

Capítulo 28 En Resumen

Opciones de restauración para el Amazonas



Barcarena. Para: bacia de rejeitos da Alunorte, controlada pela Norsk Hydro (Foto Pedrosa Neto/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Opciones de restauración para el Amazonas

Jos Barlow^{a*}, Plinio Sist^{bc*}, Rafael Almeida^d, Caroline C. Arantes^e, Erika Berenguer^f, Patrick Caron, Francisco Cuesta^g, Carolina R. C. Doria^h, Joice Ferreiraⁱ, Alexander Flecker, Sebastian Heilpern^j, Michelle Kalamandeen^k, Alexander C. Lees^l, Nathália Nascimento^m, Marielos Peña-Clarosⁿ, Camille Pipoñot^o, Paulo Santos Pompeu^p, Carlos Souza^q, Judson F. Valentim^r

Mensajes clave y recomendaciones

- 1) La restauración abarca un amplio conjunto de objetivos relacionados con la práctica de recuperar la biodiversidad y las funciones y servicios de los ecosistemas, como la calidad del agua, la captura de carbono y los medios de vida de la población. Abarca los ámbitos acuático y terrestre, y va más allá de los ecosistemas naturales para incluir la recuperación de actividades económicas socialmente justas en tierras deforestadas.
- 2) Dentro de los sistemas terrestres, las opciones de restauración específicas de cada lugar incluyen acelerar la recuperación tras la explotación minera, reforestar las vastas franjas de tierra deforestada, facilitar la recuperación de los bosques primarios degradados y la restauración de las actividades económicas sostenibles en las tierras deforestadas mediante intensificación de la agroforestería, o el mejoramiento de los sistemas de barbecho.
- 3) La restauración de los sistemas acuáticos requiere la aplicación de técnicas para remediar los hábitats acuáticos y terrestres contaminados, incluidos los afectados por la minería, el petróleo y el plástico; el desarrollo y la aplicación de normas para restablecer los regímenes de flujo naturales; la eliminación de las barreras que fragmentan los ríos e interrumpen la conectividad, y la puesta en marcha de asociaciones de colaboración para recuperar la pesca y los hábitats de las llanuras de inundación.
- 4) El alto costo y la complejidad de muchas opciones de restauración significan que sólo deben utilizarse como último recurso; para vastas áreas de la Amazonía, el objetivo principal debe ser evitar

^a Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK, jos.barlow@lancaster.ac.uk

^b Agricultural Research Centre for International Development – France. CIRAD, sist@cirad.fr

^c Université de Montpellier, UR Forests & Societies, Montpellier 34398, France

^d Department of Ecology and Evolutionary Biology, Cornell University, E145 Corson Hall, Ithaca NY 14853, USA

^e Division of Forestry and Natural Resources, 325G Percival Hall, 1145 Evansdale Drive, West Virginia University, Morgantown, WV 26506

^f Environmental Change Institute, Oxford University Centre for the Environment, University of Oxford, South Parks Road, Oxford OX1 3QY, UK

^g Grupo de Investigación en Biodiversidad, Medio Ambiente y Salud (BIOMAS), Universidad de Las Américas (UDLA), De Los Colimes esq, Quito 170513, Ecuador

^h Laboratório de Ictiologia e Pesca, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Av. Pres. Dutra 2965, Olaria, Porto Velho RO 76801-058, Brazil

ⁱ Embrapa Amazonia Oriental, Trav. Dr. Enéas Pinheiro, s/nº, Bairro Marco, Belém PA 66095-903, Brazil

^j Department of Natural Resources, Cornell University, 226 Mann Drive, Ithaca NY 14853, USA

^k School of Geography, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

^l Department of Natural Sciences, Manchester Metropolitan University, All Saints Building, Manchester M15 6BH, UK

^m Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Instituto de Estudos Climáticos, Vitória, Espírito Santo, Brazil

ⁿ Department of Environmental Sciences, Wageningen University & Research, PO Box 47, 6700AA Wageningen, The Netherlands

^o Smithsonian Conservation Biology Institute & Smithsonian Tropical Research Institute, 3001 Connecticut Avenue NW, Washington DC 20008, USA

^p Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Aqueanta Sol, Lavras MG 37200-900, Brazil

^q Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), Trav. Dom Romualdo de Seixas 1698, Edifício Zion Business 11th Floor, Bairro Umarizal, Belém PA 66055-200, Brazil

^r Agroforestry Research Center of Acre, Embrapa Acre, Rodovia BR-364, Km 14 (Rio Branco/Porto Velho), Rio Branco AC 69900-970, Brazil

la necesidad de una futura restauración mediante la conservación de los bosques y cuerpos de agua.

Resumen Este capítulo examina las oportunidades y enfoques específicos de cada lugar para restaurar los sistemas terrestres y acuáticos, centrándose en las acciones y beneficios locales. Las consideraciones relativas al paisaje y al conjunto del bioma se abordan en el capítulo 29.

