

Capítulo 24 Em Síntese

Resiliência da Floresta Amazônica às mudanças globais: Avaliação do risco de ocorrência de pontos de inflexão



Região Metropolitana de Manaus, estiagem incomum (Foto: Alberto Cesar Araujo/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Resiliência da Floresta Amazônica às mudanças globais: Avaliação do risco de ocorrência de pontos de inflexão

Marina Hirota^a, Bernardo M. Flores^a, Richard Betts^b, Laura S. Borma^c, Adriane Esquivel-Muelbert^d, Catarina Jakovac^e, David M. Lapola^f, Encarni Montoya^g, Rafael S. Oliveira^h, Boris Sakschewskiⁱ

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) Existem diferentes hipóteses em torno dos pontos de inflexão na Amazônia relacionados à precipitação pluviométrica da região, temperatura global e desmatamento.
- 2) Já foram propostas diferentes configurações do ecossistema para substituir as florestas impactadas pelo desmatamento e degradação resultante da intensificação de distúrbios. No futuro, grandes áreas poderão estar cobertas por florestas secundárias fechadas e degradadas.
- 3) O modo heterogêneo como a floresta reage e a conectividade em toda a região amazônica podem aumentar a resiliência dos sistemas como um todo. Entretanto, caso os regimes de distúrbios aumentem, maior será o risco de atingirmos um ponto de inflexão do sistema.
- 4) Não há evidências observacionais e experimentais suficientes para aprimorar a capacidade dos modelos clima-vegetação de projetar a probabilidade de ultrapassarmos o ponto de inflexão na Amazônia.
- 5) Há necessidade de investimentos e planejamento para criarmos um sistema de monitoramento transnacional eficaz que aumente nosso conhecimento sobre a dinâmica dos diferentes ecossistemas da Amazônia e suas respostas a mudanças ambientais.
- 6) Manejar a resiliência da Amazônia localmente pode reduzir o risco de atingirmos um ponto de

inflexão sistêmico. Isso demanda proteger e restaurar a cobertura florestal, a biodiversidade, a agrobiodiversidade e a diversidade cultural, bem como melhorar o manejo de queimadas e sistemas de alerta de queimadas. Gerenciar a resiliência da Amazônia também exige uma ação global para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Resumo Este capítulo examina e discute as evidências de mudanças contínuas no sistema da Floresta Amazônica que podem levar à perda de resiliência e à probabilidade de ultrapassarmos pontos de inflexão que levariam a uma mudança do ecossistema, gradual ou abrupta, em direção a uma configuração definitiva de degradação ambiental.

Introdução A Amazônia é um sistema biodiverso complexo, dinâmico e extremamente heterogêneo, resultado da inter-relação entre processos naturais e antropogênicos operando em diferentes escalas espaciais e temporais (Capítulos 1-13). Mudanças na vegetação têm se acelerado desde o último século, devido principalmente a atividades antropogênicas que têm levado a níveis inéditos de distúrbios ambientais na região (veja Capítulos 14-23).

Existe uma grande preocupação sobre um potencial ponto de inflexão ecológico na estabilidade dos ecossistemas da Floresta Amazônica que, se ultrapassado, levaria a um grande colapso ecológico da

^a Federal University of Santa Catarina, Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, s/n. Trindade. 88040-900. Florianópolis, Brazil, marinahirota@gmail.com, mflores.bernardo@gmail.com

^b MetOffice, FitzRoy Road, Exeter, Devon EX1 3PB, United Kingdom

^c INPE/DIIAV, Av. dos Astronautas 1758, São José dos Campos, Brazil

^d University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, United Kingdom

^e Forest Ecology and Management Group, Wageningen University & Research, Wageningen, 6700 AA, The Netherlands

^f University of Campinas, Av. André Tosello 209. 13083-886, Campinas, Brazil

^g Department of Geography and Planning, School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Roxby Building, L69 7ZT, UK

^h University of Campinas, Rua Monteiro Lobato 255, 13083-862, Campinas, Brazil

ⁱ Potsdam Institute for Climate Impact Research, Telegrafenberg A62, 14412 Potsdam, Germany

floresta. Entretanto, a despeito da crescente evidência de mortalidade das florestas causada por eventos extremos de precipitação pluviométrica, queimadas, desmatamento e seus efeitos combinados¹⁻⁹ (veja também os Capítulos 22 e 23), o comportamento real do sistema amazônico permanece incerto.

