas perturbaciones³⁶.

Balance energético e hídrico Los bosques tropicales tienen un albedo más bajo, una mayor evapotranspiración (ET) y una mayor rugosidad que las tierras de cultivo y los pastizales que suelen sustituirlos (véase el capítulo 7). El bajo albedo hace que una fracción significativa de la radiación solar entrante sea absorbida, depositando energía en el sistema foliar. Gran parte de esa energía se utiliza en el proceso de enfriamiento de la evapotranspiración, que suele ser elevado durante todo el año debido a la relativa abundancia de sol y de precipitaciones o de humedad almacenada en el suelo. La relativa alta rugosidad de la superficie aumenta la mezcla atmosférica de la ET y libera energía en la troposfera³⁷. Estas condiciones proporcionan una humedad atmosférica que incrementa las precipitaciones, sobre todo al inicio de la temporada de lluvias³⁸. Como resultado, más del 60% de todas las precipitaciones regresan a la atmósfera por transpiración. Esto tiene el efecto inmediato de enfriar la superficie terrestre

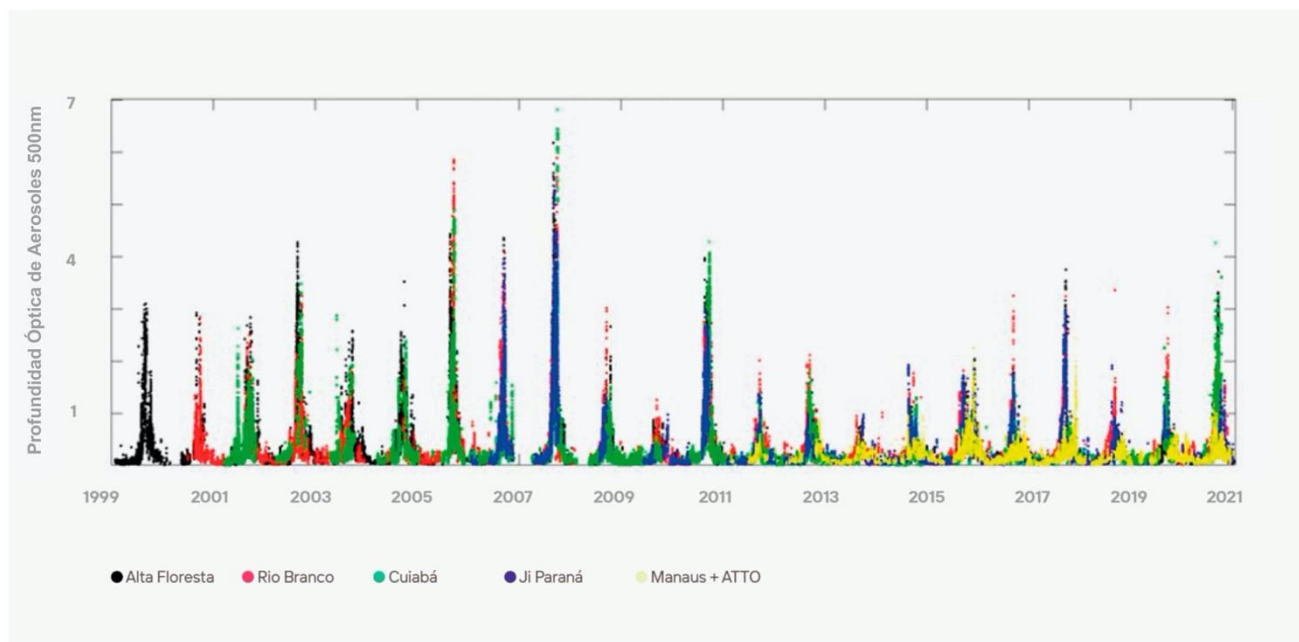


Figura 23.3 Series temporales (2000-2020) de la profundidad óptica de los aerosoles en cinco lugares de la Amazonía brasileña. La importante variabilidad interanual se debe al clima y a las políticas públicas que conducen a la deforestación y a las emisiones de la quema de biomasa.