Introducción Los cambios provocados por el ser humano en los paisajes Amazónicos han afectado a la biodiversidad y a los procesos ecológicos asociados; esto, a su vez, tiene impactos directos e indirectos en el bienestar humano. Aunque gran parte de la atención en la Amazonía debería centrarse en evitar una mayor pérdida y degradación de los bosques (véase el capítulo 27), cada vez se es más consciente de la importancia de las acciones de restauración destinadas a revertir estos procesos. La restauración podría ser un componente fundamental de las soluciones basadas en la naturaleza que abordan los desafíos sociales críticos¹, incluida la protección y la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos y terrestres, ya sean naturales, artificiales o una combinación de ambos².

Definiciones y objetivos de la restauración Antes de examinar el papel de la restauración, debemos definirla en los ámbitos acuático y terrestre. Utilizamos la restauración como un término general que abarca un amplio conjunto de objetivos relacionados con la práctica de la recuperación de la biodiversidad y las funciones y servicios de los ecosistemas, como la calidad del agua, la captura de carbono y/o los medios de vida de las personas³. Por lo tanto, nuestro uso de la restauración incluye términos específicos como *rehabilitación*, *remediación* y *resilivestrición*. De manera crucial, la restauración también incluye la recuperación de actividades económicas

sostenibles y socialmente justas en las tierras deforestadas. En muchos casos, las acciones requerirán evitar más daños ambientales, así como fomentar la recuperación

Las acciones de restauración pueden ser activa (intervención humana) o pasivas (procesos naturales). Especificamos cual es el enfoque se requiere para para obtener un buen resultado esperado entretanto reconocemos que a menudo se trata de un proceso continuo. Incluso la restauración pasiva de bosques secundarios o degradados puede requerir una toma de decisiones activa e intervenciones de gestión (por ejemplo, control de incendios, cercado). Por último, las consideraciones espaciales no se tienen en cuenta aquí; la planificación estratégica de las opciones de restauración en toda la cuenca Amazónica y dentro de los paisajes y las cuencas de captación se abordan en el capítulo 29.

Opciones de restauración terrestre

Restauración tras la eliminación completa del suelo La extracción de minerales e hidrocarburos elimina o altera los suelos, interrumpe el ciclo de los nutrientes e inhibe gravemente la recuperación de los bosques al destruir el banco de semillas y la biota del suelo⁴⁻⁶. Otros efectos secundarios, como la erosión del suelo y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por el mercurio (Hg) y/o el drenaje ácido de las minas, pueden detectarse a cientos de kilómetros de distancia de los emplazamientos mineros.^{7,8} El nivel de degradación de la extracción de hidrocarburos hace que la recuperación total sea muy improbable, y los índices de recuperación son bajos o se estancan por completo⁵. En consecuencia, es fundamental centrarse en la reactivación de los procesos funcionales (producción primaria, flujos de energía y ciclos de nutrientes) y ecológicos (composición de especies, mecanismos de dispersión, linajes evolutivos distintos) mediante la restauración

activa⁹⁻¹². Las técnicas activas para restaurar las tierras contaminadas incluyen la mejora de las condiciones del suelo mediante la replantación de especies arbóreas leguminosas¹³ o la inoculación de los suelos con microorganismos degradantes¹³.

Muchos países Amazónicos han desarrollado procesos sistemáticos de restauración tras la explotación minera que incluyen el relleno de los emplazamientos mineros con tierra vegetal y el tratamiento y relleno de las balsas de residuos como parte de las estrategias de "cierre a medida que avanza". En el caso de las minas más grandes, el cumplimiento de la restauración tras el cierre de la mina suele estar vinculado a las salvaguardias ambientales y sociales de las principales instituciones financieras multilaterales. Sin embargo, las políticas mineras carecen de seguimiento y aplicación, y en general son débiles o inexistentes para las operaciones de mediana y pequeña escala. Además, no existen planes para restaurar las zonas afectadas por la minería ilegal.

Restauración de la vegetación en terrenos deforestados La pérdida de al menos 867.675 km² de bosques primarios Amazónicos hasta la fecha significa que hay muchas oportunidades de restauración forestal. La mayoría de los bosques secundarios Amazónicos resultantes de la restauración pasiva tienen menos de 20 años¹⁴. En la Amazonía brasileña, la edad media es de sólo siete años, y los bosques secundarios muy jóvenes (≤ 5 años) representan casi la mitad de la extensión total de los bosques secundarios¹⁵. El crecimiento y el estado ecológico de estos bosques secundarios pueden mejorarse mediante una gestión activa. En algunos casos, el cercado puede ser importante para protegerlos del ganado^{16,17}, pero excluir el fuego es una prioridad clave: los bosques secundarios pueden ser más inflamables que los primarios, ya que son más secos y cálidos durante el día¹⁸, y los bosques secundarios quemados se recuperan a un ritmo mucho más lento¹⁹. El valor de los