Potenciais pontos de inflexão e novas configurações Até agora, os limiares dos pontos de inflexão propostos para as florestas tropicais da região amazônica incluem (1) pluviosidade anual total abaixo de 1.000 mm/ano^{10,11} (Figura 24.1a-d)^{12,13,14,15,16,17} ou 1.500 mm/ano¹⁸, (2) duração da estação seca ultrapassando sete meses¹¹, (3) valores máximos cumulativos de déficit hídrico acima de 200 mm/ano¹⁸ ou 350 mm/ano¹⁹ (Figura 24.1e); (4) aumento de 2°C na temperatura de equilíbrio do planeta²⁰, e (5) desmatamento acumulado ultrapassando 20-25% de toda a bacia^{21,22}.

Uma grande preocupação é que, uma vez ultrapassados esses pontos de inflexão, a perda de floresta em grande escala levará a uma retroalimentação do ciclo envolvendo redução de chuvas, aumento de queimadas e maior mortalidade da floresta. Com base em evidências existentes, identificamos quatro principais configurações que as florestas amazônicas podem vir a adotar permanentemente devido a esse processo involuntário de retroalimentação (Figura 24.2).

(i) Estado de floresta degradada aberta Como a maior parte das árvores na Floresta Amazônica são sensíveis aos ciclos de queimadas, a recorrência desses ciclos muitas vezes elimina a maior parte das comunidades de árvores²³⁻²⁷, em particular unidades mais jovens, reduzindo o recrutamento das espécies²⁵. Distúrbios que abrem a estrutura florestal aumentam imediatamente a disponibilidade de luz ao nível do solo, permitindo a invasão de plantas herbáceas^{23,28,29}. Como resultado, essas florestas perturbadas podem ficar presas a um estado de floresta aberta causado pelos ciclos de queimadas. Múltiplos estudos na Amazônia mostram que essa mudança para um estado de floresta aberta degradada já está ocorrendo^{24,26,30}. Como as florestas desempenham

um papel importante na manutenção do regime de chuvas da Amazônia (Capítulo 5), a degradação florestal muito provavelmente reduzirá o índice pluviométrico na sua área central e oeste. Uma retroalimentação entre seca e desmatamento já vem se fortalecendo com o acúmulo de desmatamentos, o que eleva ainda mais as taxas de desmatamento⁷ e de queimadas florestais³¹. O desmatamento também leva ao aumento da temperatura da região³². Devido a esses retornos significativos, um ponto de inflexão (número 5 acima), se ultrapassado, poderia causar um grande colapso ecológico dentro da bacia amazônica^{21,22}.

(ii) Estado de floresta secundária fechada Nessa configuração, diferentes mecanismos de retroalimentação aprisionam as florestas em uma fase inicial de sucessão (Figura 24.2). Em condições ideais, as florestas secundárias se modificam gradualmente e amadurecem em termos de composição funcional e de espécies, aumentando a diversidade de espécies e biomassa, e recuperando a complexidade e a biomassa^{33,34} através das interações plantas-animais. Entretanto, as florestas secundárias possuem duas vezes mais chance de serem destruídas em comparação com as florestas maduras, possivelmente devido a menores restrições governamentais e sua maior acessibilidade³⁵, levando as florestas secundárias a continuarem em um estado inicial de sucessão²⁴.

A capacidade das florestas secundárias de se recuperarem por completo depende dos impactos das atividades que existiam antes do abandono, bem como do contexto da paisagem³⁶. As queimadas realizadas para limpar pastos e fertilizar campos de cultivo reduzem a fertilidade do solo e, conseqüentemente, as taxas de recuperação das florestas³⁶⁻³⁸. A fragmentação de florestas e a caça excessiva reduzem a dispersão de sementes, reduzindo ainda mais o recrutamento de árvores³⁹.

(iii) Estado da savana nativa Muitas vezes presume-se que a Floresta Amazônica se transformará em uma savana após ultrapassar os pontos de inflexão mencionados acima^{10,11,20,22,40}. Entretanto, não há

