

2. A FLORESTA AMAZÔNICA EM TRANSFORMAÇÃO DEVIDO AO DESMATAMENTO, QUEIMADAS E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Luciana V. Gatti³, Camilla L. Cunha³, Jose A. Marengo⁴, Ben-Hur Marimon⁵, Beatriz S. Marimon⁵, Julia Arieira⁶, Carlos Nobre⁷

INTRODUÇÃO

Nas ultimas 5 décadas foi observado um avanço importante na substituição da floresta Amazônica por pastagens, exploração de madeira, plantações de soja e milho, mineração, crescimento das cidades, etc. Segundo o PRODES (INPE)¹, a Amazônia brasileira já foi 21,6% desmatada, desde o início de seu monitoramento (Figura 1), onde se verifica uma intensa redução do desmatamento de 2005-2012, devido a aplicação do PPCDAm (Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal)². A partir de 2012, quando houve a reforma no Código Florestal pelo Congresso Nacional, houve ainda a concessão de anistia

3 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos, SP.

4 Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. CEMADEN. São José dos Campos, SP.

5 Universidade do Estado de Mato Grosso. UNEMAT. Nova Xavantina, MT.

6 Painel Científico para a Amazônia. SPA. São José dos Campos, SP.

7 Universidade de São Paulo (USP), IEA, São Paulo, Brasil. Universidade de São Paulo. IEA-USP. São Paulo, SP.

Autora correspondente: luciana.gatti@inpe.br

para 58% do desmatamento ilegal anterior a 2008, suspensão de multas ambientais e permissão aos proprietários de terras de 20 anos para cumprirem o Código Florestal³. E a partir deste momento, o aumento do desmatamento foi retomado lentamente na Amazônia Brasileira. No período de 2015-2018, observou-se um aumento de 28% no desmatamento, em relação ao período de 2009-2014. A partir de 2019 iniciou um período de intensificação do desmatamento não observada desde 2008. Comparando-se o período de 2019-2022 com 2009-2014, o aumento foi de 119%. Nos anos de 2023 e 2024, foi identificada uma redução de 47%, comparando com o período anterior.

Analisando os estados da Amazônia, o estado do Pará corresponde em média a 42% do desmatamento anual, apresentando uma importante redução no período de 2022 a 2024 (Figura 2). O estado do Mato Grosso corresponde em média a 19% do total e os estados do Amazonas e Rondônia apresentando 14% e 13%, respectivamente. O estado do Amazonas nos anos de 2021 e 2022 apresentou um aumento significativo, reduzindo nos anos de 2023 e 2024, enquanto o estado do Mato Grosso voltou a ser o segundo estado com maior taxa de desmatamento do Bioma.

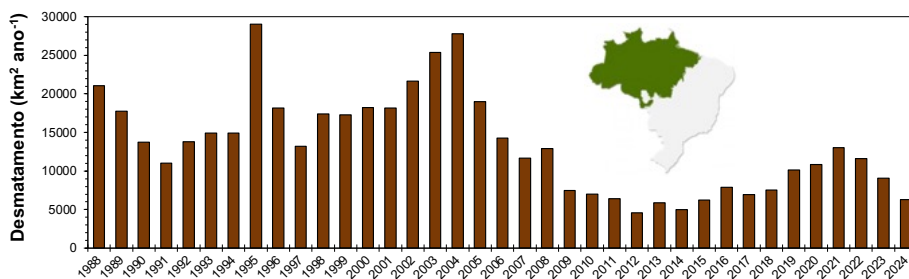


Figura 1: Taxa de desmatamento histórica pelo PRODES, para o bioma Amazônia.

Foi observada uma relação entre o desmatamento, a redução de chuva e o aumento de temperatura, principalmente durante a estação seca⁴⁻⁹. Segundo Gatti et al. (2021, 2023)^{4,6}, quanto mais desmatada a região, maior a redução de chuva e o aumento de temperatura. Na Figura 3, são apresentadas 3 sub-regiões da Amazonia. A Região 1, situada na porção leste da Amazonia (parte dos estados do Pará e Mato Grosso), apresentando 28% de desmatamento acumulado até o ano de 2018, mos-

trou que nos últimos 40 anos (1979 – 2018) foi observado uma redução de 28% na chuva e aumento de temperatura de 2,3°C, para os meses de agosto, setembro e outubro. Na Região 2, com desmatamento acumulado até 2018 de 8%, foi observada uma redução de 20% na chuva e aumento de 1,6°C na temperatura, mostrando novamente a relação entre desmatamento, perda de chuva e aumento de temperatura, isto é, áreas menos desmatadas apresentam menor perda de chuva e aumento inferior de temperatura que áreas mais desmatadas (região leste da Amazonia).