bosques secundarios también aumentará si se protegen los bosques primarios existentes, ya que se promoverá la colonización de especies, lo que puede aumentar el valor de los bosques secundarios para la biodiversidad²⁰ y las reservas de carbono¹⁹. Sin embargo, la protección de los bosques secundarios contra las perturbaciones y la tala sigue siendo un reto; a menudo se encuentran en paisajes muy deforestados y se considera que tienen poco valor por sí mismos, lo que puede ser un factor clave del aumento de sus tasas de tala en la última década²¹.

En cuanto a la restauración activa, los enfoques varían, pero uno de los más populares consiste en plantar ejemplares de diversas especies²². La configuración espacial de la restauración activa es importante; los árboles nodriza pueden fomentar la dispersión de semillas en las zonas de restauración, y la nucleación aplicada (en la que la plantación en pequeñas parcelas fomenta la recuperación de los bosques a mayor escala) ha dado buenos resultados en otras partes del Neotrópico^{23,24}.

Restauración de bosques degradados Se estima que el 17% de los bosques Amazónicos se degradaron por perturbaciones tales como la tala, los incendios o el viento entre 1995 y 2017²⁵. Lo más importante es que, durante este periodo, el 14% de los bosques degradados acabaron deforestándose y el 29% volvieron a degradarse²⁵, lo que pone de manifiesto la importancia de proteger estos bosques degradados y permitir su recuperación. La enorme escala espacial y la complejidad de la degradación de los bosques en la Amazonía significa que las estrategias más rentables y escalables deben centrarse en evitar que se produzcan eventos de perturbación en primer lugar, o que vuelvan a producirse donde ya se han producido. El complejo conjunto de factores humanos que provocan las perturbaciones implica una amplia gama de estrategias. Parte de la degradación puede evitarse reduciendo la propia deforestación. La pre-

vención de los incendios forestales implicará la reducción o el control de las fuentes de ignición en el paisaje, como las hogueras utilizadas en el proceso de deforestación, y la vinculación de la detección temprana de los incendios con el rápido despliegue de los equipos de lucha contra el fuego²⁶. Evitar la tala ilegal y convencional es clave, pero sigue siendo un enorme reto en toda la Amazonía²⁷. Otros esfuerzos deberían tratar de evitar la aparición conjunta de perturbaciones, ya que sus impactos combinados pueden exacerbar el cambio ecológico y limitar la recuperación.

Restauración de actividades económicas sostenibles en tierras deforestadas Las soluciones innovadoras para la restauración de los agroecosistemas y la producción sostenible de alimentos, fibras y otros bioproductos en las tierras deforestadas son vitales para conciliar los objetivos medioambientales con un desarrollo económico inclusivo y equitativo, especialmente a nivel local. La necesidad de actividades económicas sostenibles y socialmente justas en las tierras deforestadas es mayor allí donde la agricultura ya no es rentable o no lo es todavía. Aquí presentamos tres amplios enfoques para mejorar la productividad.

(i) La intensificación sostenible, es decir, el aumento de la productividad de la tierra, la mano de obra o el capital, reduciendo al mismo tiempo el impacto medioambiental, tiene un potencial especial para los pastos, siempre que los sistemas de gobernanza eficaces sean capaces de evitar una mayor conversión de la tierra y garantizar un desarrollo sostenible²⁸. Según Strassburg et al.²⁹, el aumento de la productividad de los pastos en la Amazonía brasileña a tan sólo un 49-52% de su potencial sería suficiente para satisfacer la demanda de alimentos, madera y biocombustibles en 2040, sin necesidad de convertir zonas adicionales de vegetación nativa. Esto supondría la mitigación de unos 14,3 GT de CO₂e por la deforestación evitada. Las soluciones tecnológicas

para la intensificación sostenible de los pastos incluyen el cambio de pastos continuos a rotativos³⁰, la adopción de pastos mixtos con leguminosas^{31,32}, y el uso de sistemas silvopastorales que integran árboles y diferentes agroecosistemas³³⁻³⁶.

(ii) La agrosilvicultura ofrece otra opción para regenerar tierras improductivas y mantener la producción en tierras ya deforestadas, y es especialmente adecuada para las pequeñas explotaciones. Los sistemas agroforestales integran árboles y cultivos en el mismo terreno, y pueden secuestrar carbono en los suelos y en la vegetación como co-beneficio³⁷. La agrosilvicultura contribuye a más de un tercio de los esfuerzos de restauración identificados en la Amazonía brasileña³⁸, incluye muchas especies autóctonas y proporcionará beneficios más allá del área plantada, como la mejora de la permeabilidad del paisaje para la biota forestal o la mediación de las temperaturas del paisaje.