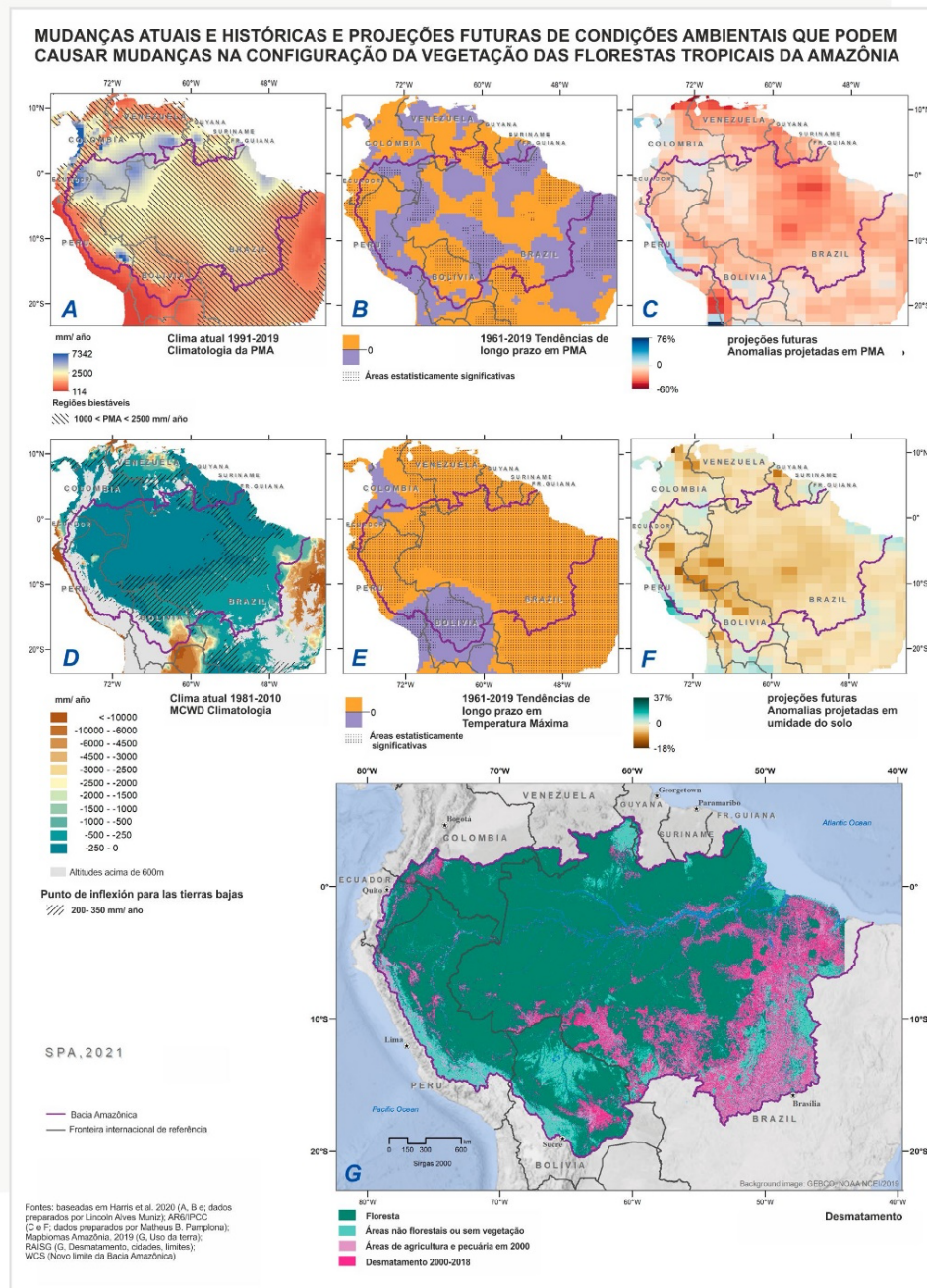


Figura 24.1 Pontos de inflexão e distúrbios que podem afetar a resiliência da Amazônia. (A) 1991 - 2019 a climatologia da precipitação média anual (PMA, mm/ano) mostra áreas biestáveis para os parâmetros do ponto de inflexão (ponto de inflexão 1 acima) utilizando conjunto de dados CRU 4.04¹⁶; (B) tendências de longo prazo (Kendall τ) em PMA (áreas hachuradas são estatisticamente significativas) utilizando CRU 4.04¹⁶; (C) variações relativas projetadas em PMA com aquecimento global de 4°C utilizando o modelo climático UKESM1¹⁷; (D) 1981-2010 climatologia, máximo déficit hídrico acumulado (MCWD) mostrando pontos de inflexão (-200 e -350 mm/ano para planícies) (ponto de inflexão 3 acima); (E) tendências de longo prazo (Kendall τ) em temperaturas máximas (áreas hachuradas são estatisticamente significativas) utilizando o conjunto de dados CRU 4.04¹⁶; (F) variações relativas projetadas em umidade do solo com aquecimento global de 4°C com o modelo climático UKESM1¹⁷; (G) desmatamento de acordo com o MapBiomas. Fontes: ^{14,15}.