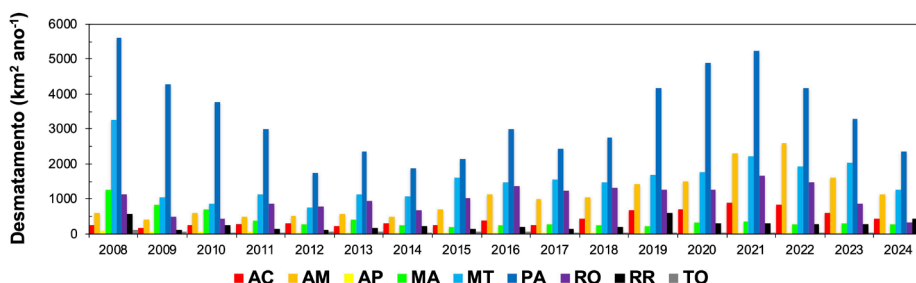


Figura 2: Taxa de desmatamento histórica pelo PRODES por estado do bioma Amazônia.

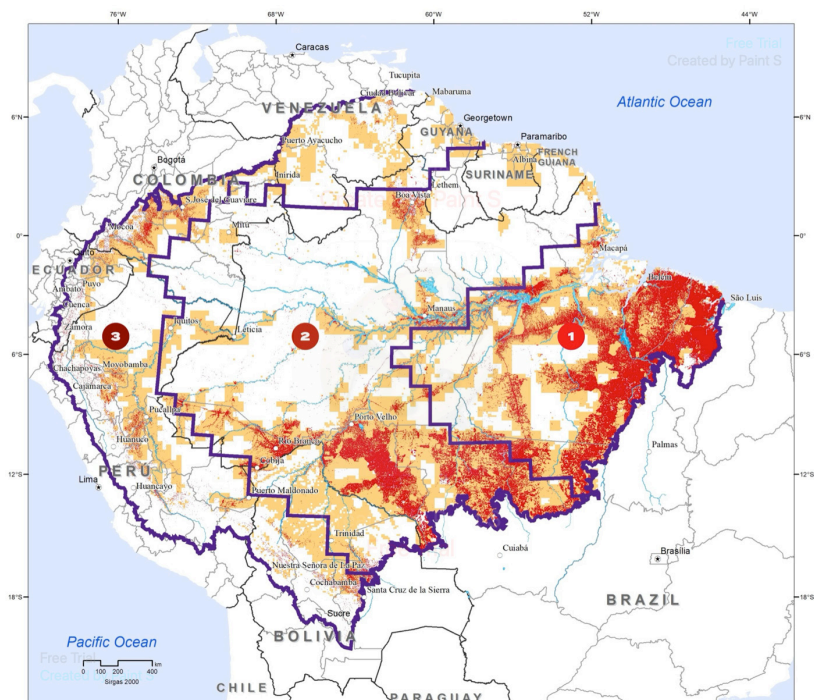


Figura 3: Divisão da Amazonia em três sub-regiões, de acordo com as áreas de influencia relativas as medidas em perfil vertical utilizando aviões de pequeno porte, em quatro localidades na Amazônia no projeto CARBAM^{4,6}. A região 1 concentra a área de influencia dos dois locais de medidas na região leste. A região 2 as áreas de influencia dos dois locais na região centro-oeste, e na região 3 a área não coberta pelos perfis verticais. Em vermelho são apresentadas as áreas desmatadas calculadas pelo PRODES¹, em laranja as áreas degradadas¹⁰ Fonte: SPA, 2023⁵.