(iii) La mejora de los sistemas de barbecho agrícola tiene un gran potencial para la restauración económica sostenible en la Amazonía, ya que el cultivo itinerante es un pilar de los sistemas agrícolas tradicionales y común en toda la cuenca. Entre las opciones de gestión de los sistemas de barbecho agrícola se incluye la reducción del uso del fuego mediante la adopción de técnicas como la de cortar y triturar³⁹⁻⁴¹, reduciendo los periodos de cultivo y aumentando el periodo de barbecho para restaurar el suelo y la productividad agrícola^{42,43}. La ampliación de los periodos de barbecho tiene beneficios adicionales, ya que puede ayudar a proteger la biodiversidad, facilitar la conectividad y mejorar los servicios de los ecosistemas, como las funciones hidrológicas.

Sea cual sea el enfoque que se adopte o fomente, es importante que la restauración de la producción económica potencie la complejidad y la diversidad biológica en lugar de promover la uniformidad y la

especialización como forma de controlar la naturaleza y maximizar los beneficios^{44,45}. Los enfoques deben reconocer las especificidades del contexto y utilizar tecnologías, innovaciones y vías de transformación adaptadas localmente para abordar las múltiples funciones de la agricultura, los bosques y las actividades rurales. La restauración de las tierras agrícolas en la Amazonía requiere una amplia inversión en el diseño de la agricultura, utilizando herramientas para cartografiar la idoneidad de la tierra⁴⁶, y planes de uso de la tierra comunales⁴⁷. A pesar de los avances en los conocimientos y las políticas⁴⁸, las actividades económicas sostenibles y socialmente justas aún no han superado las barreras para su adopción a gran escala^{35,49}.

Opciones de restauración acuática

Restauración tras la contaminación Los contaminantes que degradan los ecosistemas pueden provenir de muchas fuentes y dispersarse ampliamente por los paisajes y los ríos. Aunque controlar las fuentes puntuales de contaminación es técnicamente posible, la economía, la mala gobernanza y la falta de políticas adecuadas suponen un reto. Abordar las fuentes no puntuales añade más complejidades y, en muchos casos, requiere integrar la restauración en vastas áreas que incluyen hábitats terrestres y acuáticos⁵⁰. A diferencia de la remediación de la contaminación puntual, la restauración de las vías fluviales degradadas por fuentes no puntuales es considerablemente más difícil y, en muchos casos, requiere la restauración de vastas áreas de hábitats terrestres.

Las fuentes de contaminación de las masas de agua Amazónicas incluyen la industria, la agricultura, las aguas residuales, el mercurio y otros metales pesados procedentes de la minería y los vertidos de petróleo. La contaminación derivada de la extracción de petróleo y la minería ha recibido una atención considerable porque está muy extendida, puede ser

especialmente perjudicial para los ecosistemas y es difícil de limpiar, y afecta a muchas personas que dependen directamente del agua de los ríos para beber y bañarse, y alimentarse del pescado. En lo que respecta a la restauración directa del agua, el uso de la cal apagada para eliminar las partículas en suspensión parece ser un proceso eficaz y no oneroso para que los mineros del oro eviten la metilación del Hg en las balsas de residuos cuando se combina con el drenaje rápido de las aguas de la mina⁵¹.

El plástico afecta cada vez más a los ecosistemas acuáticos Amazónicos, a las cadenas alimentarias⁵²⁻⁵⁴, y a la salud humana⁵⁵. El Amazonas es ahora uno de los ríos más contaminados por plástico del mundo⁵⁶. Se han detectado grandes cantidades de microplásticos en los sedimentos fluviales de la ciudad de Manaus. Se han encontrado concentraciones especialmente altas de microplásticos en las partes más lentas de los ríos donde se depositan los sedimentos, como en las partes poco profundas del bajo Río Negro⁵⁷. La mitigación de la contaminación por plásticos es un enorme desafío mundial⁵⁸; sin embargo, algunas naciones Amazónicas, como Colombia, Ecuador y Perú, están empezando a elaborar normas que regulan el uso y la eliminación de plásticos⁵⁹ y Perú ha legislado una eliminación progresiva de las bolsas de plástico de un solo uso⁶⁰.