evidências dessa variação em escala local, especialmente porque as florestas perturbadas são geralmente invadidas por gramíneas exóticas⁴¹. Evidências recentes, contudo, revelam que isso já vem ocorrendo em partes remotas da bacia, longe da fronteira agrícola onde as florestas em planícies alagadas estão sendo substituídas por savanas de areia branca após queimadas recorrentes⁴² (Figura 24.2). Essas variações locais estão ocorrendo de forma abrupta, no espaço de 40 anos, talvez aceleradas pela erosão relacionada a inundações que altera as interações planta-solo e favorecem as espécies de savanas.

(iv) *Floresta tropical sazonalmente seca e fechada* Considerando as tendências de um clima mais seco observadas em certas partes da Amazônia (Capítulo 22), é possível que as florestas com solos mais ricos em nutrientes se transformem em florestas fechadas que assemelhem-se, em termos de estrutura e

funcionamento, a uma floresta tropical sazonalmente seca (FTSS)^{18,43}, dominada por árvores decíduas de rápido crescimento com estratégias de maior tolerância a condições secas e maior demanda por nutrientes. Uma mudança para uma floresta semi-decídua talvez não seguiria uma dinâmica não linear catastrófica, ou pontos de inflexão associados, devido à longa distância que as espécies teriam para migrar a partir de regiões de FTSS⁴⁴.

Evidências da dinâmica do ecossistema amazônico desde o último Glacial Máximo (20.000 anos atrás) Evidências paleoecológicas revelam dois importantes processos para entender a dinâmica futura. Em primeiro lugar, as florestas têm passado por mudanças locais e regionais para um estado de florestas secundárias secas ou savanas⁴⁵, especialmente nas partes periféricas da bacia. Entretanto, elas não têm experimentado um colapso abrupto e