entre 2 y 5°C^{39,40}. La deforestación y la degradación reducen la evapotranspiración en un 30% o más, aumentan la temperatura de la superficie⁴⁰ y, si son lo suficientemente grandes, reducen las precipitaciones a nivel regional⁴¹⁻⁴³. El tipo de uso de la tierra que sigue a la deforestación tiene un impacto menor, pero aún significativo, donde los cultivos tienen un impacto relativamente mayor en el balance energético que los pastizales⁴⁰. A pesar de los muchos detalles variables de las curvas estacionales, el albedo de los cultivos suele ser mucho mayor que el de los pastizales y el de los bosques (Figura 23.2).

En relación con los bosques a los que sustituyen, los cultivos y los pastizales tienen una densidad y una profundidad de raíces reducidas y una superficie foliar menor. Esto disminuye la demanda de agua y reduce la evapotranspiración⁴⁴⁻⁵², lo que tiende a aumentar la evacuación del agua. La conversión de la vegetación autóctona da lugar a una disminución de la ET media anual de aproximadamente un 30%, con disminuciones mucho mayores en la estación seca^{49,53-55}. Los cambios en la ET repercuten directamente en otras variables que influyen en el balance hídrico superficial; la humedad del suelo y el almacenamiento de aguas subterráneas aumentan hasta en un 30% a nivel local, mientras que el caudal de los arroyos puede aumentar de 3 a 4 veces en las pequeñas cabeceras y hasta en un 20% en ríos muy grandes (por ejemplo, Tocantins/Araguaia)⁵⁶⁻⁶⁰. Los cultivos y los pastizales del sur de la Amazonía evapotranspiran a tasas equivalentes a las de los bosques, pero sólo durante 2 o 3 meses al año en el pico de la temporada de crecimiento⁶¹.

Gran parte de las precipitaciones en la Amazonía son el resultado de la humedad reciclada por el bosque^{62,63} (véase el capítulo 5). Por lo tanto, la disminución de la ET resultante de la deforestación afecta directamente la cantidad, la ubicación y el momento de las precipitaciones. Numerosos estudios han demostrado una clara relación entre la deforestación y

el retraso en el inicio de la estación de lluvias, que además es más corta (es decir, termina antes)^{41,64,65}. En estudios de modelización numérica, Wright et al.³⁸ demostraron que la evapotranspiración aumenta la humedad en toda la atmósfera durante el final de la estación seca, y que esto es decisivo para el inicio de las precipitaciones, acelerándose el inicio en dos o tres meses en comparación con las simulaciones sin ET forestal. La evidencia indica que la humedad de la estación seca en la Amazonía está disminuyendo, lo que hace que la estación seca sea más severa⁶⁶. En un análisis de los datos de los pluviómetros del sur de la Amazonía, Leite-Filho et al.⁴³ estiman que por cada 1% de aumento de la deforestación el inicio de la estación de lluvias se retrasa entre 0,12 y 0,17 días, lo que ha supuesto un retraso de 11 a 18 días en Rondônia, Brasil⁴¹.

Siempre en lo que respecta a la evapotranspiración, las emisiones de GEI y la deforestación tienen efectos opuestos. El aumento de las emisiones y el consiguiente incremento de las temperaturas atmosféricas tienden a aumentar la ET, mientras que la deforestación y la consiguiente conversión de las tierras a la agricultura disminuyen la ET. Una gran cantidad de emisiones de carbono procedentes de la deforestación Amazónica contribuyen al aumento de la temperatura y de los GEI atmosféricos a nivel global, lo que también supone un aumento de la eficiencia del uso del agua en los bosques a través de la fertilización con CO², y una reducción de la cantidad de vapor de agua reciclado a la atmósfera. Estudios recientes muestran un aumento en el déficit de vapor en toda la Amazonía, pero se desconoce si se trata de una tendencia transitoria o permanente o cómo afectará al bosque y generará repercusiones a largo plazo. La reducción de la ET puede repercutir en las precipitaciones, pero los cambios en respuesta a la deforestación dependen de cuánto y dónde se produzca la deforestación. Por lo tanto, el impacto de la deforestación y del cambio climático sobre la hidrología en cualquier lugar será una