Eliminación de represas y restablecimiento de los ciclos de flujo naturales y de la conectividad En Sudamérica, los intentos de minimizar el impacto de las represas hidroeléctricas en la conectividad de los ríos son en su mayoría ineficaces⁶¹⁻⁶³. La eliminación de las represas es una alternativa, y puede revertir algunos de sus efectos ambientales^{64,65}. La justificación de la eliminación de una represa depende del contexto en el que se construyó⁶⁶, y en los últimos años se han propuesto varios marcos para priorizar la eliminación^{67,68}. Normalmente se trata de comparar la cantidad de energía producida con una serie de objetivos medioambientales (por ejemplo, la

conectividad). Un ejemplo de represa que podría ser prioritaria para su eliminación es la central hidroeléctrica de Balbina (Brasil). Balbina sólo suministra el 10% de la energía que consume Manaus (una metrópolis con 1,8 millones de habitantes), pero creó un embalse de más de 2.300 km² y contribuyó al desplazamiento y la masacre de los pueblos Indígenas Waimiri Atroari⁶⁹. Además, la eliminación de una parte de las numerosas pequeñas represas en cuencas como la del Xingu podría restablecer la conectividad, mejorar la calidad del agua y beneficiar a la biodiversidad, sin incurrir en grandes costos sociales (por ejemplo, reducir la disponibilidad de agua).

Restaurar la pesca y frenar la sobrepesca La pesca proporciona a millones de personas en la Amazonía, desde los pueblos Indígenas hasta las poblaciones urbanas, su principal fuente de proteínas, omega-3 y otros nutrientes esenciales^{70,71}. Restaurar la pesca implica, en parte, abordar la sobrepesca mediante el desarrollo y la aplicación de prácticas y reglamentos de pesca sostenibles, incluyendo reglamentos basados en los rasgos, restaurando y protegiendo los hábitats críticos y mejorando el seguimiento. La aplicación de la normativa en una zona tan extensa y compleja como la Amazonía es difícil y costosa. Los sistemas de cogestión basados en los derechos de propiedad compartidos pueden ser especialmente eficaces, sobre todo si la responsabilidad de la gestión recae en los usuarios y gobiernos locales. La cogestión también puede fortalecer las organizaciones locales, mejorar las relaciones entre las partes interesadas, crear mecanismos para restringir el acceso (es decir, definir los límites), crear incentivos (por ejemplo, estrategias de marketing) y mejorar el cumplimiento de las normas⁷².

Restaurar las llanuras de inundación Las llanuras de inundación están amenazadas por una combinación de factores de estrés, como la pérdida de conectividad hidrológica y de hábitat, que tienen efectos

en cascada sobre la biota y repercuten negativamente en la producción y la diversidad pesquera local y regional⁷³. La restauración de las llanuras de inundación requiere el restablecimiento de los regímenes naturales de inundación y la conexión de las llanuras de inundación con otros hábitats críticos. Los programas de restauración de llanuras de inundación pueden llevarse a cabo mediante asociaciones de colaboración y la participación de las partes interesadas⁷⁴. Los programas exitosos abordan los problemas con las regulaciones del pastoreo de ganado e involucran a las comunidades pesqueras como beneficiarios clave de los hábitats restaurados.

Indicadores de éxito Existe una amplia gama de indicadores potenciales de éxito^{75,76}, que varían mucho en cuanto a su facilidad y escalabilidad. Por ejemplo, las plataformas de código abierto, como MapBiomias, permiten evaluar los cambios anuales de la cubierta forestal en toda la Amazonía con una precisión razonable. Sin embargo, los cambios a nivel de propiedad o de paisaje y de captación requerirán probablemente evaluaciones más personalizadas e imágenes de alta resolución⁷⁷. Una comprensión más completa del éxito de la restauración necesitará de evaluaciones terrestres (trabajo en campo) para evaluar si hay mejoras en la provisión de servicios de los ecosistemas, biodiversidad terrestre y acuática y valores socioeconómicos⁷⁸. Estos indicadores son mucho más difíciles de recopilar a escala, y deben definirse de forma participativa con las partes interesadas locales para garantizar que sean rentables, realistas teniendo en cuenta los conocimientos y recursos disponibles, y sostenibles en el tiempo⁷⁹. Las nuevas tecnologías, como la aplicación móvil **Ictio**, diseñada para recopilar información estandarizada sobre la pesca de usuarios individuales a escala, son una posible solución. Deberían desarrollarse otras herramientas prácticas que utilicen criterios sencillos para evaluar los

proyectos de restauración obligatorios en el contexto de las políticas públicas⁸⁰. Por último, es necesario aprender del seguimiento y la evaluación; la información debe ser puesta a disposición, analizada y utilizada para evaluar la eficacia de la restauración. Estos análisis también pueden contribuir a ejercicios de modelización que exploren diferentes escenarios de restauración a lo largo del tiempo, permitiendo a las partes interesadas tomar las decisiones más rentables y beneficiosas y seleccionar los programas de restauración que mejor se ajusten a sus objetivos.