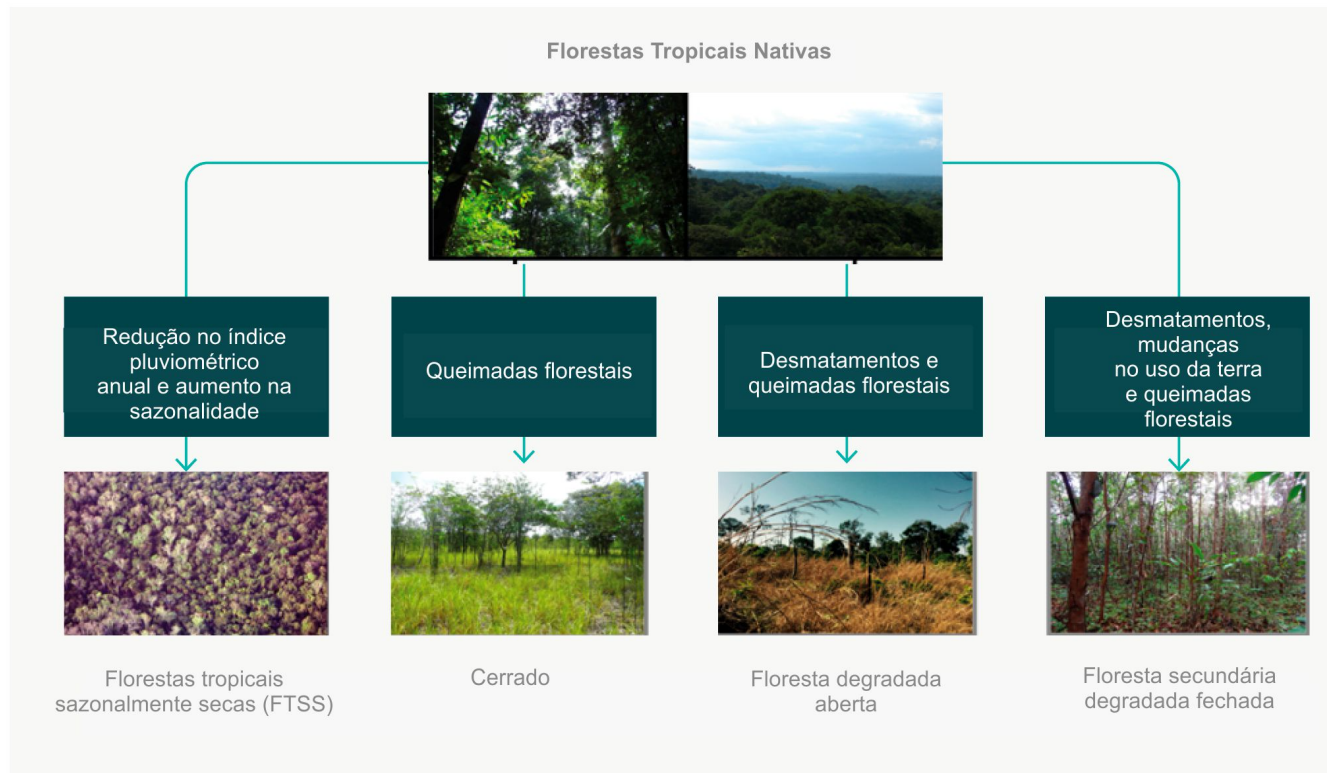


Figura 24.2 Potenciais configurações e motivadores alternativos. Créditos das fotos: Florestas tropicais nativas na Estação ZF2 (AM, Brasil) de Marina Hirota; florestas tropicais sazonalmente secas na Ilha de Maracá (RR, Brasil) de Marcelo Trindade Nascimento; Savana em Barcelos (AM, Brasil) de Bernardo M. Flores; floresta aberta degradada na Fazenda Tanguro (MT, Brasil) de Paulo Brando; floresta secundária fechada degradada em Tefé (AM, Brasil) de Catarina Jakovac.

generalizado da bacia, mesmo durante períodos significativamente mais quentes e secos que podem ser análogos aos pontos de inflexão relacionados ao clima, que foram mencionados acima (enumerados de 1-4). Em segundo lugar, a capacidade de recuperação da floresta depende de seu histórico de distúrbios; quanto mais a floresta se adapta aos distúrbios, mais rapidamente irá se recuperar. Contudo, algumas ressalvas precisam ser feitas quando se utilizam paleodados como referência para dinâmicas futuras: (i) as taxas e magnitudes das mudanças climáticas projetadas, combinadas com eventos de distúrbios que agem de forma síncrona, são inéditas e podem prejudicar a recuperação da floresta; (ii) condições básicas no passado, tais como aumentos nas concentrações de CO₂ na atmosfera no século 21, não são análogas às atuais; e (iii) há poucos dados ecológicos de longo prazo na bacia, com maior concentração principalmente sobre as margens do Amazonas; dessa forma, há mais trabalho a ser feito para se descobrir a dinâmica desses ecossistemas heterogêneos⁴⁶.

Causas da resiliência da Floresta Amazônica A despeito das incertezas, descobertas atuais sugerem que, na ausência de desmatamento e degradação, devido, por exemplo, a queimadas, as florestas da região amazônica podem se modificar, tanto em sua composição quanto funcionalidade, em reação a mudanças climáticas, e ainda assim permanecerem como florestas fechadas. Além disso, caso os pontos de inflexão relacionados ao clima (enumerados acima, de 1 a 4) sejam ultrapassados, as mudanças poderão ser esparsas e locais, em vista da grande heterogeneidade e diversidade de tipos de florestas. A crescente mortalidade das florestas causada por distúrbios induzidos por humanos e mantida em razão da maior vulnerabilidade das florestas degradadas a novos distúrbios, poderá levar a uma crescente desestabilização da Floresta Amazônica⁴⁷, aumentando a probabilidade de as florestas ficarem aprisionadas em um estado de floresta aberta degradada em grande escala, e de o sistema como um todo ultrapassar o ponto de inflexão (5).

Incertezas associadas aos pontos de inflexão dentro do sistema amazônico

Como a heterogeneidade florestal afeta os pontos de inflexão de larga escala? Em geral, se espera que a diversidade das espécies aumente a resiliência dos ecossistemas na Amazônia. Em primeiro lugar, porque a diversidade possui um impacto positivo na produtividade florestal⁴⁸ e no armazenamento de carbono⁴⁹, acelerando potencialmente sua regeneração após os distúrbios. Em segundo lugar, como o número de espécies está relacionado com o número de estratégias e potenciais reações aos distúrbios, a diversidade aumenta a resiliência da floresta de forma geral⁵⁰⁻⁵².

Além disso, uma precipitação anual média mais alta (acima de 2.500 mm/ano) aumenta a resiliência da floresta^{10,11}, enquanto que as florestas expostas a uma sazonalidade média mais alta e variabilidade interanual são aparentemente mais tolerantes à seca, compensando uma menor resiliência⁵³. Entretanto, os pontos de inflexão (enumerados acima, 2 e 3) implicam que em florestas onde o clima já é mais seco, o aumento na sazonalidade do regime de chuvas poderia causar potencialmente mais perda florestal. Aumentos na frequência de eventos extremos de seca, juntamente com as queimadas, também podem prejudicar a recuperação das florestas^{54,55}.