función compleja de factores que compiten entre sí⁴⁴. La región oriental del Amazonas sigue siendo especialmente vulnerable a los efectos de la actual conversión del uso de la tierra para la agricultura⁴⁵. En resumen, la importante disminución inicial de la ET iniciada por la deforestación ya ha afectado a gran parte de la Amazonía, especialmente al sur. Tiene el potencial, mediante reacciones a gran escala, de alterar el clima de la región.

Emisiones de aerosoles biogénicos y de incendios y su impacto dentro y fuera de la región La atmósfera Amazónica está dominada por dos estaciones bien definidas. En la estación húmeda, la atmósfera está dominada por partículas de aerosoles biogénicos primarios naturales emitidos directamente por la vegetación⁶⁷⁻⁶⁹.

En la estación seca, las emisiones de quema de biomasa cambian sustancialmente la composición y las propiedades atmosféricas, impactando en el ciclo hidrológico, el balance de radiación y el funcionamiento general del ecosistema.^{14,70-72}. Las importantes emisiones de monóxido de carbono, precursores del ozono, óxidos de nitrógeno, partículas de aerosol y otros compuestos alteran significativamente la composición atmosférica en grandes áreas de Sudamérica, y las partículas pueden viajar miles de kilómetros⁷³⁻⁷⁵. Las emisiones de carbono negro procedentes de la quema de biomasa en la Amazonía cambian el albedo de la nieve y el hielo, lo que repercute en el deshielo de los glaciares andinos. Los componentes críticos de las emisiones de los bosques naturales, como los compuestos orgánicos volátiles (COV) biogénicos, están cambiando, posiblemente asociados al aumento de las temperaturas⁷⁶. Estas emisiones tienen un impacto significativo en el ecosistema, incluyendo el balance de radiación, la química atmosférica y la salud humana⁷⁷⁻⁸⁰. Las emisiones de los incendios se calculan a partir de la superficie quemada por el fuego derivada de los datos de teledetección y de los factores de emisión

medidos en pruebas de campo^{81,82}. Es previsible que la futura variabilidad climática aumente el riesgo y la gravedad de los incendios en las selvas tropicales. En la Amazonía, la mayoría de los incendios, si no todos, son de origen humano. Una forma de evaluar la columna de aerosoles en la atmósfera es observando la llamada profundidad óptica de los aerosoles, que expresa la cantidad total de partículas en toda la columna de aerosoles, como se observa en la figura 23.3.

Conclusiones Los impactos del cambio climático y la deforestación en la Amazonía son fuertes, diversos y están bien documentados. Por donde se mire, el clima y el cambio antropogénico del uso de suelo tienen ya un impacto considerable en los ecosistemas Amazónicos. Por otra parte, también sucede lo contrario, ya que la Amazonía afecta al cambio climático global, especialmente en lo que respecta a las emisiones de carbono debido a la deforestación. La deforestación tropical es responsable de alrededor del 13% de las emisiones mundiales de CO₂⁸³, y Brasil, Colombia, Bolivia y Perú se encuentran entre los 10 países con mayor deforestación tropical. Reducir la deforestación tropical es la forma más rápida y económica de mitigar las emisiones de GEI, y tiene muchos beneficios adicionales. Los cambios climáticos, en particular el aumento de la temperatura, los extremos climáticos y la alteración de los ciclos hidrológicos, están sometiendo a los bosques tropicales a un estrés considerable. La reducción de la quema de biomasa es esencial para minimizar varios aspectos negativos asociados a altas concentraciones de aerosoles, ozono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en extensas áreas de Sudamérica. Tres efectos principales del cambio climático en los sistemas acuáticos (tanto marinos como de agua dulce) son el calentamiento de los ríos y las cuencas hidrográficas, la acidificación y la pérdida de oxígeno. Si consideramos sólo estos efectos, podemos prever la pérdida de hábitat, cambios en la migración de los peces, alteraciones en los