Conclusiones Hay muchas oportunidades de restauración que son relevantes y técnicamente viables en diversos contextos Amazónicos. Muchos enfoques de restauración son costosos y, por lo tanto, se enfrentan a importantes desafíos en cuanto a la escalabilidad espacial y temporal. La restauración activa y la remediación son especialmente difíciles de aplicar de forma eficaz y de ampliar, pero siguen siendo esenciales en situaciones en las que los enfoques pasivos son ineficaces. Por último, la restauración sólo debería considerarse un último recurso. En vastas zonas de la Amazonía, el objetivo principal debería ser evitar la necesidad de una futura restauración mediante la conservación de bosques y masas de agua intactos.

Referencias

1. Seddon, N., Turner, B., Berry, P., Chausson, A. & Girardin, C. A. J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change* vol. 9 84–87 (2019).
2. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. & Maginnis, S. *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. (2016).
3. Chazdon, R. & Brancalion, P. Restoring forests as a means to many ends. *Science (80-)*. 365, 24–25 (2019).
4. Lamb, D., Erskine, P. D. & Parrotta, J. A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science (80-)*. 310, 1628–1632 (2005).
5. Kalamandeen, M. *et al.* Limited biomass recovery from gold mining in Amazonian forests. *J. Appl. Ecol.* 57, 1730–1740 (2020).
6. Barrios, E., Gudeta, W. S., Keith, S. & Sinclair, F. Agroforestry and Soil Health: Trees, Soil Biota and Ecosystem Services. in *Soil Ecology and Ecosystem Services* 315–330 (Oxford University Press, 2012).
7. Diringer, S. E. *et al.* River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17, 478–487 (2015).
8. Sonter, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 8, 1–7 (2017).
9. Chazdon, R. L. *et al.* The potential for species conservation in tropical secondary forests. *Conserv. Biol.* 23, 1406–1417 (2009).
10. Edwards, D. P., Massam, M. R., Haugaasen, T. & Gilroy, J. J. Tropical secondary forest regeneration conserves high levels of avian phylogenetic diversity. *Biol. Conserv.* 209, 432–439 (2017).
11. Rocha, R. *et al.* Secondary forest regeneration benefits old-growth specialist bats in a fragmented tropical landscape. *Sci. Rep.* 8, 1–9 (2018).
12. Ferreira, J. *et al.* Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. *Nat. Clim. Chang.* 8, 744–749 (2018).
13. Couic, E. *et al.* Mercury behaviour and C, N, and P biogeochemical cycles during ecological restoration processes of old mining sites in French Guiana. *Environ. Sci. Process. Impacts* 20, 657–672 (2018).
14. Chazdon, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Sci. Adv.* 2, e1501639 (2016).
15. Smith, M. N. *et al.* Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nat. Plants* 6, 1225–1230 (2020).
16. Griscom, H. P., Griscom, B. W. & Ashton, M. S. Forest Regeneration from Pasture in the Dry Tropics of Panama: Effects of Cattle, Exotic Grass, and Forested Riparia. *Restor. Ecol.* 17, 117–126 (2009).
17. Wassie, A., Sterck, F. J., Teketay, D. & Bongers, F. Effects of livestock exclusion on tree regeneration in church forests of Ethiopia. *For. Ecol. Manage.* 257, 765–772 (2009).
18. Ray, D., Nepstad, D. & Moutinho, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecol. Appl.* 15, 1664–1678 (2005).
19. Heinrich, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nat. Commun.* 12, 1–11 (2021).
20. Lennox, G. D. *et al.* Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 24, 5680–5694 (2018).
21. Wang, Y. *et al.* Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* 3, 290–295 (2020).
22. da Cruz, D. C., Benayas, J. M. R., Ferreira, G. C., Santos, S. R. &