Já foi demonstrado que as áreas alagadas da Floresta Amazônica, que cobrem 14% da bacia, são menos resilientes do que as áreas de terra-firme, com o potencial ponto de inflexão para colapso da floresta sendo de aproximadamente 1.500 mm/ano de precipitação pluviométrica⁵⁶.

Como a conectividade florestal afeta os pontos de inflexão de larga escala? Teoricamente, a conectividade pode aumentar a resiliência florestal sistêmica, pois as interações espaciais facilitam a recuperação dos locais afetados. Por exemplo, as conexões de regimes climáticos e hidrológicos, além das biogeoquímicas entre os Andes e a região de mais baixa altitude da Amazônia são inegavelmente fatores chave na de-

terminação do funcionamento do sistema atual e futuro em larga escala (Capítulo 22)⁵⁷. Entretanto, à medida que as condições se modificam e os regimes de distúrbios se intensificam, aumentando a fragmentação da paisagem e as queimadas florestais, os distúrbios podem se tornar contagiosos, resultando no colapso do sistema⁵⁸. Dessa forma, gerenciar os vários processos que conectam as diferentes partes da Amazônia é crucial para aumentar sua resiliência.

Interação entre o efeito da fertilização do CO₂ e a disponibilidade de nutrientes Duas outras incertezas estão relacionadas aos potenciais efeitos fisiológicos nas plantas causados pelo aumento no dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (“o efeito de fertilização do CO₂”) e as limitações hipotéticas relativas à produtividade florestal e acumulação de biomassa impostas pelas restrições de nutrientes do solo. Por um lado, o efeito da fertilização do CO₂ poderia, teoricamente, aumentar as taxas de produtividade florestal, de acumulação de biomassa⁵⁹, e a eficiência do uso hidrológico⁶⁰. Por outro lado, a indisponibilidade de nutrientes essenciais para o metabolismo das plantas reduz os ganhos de biomassa sob condições com CO₂ elevado⁶¹. Essas interações precisam ser melhor estudadas em florestas com alta diversidade. Um nível elevado de CO₂ também possui o potencial de interferir nos fluxos de umidade das árvores em relação à atmosfera.

Sem aumentos de produtividade e com redução na transpiração das copas das árvores devido ao aumento de CO₂ na atmosfera, a expectativa é que a Floresta Amazônica e suas atuais composições de comunidades e relações funcionais tornem-se menos resilientes às mudanças climáticas, desmatamentos, degradação e outros distúrbios antropogênicos. Essa degradação no longo prazo pode ter impactos socioeconômicos regionais difusos⁶².

Moldar a resiliência e os pontos de inflexão da Amazônia Moldar e avaliar a probabilidade e os mecanismos de um ponto de inflexão exige uma maior integração de modelos, dados e experimentos de campo. Dados de campo demonstram que as dinâmicas das comunidades desempenham um papel

central no impacto das mudanças climáticas e extremos climáticos na Amazônia^{6,63,64}. Portanto, aumentar a representatividade dessa dinâmica de recrutamento e mortalidade e suas causas é uma das prioridades dessa moldagem. Outros processos, como o papel do funcionamento hidráulico das plantas⁶⁵ e sua crescente diversidade funcional^{51,66}, bem como as heterogeneidades de larga escala relacionadas ao clima, hidrologia e química do solo, devem ser exploradas em maior profundidade. O potencial efeito de fertilização do CO₂ sobre a fotossíntese e o uso hidráulico, bem como as possíveis limitações da produtividade florestal pelos nutrientes do solo, representam uma lacuna quase completa nos modelos existentes da vegetação da Floresta Amazônica. Diminuir as incertezas nas projeções dos índices pluviométricos para a região também seria crucial para os estudos de melhores modelos para os pontos de inflexão na Amazônia.