conjuntos de peces y cambios en la distribución espacial de las especies de peces. Se espera una pérdida de biodiversidad no sólo por la deforestación directa, sino también por diferentes sensibilidades de especies vegetales al aumento de la temperatura y reducción de las precipitaciones. Es importante destacar que, además de reducir la deforestación, también es esencial reducir la quema de combustibles fósiles, que es la principal causa del calentamiento global.

References

1. Gomes, V. H. F., Vieira, I. C. G., Salomão, R. P. & ter Steege, H. Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 9, 547–553 (2019).
2. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Glob. Chang. Biol.* 25, (2019).
3. Sakschewski, B. *et al.* Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nat. Clim. Chang.* 6, (2016).
4. Trisos, C. H., Merow, C. & Pigot, A. L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature* 580, 496–501 (2020).
5. Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelus, C. L., Gilman, A. C. & Longino, J. T. Global Warming, Elevational Range Shifts, and Lowland Biotic Attrition in the Wet Tropics. *Science (80-)*. 322, 258–261 (2008).
6. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology* (2016) doi:10.1002/joc.4420.
7. Bodmer, R. *et al.* Major shifts in Amazon wildlife populations from recent intensification of floods and drought. *Conserv. Biol.* 32, 333–344 (2018).
8. Campos, D. F., Val, A. L. & Almeida-Val, V. M. F. The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *J. Therm. Biol.* 72, (2018).
9. Herrera-R, G. A. *et al.* The combined effects of climate change and river fragmentation on the distribution of Andean Amazon fishes. *Glob. Chang. Biol.* (2020) doi:10.1111/gcb.15285.
10. Carvalho Freitas, C. E. de *et al.* The Potential Impacts of Global Climatic Changes and Dams on Amazonian Fish and Their Fisheries. in *New Advances and Contributions to Fish Biology* (2012). doi:10.5772/54549.
11. de França Barros, D. *et al.* Effects of deforestation and other environmental variables on floodplain fish catch in the Amazon. *Fish. Res.* 230, 105643 (2020).
12. Castello, L. *et al.* Fishery yields vary with land cover on the Amazon River floodplain. *Fish Fish.* 19, 431–440 (2018).
13. Goulding, M. *et al.* Ecosystem-based management of Amazon fisheries and wetlands. *Fish Fish.* 20, 138–158 (2019).
14. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* (2012) doi:10.1038/nature10717.
15. Morton, D. C., Le Page, Y., DeFries, R., Collatz, G. J. & Hurtt, G. C. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120163 (2013).
16. Alencar, A. A., Brando, P. M., Asner, G. P. & Putz, F. E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. *Ecol. Appl.* 25, 1493–1505 (2015).
17. Flores, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 4442–4446 (2017).
18. Chazdon, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Sci. Adv.* 2, e1501639 (2016).
19. Schwalm, C. R. *et al.* Global patterns of drought recovery. *Nature* 548, 202–205 (2017).
20. Costa, M. H., Yanagi, S. N. M., Souza, P. J. O. P., Ribeiro, A. & Rocha, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34, L07706 (2007).
21. Miranda, L. S., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Giannini, T. C. Climate change impact on ecosystem functions provided by birds in southeastern Amazonia. *PLoS One* 14, e0215229 (2019).
22. Costa, W. F., Ribeiro, M., Saraiva, A. M., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Giannini, T. C. Bat diversity in Carajás National Forest (Eastern Amazon) and potential impacts on ecosystem services under climate change. *Biol. Conserv.* 218, 200–210 (2018).
23. Giannini, T. C. *et al.* Climate change in the Eastern Amazon: crop-pollinator and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Reg. Environ. Chang.* 20, 9 (2020).
24. Sales, L. P., Rodrigues, L. & Masiero, R. Climate change drives spatial mismatch and threatens the biotic interactions of the Brazil nut. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 30, 117–127 (2021).
25. Betts, A. K. & Silva Dias, M. A. F. Progress in understanding land-surface-atmosphere coupling from LBA research. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2, (2010).
26. Artaxo, P., Hansson, H.-C., Andreae, M. & *et al.* Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review. *Tellus-B (In Press)*. (2021).
27. Ometto, J. P. H. B., Nobre, A. D., Rocha, H. R., Artaxo, P. & Martinelli, L. A. Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. *Oecologia* vol. 143 (2005).
28. Araújo, A. C. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *J. Geophys. Res.* 107, (2002).
29. Chambers, J. Q., Higuruchi, N., Tribuzy, E. S. & Trumbore, S. E. Carbon sink for a century. *Nature* 410, (2001).
30. Brien, R. J. W. *et al.* Long-term decline of the Amazon