- Schwartz, G. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New For.* 52, 1–16 (2021).
23. Rodrigues, S. B. *et al.* Direct seeded and colonizing species guarantee successful early restoration of South Amazon forests. *For. Ecol. Manage.* 451, 117559 (2019).
 24. Zahawi, R. A., Holl, K. D., Cole, R. J. & Reid, J. L. Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *J. Appl. Ecol.* 50, 88–96 (2013).
 25. Bullock, E. L., Woodcock, C. E., Souza Jr, C. & Olofsson, P. Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon. *Glob. Chang. Biol.* 26, 2956–2969 (2020).
 26. Nóbrega Spínola, J., Soares da Silva, M. J., Assis da Silva, J. R., Barlow, J. & Ferreira, J. A shared perspective on managing Amazonian sustainable-use reserves in an era of megafires. *J. Appl. Ecol.* 57, 2132–2138 (2020).
 27. Brancalion, P. H. S. *et al.* Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Sci. Adv.* 4, eaat1192 (2018).
 28. Garrett, R. D. *et al.* Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* 53, 233–243 (2018).
 29. Strassburg, B. B. N. *et al.* When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* 28, 84–97 (2014).
 30. Dias-Filho, M. B. Estratégias de recuperação de pastagens degradadas na Amazônia Brasileira. *Doc. / Embrapa Amaz. Orient.* Junho, 25 (2015).
 31. Valentim, J. F. & Andrade, C. M. S. de. Perspectives of grass-legume pastures for sustainable animal production in the tropics. *Reun. Annu. DA Soc. Bras. Zootec.* 40, 142–154 (2004).
 32. Zu Ermgassen, E. K. H. J. *et al.* Results from on-the-ground efforts to promote sustainable cattle ranching in the Brazilian Amazon. *Sustainability* 10, 1301 (2018).
 33. Uphoff, N. *et al.* *Biological approaches to sustainable soil systems.* (CRC Press, 2006).
 34. de Sousa, S. G. A., Wandelli, E. V., Garcia, L. C., Lourenco, J. N. de P. & Uguen, K. Sistemas agroflorestais para a agricultura familiar da Amazônia. in *ABC da agricultura Familiar* (Embrapa Amazônia Ocidental, 2012).
 35. Valentim, J. F. Desafios e estratégias para recuperação de pastagens degradadas e intensificação da pecuária a pasto na Amazônia Legal. in *Embrapa Acre-Artigo em anais de congresso (ALICE)* (2016).
 36. Bungenstab, D. J., Almeida, R. G. de, Laura, V. A., Balbino, L. C. & Ferreira, A. D. *ILPF: Inovação com interação de lavoura, pecuária e floresta.* Embrapa Acre (Embrapa).
 37. Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T. & Zions, J. Regenerative Agriculture: Good for Soil Health, but Limited Potential to Mitigate Climate Change. *World Resour. Inst.* (2020).
 38. da Cruz, D. C., Benayas, J. M. R., Ferreira, G. C., Santos, S. R. & Schwartz, G. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New For.* 1–16 (2020).
 39. Kato, O. R. *et al.* Projeto Tipitamba: transformando paisagens e compartilhando conhecimento na Amazônia. *Investimentos Transform. para um estilo Desenvolv. sustentável Estud. casos Gd. Impuls. (Big Push) para a sustentabilidade no Bras. Bras. CEPAL, 2020. LC/TS. 2020/37. p. 213-226* (2020).
 40. Shimizu, M. K. *et al.* Agriculture without burning: restoration of altered areas with chop-and-mulch sequential agroforestry systems in the Amazon region. *Glob. Adv. Res. J. Agric. Sci.* 3, 415–422 (2014).
 41. Denich, M., Vlek, P. L. G., de Abreu Sá, T. D., Vielhauer, K. & Lücke, W. A concept for the development of fire-free fallow management in the Eastern Amazon, Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ. Environ.* 110, 43–58 (2005).
 42. Nair, P. K. R. *An introduction to agroforestry.* (Springer Science & Business Media, 1993).
 43. Jakovac, C. C., Peña-Claros, M., Mesquita, R. C. G., Bongers, F. & Kuyper, T. W. Swiddens under transition: consequences of agricultural intensification in the Amazon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 116–125 (2016).
 44. Garrett, R. D. *et al.* Criteria for effective zero-deforestation commitments. *Glob. Environ. Chang.* 54, 135–147 (2019).
 45. HLPE. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. *A Rep. by High Lev. Panel Expert. Food Secur. Nutr. Comm. World Food Secur.* 1–162 (2019).
 46. Osis, R., Laurent, F. & Pocard-Chapuis, R. Spatial determinants and future land use scenarios of Paragominas municipality, an old agricultural frontier in Amazonia. *J. Land Use Sci.* 14, 258–279 (2019).
 47. Pinillos, D. *et al.* Understanding Landscape Multifunctionality in a Post-forest Frontier: Supply and Demand of Ecosystem Services in Eastern Amazonia. *Front. Environ. Sci.* 7, (2020).
 48. Nepstad, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science (80-.)* 344, 1118–1123 (2014).
 49. Bendahan, A. B., Pocard-Chapuis, R., de Medeiros, R. D., de Lucena Costa, N. & Tourrand, J.-F. Management and labour in an integrated crop-livestock-forestry system in Roraima, Brazilian Amazonia. *Cah. Agric.* 27, 25005 (2018).
 50. Bunn, S. E. Grand challenge for the future of freshwater ecosystems. *Front. Environ. Sci.* 4, 21 (2016).
 51. Guedron, S. *et al.* Amazonian former gold mined soils as a source of methylmercury: Evidence from a small scale watershed in French Guiana. *Water Res.* 45, 2659–2669 (2011).
 52. Diepens, N. J. & Koelmans, A. A. Accumulation of Plastic Debris and Associated Contaminants in Aquatic Food Webs. *Environ. Sci. Technol.* 52, 8510–8520 (2018).
 53. Collard, F., Gasperi, J., Gabrielsen, G. W. & Tassin, B. Plastic Particle Ingestion by Wild Freshwater Fish: A Critical Review. *Environ. Sci. Technol.* 53, 12974–12988 (2019).