Conclusões Devido aos novos mecanismos de retroalimentação associadas às paisagens modificadas pelos seres humanos e plantas invasoras, consideramos a maior probabilidade de ocorrência do estado de florestas abertas degradadas e florestas secundárias fechadas em áreas amplas, em particular em todo o “arco do desmatamento”. Novas evidências, entretanto, indicam que em partes remotas da Bacia Amazônica, distantes da fronteira agrícola, as savanas nativas poderiam estar substituindo as florestas sazonalmente inundadas afetadas pelas queimadas florestais. Características ecológicas, como crescimento diferencial de árvores, recrutamento e sobrevivência entre as espécies amazônicas, são cruciais para a promoção da resistência e capacidade de recuperação da floresta exposta a distúrbios em escalas locais. A falta de informações ecológicas sobre muitas espécies amazônicas, a incerteza de potenciais mecanismos de retroalimentação, e a necessidade de mais melhorias nas projeções sobre mudanças climáticas prejudicam o desenvolvimento de modelos mais robustos de previsão de alterações potenciais pelas quais as florestas na região amazônica podem passar no futuro próximo, seja de forma gradual ou abrupta. Mesmo com modelos em que um ponto de inflexão não é atingido, e contando com incertezas em razão da limitação de

dados disponíveis, é fundamental proteger, manter e gerenciar de forma sustentável a resiliência das florestas da região amazônica.

Referências

1. Cochrane, M. A. *et al.* Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science* **284**, 1832–5 (1999).
2. Aragão, L. E. O. C. *et al.* Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophys. Res. Lett.* **34**, (2007).
3. Aragão, L. E. O. C. *et al.* Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* **363**, 1779–85 (2008).
4. Phillips, O. L. *et al.* Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* **323**, 1344–1347 (2009).
5. Brando, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 6347–6352 (2014).
6. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. *Nat. Commun.* **11**, (2020).
7. Staal, A. *et al.* Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ. Res. Lett.* **15**, 44024 (2020).
8. Sullivan, M. J. P. *et al.* Long-term thermal sensitivity of earth's tropical forests. *Science* **368**, 869–874 (2020).
9. Esteban, E. J. L., Castilho, C. V., Melgaço, K. L. & Costa, F. R. C. The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest. *New Phytol.* **229**, 1995–2006 (2021).
10. Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H. & Scheffer, M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science* **334**, 232–235 (2011).
11. Staver, A. C., Archibald, S. & Levin, S. A. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science* **334**, 230–2 (2011).
12. Funk, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* **2**, 150066 (2015).
13. MAPBIOMAS. Mapbiomas Amazonia. *Annual maps of land cover, land use and land use changes between 1985 to 2018 in the Pan-Amazon*. <https://amazonia.mapbiomas.org/en> (2020).
14. RAISG. Amazonian Network of Georeferenced Socio-Environmental Information. <https://www.amazoniasocioambiental.org/en/> (2020).
15. Venticinque, E. *et al.* An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. *Earth Syst Sci Data* 651–661 https://knbn.ecoinformatics.org/view/doi%3A10.5063%2FF1BG2KX8#snapp_computing.6.1 (2016).
16. Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. & Lister, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* **7**, (2020).
17. Sellar, A. A. *et al.* UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, (2019).
18. Malhi, Y. *et al.* Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **106**, 20610–5 (2009).
19. Zelazowski, P., Malhi, Y., Huntingford, C., Sitch, S. & Fisher, J. B. Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. in *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* vol. 369 (2011).
20. Jones, C., Lowe, J., Liddicoat, S. & Betts, R. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nat. Geosci.* **2**, 484–487 (2009).
21. Nobre, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113**, (2016).
22. Lovejoy, T. E. & Nobre, C. Amazon tipping point: Last chance for action. *Sci. Adv.* **5**, eaba2949 (2019).
23. Cochrane, M. A. & Schulze, M. D. Fire as a Recurrent Event in Tropical Forests of the Eastern Amazon: Effects on Forest Structure, Biomass, and Species Composition. *Biotropica* **31**, 2–16 (1999).
24. Barlow, J. & Peres, C. a. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. *Philos. Trans. R. Soc. London B* **363**, 1787–94 (2008).
25. Balch, J. K. *et al.* Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manage.* **261**, 68–77 (2011).
26. Brando, P. M. *et al.* Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior. *Glob. Chang. Biol.* **18**, 630–641 (2012).
27. Staver, A. C. *et al.* Thinner bark increases sensitivity of wetter Amazonian tropical forests to fire. *Ecol. Lett.* **23**, 99–106 (2020).
28. Silvério, D. V. *et al.* Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **368**, 20120427 (2013).
29. Longo, M. *et al.* Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **125**, (2020).
30. Flores, B. M., Fagoaga, R., Nelson, B. W. & Holmgren, M. Repeated fires trap Amazonian blackwater floodplains in an open vegetation state. *J. Appl. Ecol.* **53**, 1597–1603 (2016).
31. Xu, X., Jia, G., Zhang, X., Riley, W. J. & Xue, Y. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* **26**, 5874–5885 (2020).
32. Zeppetello, L. R. V. *et al.* Large scale tropical deforestation drives extreme warming. *Environ. Res. Lett.* **15**, (2020).
33. Poorter, L. *et al.* Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* **530**, 211–214 (2016).
34. Rozendaal, D. M. A. *et al.* Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Sci. Adv.* **5**, eaau3114 (2019).
35. Wang, Y. *et al.* Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* **3**, 290–295 (2020).
36. Jakovac, C. C. *et al.* The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. *Biol. Rev.* brv.12694 (2021).
37. Zarin, D. J. *et al.* Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Front. Ecol. Environ.* **3**, 365–369 (2005).
38. Heinrich, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate

- change. *Nat. Commun.* **12**, 1785 (2021).
39. Arroyo-Rodríguez, V. *et al.* Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biol. Rev.* **92**, 326–340 (2015).
40. Cox, P. M. *et al.* Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theor. Appl. Climatol.* **78**, 137–156 (2004).
41. Veldman, J. W. Clarifying the confusion: old-growth savannahs and tropical ecosystem degradation. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **371**, 20150306 (2016).
42. Flores, B. M. & Holmgren, M. White-Sand Savannas Expand at the Core of the Amazon After Forest Wildfires. *Ecosystems* (2021).
43. Dexter, K. G. *et al.* Inserting Tropical Dry Forests Into the Discussion on Biome Transitions in the Tropics. *Front. Ecol. Evol.* **6**, 1–7 (2018).
44. Silva de Miranda, P. L. *et al.* Using tree species inventories to map biomes and assess their climatic overlaps in lowland tropical South America. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **27**, 899–912 (2018).
45. Montoya, E., Rull, V. & Nogué, S. Early human occupation and land use changes near the boundary of the Orinoco and the Amazon basins (SE Venezuela): Palynological evidence from El Paují record. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **310**, 413–426 (2011).
46. Lombardo, U., McMichael, C. & Kazuo Tamanaha, E. Mapping pre-Columbian land use in Amazonia. *Past Glob. Chang. Mag.* **26**, 14–15 (2018).
47. Silva, C. V. J. *et al.* Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, 20180043 (2018).
48. Coelho de Souza, F. *et al.* Evolutionary diversity is associated with wood productivity in Amazonian forests. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 1754–1761 (2019).
49. Poorter, L. *et al.* Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **24**, 1314–1328 (2015).
50. Elmqvist, T. *et al.* Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Front. Ecol. Environ.* **1**, 488–494 (2003).
51. Sakschewski, B. *et al.* Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nat. Clim. Chang.* **6**, 1032–1036 (2016).
52. Anderegg, W. R. L. *et al.* Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature* **561**, 538–541 (2018).
53. Ciemer, C. *et al.* Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall. *Nat. Geosci.* **12**, 174–179 (2019).
54. Longo, M. *et al.* Ecosystem heterogeneity and diversity mitigate Amazon forest resilience to frequent extreme droughts. *New Phytol.* **219**, 914–931 (2018).
55. Anderson, L. O. *et al.* Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, (2018).
56. Flores, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **114**, (2017).
57. Builes-Jaramillo, A. & Poveda, G. Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resour. Res.* **54**, 3472–3489 (2018).
58. Scheffer, M. *et al.* Anticipating critical transitions. *Science* **338**, 344–348 (2012).
59. Ainsworth, E. A. & Long, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* **165**, 351–372 (2005).
60. Kauwe, M. G. *et al.* Forest water use and water use efficiency at elevated CO₂: A model-data intercomparison at two contrasting temperate forest FACE sites. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 1759–1779 (2013).
61. Norby, R. J., Warren, J. M., Iversen, C. M., Medlyn, B. E. & McMurtrie, R. E. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107**, 19368–19373 (2010).
62. Lapola, D. M. Bytes and boots to understand the future of the Amazon forest. *New Phytol.* **219**, 845–847 (2018).
63. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Glob. Chang. Biol.* **25**, (2019).
64. Hubau, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* **579**, 80–87 (2020).
65. Eller, C. B. *et al.* Modelling tropical forest responses to drought and El Niño with a stomatal optimization model based on xylem hydraulics. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, 20170315 (2018).
66. Scheiter, S., Langan, L. & Higgins, S. I. Next-generation dynamic global vegetation models: Learning from community ecology. *New Phytol.* **198**, 957–969 (2013).