- carbon sink. *Nature* 519, 344–348 (2015).
31. Brando, P. M. *et al.* Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* vol. 47 (2019).
 32. McDowell, N. *et al.* Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist* vol. 219 (2018).
 33. Hubau, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, (2020).
 34. INPE. INPE Emission Model. <http://inpe-em.ccst.inpe.br/en/home/> (2021).
 35. Walker, W. S. *et al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, (2020).
 36. Brando, P. M. *et al.* The gathering firestorm in southern Amazonia. *Sci. Adv.* 6, (2020).
 37. Brando, P. M. *et al.* Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. *Glob. Chang. Biol.* 25, (2019).
 38. Panwar, A., Renner, M. & Kleidon, A. Imprints of evaporative conditions and vegetation type in diurnal temperature variations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 4923–4942 (2020).
 39. Wright, J. S. *et al.* Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, (2017).
 40. Lawrence, D. & Vandecar, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Chang.* 5, 27–36 (2015).
 41. Silvério, D. V. *et al.* Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10, 104015 (2015).
 42. Butt, N., De Oliveira, P. A. & Costa, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.* (2011) doi:10.1029/2010JD015174.
 43. Spracklen, D. V. & Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 42, (2015).
 44. Leite-Filho, A. T., de Sousa Pontes, V. Y. & Costa, M. H. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* (2019) doi:10.1029/2018JD029537.
 45. Coe, M. T., Costa, M. H. & Soares-Filho, B. S. 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).
 46. Coe, M. T. *et al.* Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south–southeastern Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120155 (2013).
 47. Costa, M. H., Botta, A. & Cardille, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.* (2003) doi:10.1016/S0022-1694(03)00267-1.
 48. D’Almeida, C. *et al.* The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *Int. J. Climatol.* 27, 633–647 (2007).
 49. de Moraes, J. M., Schuler, A. E., Dunne, T., Figueiredo, R. de O. & Victoria, R. L. Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in eastern Amazonia. *Hydrol. Process.* 20, 2509–2526 (2006).
 50. Lathuillière, M. J., Johnson, M. S. & Donner, S. D. Water use by terrestrial ecosystems: temporal variability in rainforest and agricultural contributions to evapotranspiration in Mato Grosso, Brazil. *Environ. Res. Lett.* 7, 024024 (2012).
 51. Nepstad, D. C. *et al.* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669 (1994).
 52. Pongratz, J. *et al.* The Impact of Land Cover Change on Surface Energy and Water Balance in Mato Grosso, Brazil. *Earth Interact.* 10, 1–17 (2006).
 53. Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M. & Zhang, L. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43, (2007).
 54. Arantes, A. E., Ferreira, L. G. & Coe, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 117, 66–78 (2016).
 55. Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P. & Castanho, A. D. de A. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *J. Hydrol.* 523, 822–829 (2015).
 56. Spera, S. A., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M. N. & Mustard, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil’s last agricultural frontier. *Glob. Chang. Biol.* 22, 3405–3413 (2016).
 57. Coe, M. T., Latrubesse, E. M., Ferreira, M. E. & Amsler, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 119–131 (2011).
 58. Hayhoe, S. J. *et al.* Conversion to soy on the Amazonian agricultural frontier increases streamflow without affecting stormflow dynamics. *Glob. Chang. Biol.* 17, 1821–1833 (2011).
 59. Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T. & Hyndman, D. W. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100755 (2020).
 60. Levy, M. C., Lopes, A. V., Cohn, A., Larsen, L. G. & Thompson, S. E. Land Use Change Increases Streamflow Across the Arc of Deforestation in Brazil. *Geophys. Res. Lett.* 45, 3520–3530 (2018).
 61. Neill, C. *et al.* Watershed responses to Amazon soya bean cropland expansion and intensification. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120425 (2013).
 62. von Randow, R. C. S., von Randow, C., Hutjes, R. W. A., Tomasella, J. & Kruijt, B. Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* 109, 205–220 (2012).