54. Lacerot, G., Lozoya, J. P. & Teixeira de Mello, F. Plásticos en ecosistemas acuáticos: presencia, transporte y efectos. *Ecosistemas* 29, (2020).
55. De-la-Torre, G. E. Microplastics: an emerging threat to food security and human health. *J. Food Sci. Technol.* 57, 1601–1608 (2020).
56. Giarrizzo, T. *et al.* Amazonia: the new frontier for plastic pollution. *Front. Ecol. Environ.* 17, 309–310 (2019).
57. Gerolin, C. R. *et al.* Microplastics in sediments from Amazon rivers, Brazil. *Sci. Total Environ.* 749, 141604 (2020).
58. Jia, L., Evans, S. & Linden, S. van der. Motivating actions to mitigate plastic pollution. *Nature Communications* vol. 10 1–3 (2019).
59. Abril Ortiz, A., Sucozhañay, D., Vanegas, P. & Martínez-Moscoso, A. A Regional Response to a Global Problem: Single Use Plastics Regulation in the Countries of the Pacific Alliance. *Sustainability* 12, 8093 (2020).
60. Alvarez-Risco, A., Rosen, M. A. & Del-Aguila-Arcentales, S. A New Regulation for Supporting a Circular Economy in the Plastic Industry: The Case of Peru (Short Communication). *J. Landsc. Ecol.* 13, 1–3 (2020).
61. Agostinho, A. A., Pelicice, F. M. & Gomes, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian J. Biol.* 68, 1119–1132 (2008).
62. Pompeu, P. dos S., Agostinho, A. A. & Pelicice, F. M. Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in South America. *River Res. Appl.* 28, 504–512 (2012).
63. Pelicice, F. M., Pompeu, P. S. & Agostinho, A. A. Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. *Fish Fish.* 16, 697–715 (2015).
64. Bednarek, A. T. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal. *Environ. Manage.* 27, 803–814 (2001).
65. Bernhardt, E. S. *et al.* Synthesizing US river restoration efforts. (2005).
66. Maclin, E. & Sicchio, M. Dam removal success stories. in *Restoring Rivers Through Selective Removal of Dams That Don't Make Sense* (American Rivers, Friends of the Earth, & Trout Unlimited, 1999).
67. Kemp, P. S. & O'hanley, J. R. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fish. Manag. Ecol.* 17, 297–322 (2010).
68. O'Hanley, J. R., Pompeu, P. S., Louzada, M., Zambaldi, L. P. & Kemp, P. S. Optimizing hydropower dam location and removal in the São Francisco river basin, Brazil to balance hydropower and river biodiversity tradeoffs. *Landsc. Urban Plan.* 195, 103725 (2020).
69. Fearnside, P. M. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environ. Manage.* 13, 401–423 (1989).
70. Heilpern, S. A. *et al.* Substitution of inland fisheries with aquaculture and chicken undermines human nutrition in the Peruvian Amazon. *Nat. Food* 2, 192–197 (2021).
71. Isaac, V. J. & De Almeida, M. C. El consumo de pescado en la Amazonia brasileña. *COPESCAL. Doc. Ocas.* I (2011).
72. Arantes, C. C. *et al.* Institutional effects on ecological outcomes of community-based management of fisheries in the Amazon. *Ambio* (2021).
73. Arantes, C. C. *et al.* Floodplain land cover affects biomass distribution of fish functional diversity in the Amazon River. *Sci. Rep.* 9, 1–13 (2019).
74. McGrath, D. G., Cardoso, A., Almeida, O. T. & Pezzuti, J. Constructing a policy and institutional framework for an ecosystem-based approach to managing the Lower Amazon floodplain. *Environ. Dev. Sustain.* 10, 677–695 (2008).
75. Ruiz-Jaen, M. C. & Mitchell Aide, T. Restoration success: how is it being measured? *Restor. Ecol.* 13, 569–577 (2005).
76. Stanturf, J. A. *et al.* *Forest landscape restoration as a key component of climate change mitigation and adaptation.* (International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Vienna, Austria, 2015).
77. de Almeida, D. R. A. *et al.* A new era in forest restoration monitoring. *Restor. Ecol.* 28, 8–11 (2020).
78. Wortley, L., Hero, J.-M. & Howes, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restor. Ecol.* 21, 537–543 (2013).
79. Evans, K., Guariguata, M. R. & Brancalion, P. H. S. Participatory monitoring to connect local and global priorities for forest restoration. *Conserv. Biol.* 32, 525–534 (2018).
80. Chaves, R. B., Durigan, G., Brancalion, P. H. S. & Aronson, J. On the need of legal frameworks for assessing restoration projects success: new perspectives from São Paulo state (Brazil). *Restor. Ecol.* 23, 754–759 (2015).