63. Salati, E. & Vose, P. B. Amazon Basin: A System in Equilibrium. *Science* (80-). 225, 129–138 (1984).
64. Maeda, E. E. *et al.* Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth Syst. Dyn.* 8, 439–454 (2017).
65. S. Debortoli, N. *et al.* Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Clim. Change* 132, 251–264 (2015).
66. Fu, R. *et al.* Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 18110–18115 (2013).
67. Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C. & Mechoso, C. R. A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Sci. Rep.* 9, 15331 (2019).
68. Prass, M. *et al.* Bioaerosols in the Amazon rain forest: Temporal variations and vertical profiles of Eukarya, Bacteria and Archaea. *Biogeosciences Discuss.* 1–23 (2021).
69. Whitehead, J. D. *et al.* Biogenic cloud nuclei in the central Amazon during the transition from wet to dry season. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 9727–9743 (2016).
70. Poschl, U. *et al.* Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science* (80-). 329, 1513–1516 (2010).
71. Andreae, M. O. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science* (80-). 303, 1337–1342 (2004).
72. Andreae, M. O. *et al.* Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 6041–6065 (2012).
73. Andreae, M. O. *et al.* The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 15, (2015).
74. Andreae, M. O. *et al.* Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. *Geophys. Res. Lett.* 28, 951–954 (2001).
75. Freitas, S. R. *et al.* Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environ. Fluid Mech.* 5, 135–167 (2005).
76. Reddington, C. L. *et al.* Analysis of particulate emissions from tropical biomass burning using a global aerosol model and long-term surface observations. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 11083–11106 (2016).
77. Yáñez-Serrano, A. M. *et al.* Amazonian biogenic volatile organic compounds under global change. *Global Change Biology* vol. 26 (2020).
78. Forster, P. *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (eds. Solomon, S. D. *et al.*) (Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).
79. Artaxo, P. *et al.* Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discuss.* 165, 203 (2013).
80. Bela, M. M. *et al.* Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 757–782 (2015).
81. Butt, E. W. *et al.* Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. *Environ. Res. Commun.* 2, (2020).
82. van Marle, M. J. E. *et al.* Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973–2014). *Global Biogeochem. Cycles* 31, (2017).
83. Randerson, J. T., Chen, Y., Van Der Werf, G. R., Rogers, B. M. & Morton, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *J. Geophys. Res. G Biogeosciences* 117, (2012).
84. GCP. Global Carbon Budget. *The Global Carbon Project* (2020).