A perda da floresta Amazônica ocorre para extração de madeira (legal e ilegal), grilagem, venda de terras (legal e ilegal), expansão de pastagens, áreas de plantio de soja e milho, mineração, etc. Segundo análise do Mapbiomas¹¹, a área de pastagem cresceu de 12,7 Mha em 1985 para 59,1 Mha em 2023, apresentando um crescimento de 365% (Figura 4). Se considerarmos o ano de 2010, este crescimento foi de 19%, o que significa uma preocupante expansão da pecuária na Amazonia brasileira. Em 2023 o rebanho bovino na Amazonia era de 80,3 milhões, aproximadamente 3 cabeças de gado por habitante Amazonense. A conversão da floresta Amazônica em soja é ainda mais intensa. Em 1985 a área plantada de soja era 0,0015 Mha, saltando para 5,89 Mha em 2023. Quando se considera

o crescimento em relação a 2010 (2,03 Mha), verifica-se um crescimento de 190%¹¹. Se considerarmos que existe uma moratória oficial da soja, desde 2006, observaremos que ela não existe na prática. Hoje, com 19 anos de implementação, observa-se que o setor não encontra resistência governamental para sua expansão intensa na Amazônia. A exportação de soja produzida na Amazônia cresceu 257% de 2010 a 2023. A extração de madeira e sua exportação, em grande parte ilegais, é a primeira etapa da destruição da floresta¹². 98,1% da madeira exportada são de florestas nativas, representando apenas 1,9% as exportações de florestas plantadas. O Brasil é um dos principais exportadores mundiais, indicando que esta também é uma importante fonte de destruição da floresta Amazônica. O controle na comercialização destes 3 itens, seria uma importante ferramenta de controle do desmatamento.

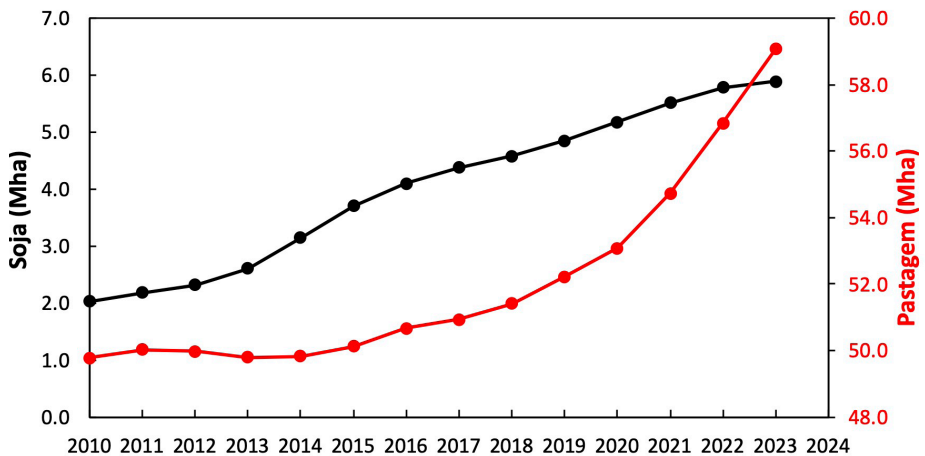


Figura 4: Evolução da área plantada de soja (em preto) e área de pastagem (em vermelho) na Amazônia Brasileira¹¹.

AQUECIMENTO GLOBAL E EXTREMOS AFETANDO O CLIMA AMAZÔNICO

O aquecimento na Amazônia, impulsionado tanto pelo desmatamento quanto pelas mudanças climáticas globais, está causando impactos significativos na região, incluindo secas e enchentes mais severas, aumento de incêndios florestais e alterações no ciclo hidrológico. Marengo

et al (2024)¹³ reavaliam estudos que analisaram tendências de temperatura em diferentes períodos e conjuntos de dados. Todos esses estudos mostram que, apesar das diferenças entre as tendências estimadas a partir de diferentes conjuntos de dados, as duas últimas décadas foram as mais quentes. A tendência de aquecimento é mais evidente a partir de 1980 e se intensifica a partir de 2000, quando ocorreram três secas excepcionais em 2005, 2010 e 2015/2016 (Figura 5) e em 2023-24. Por outro lado, inundações intensas foram observadas em 2009, 2012, 2021 e 2022. Nos anos de seca e de inundações na Amazônia, a distribuição geográfica de anomalias positivas e negativas de chuva foi diferente. Por exemplo, durante a seca de 2005 anomalias negativas de chuva foram observadas no sudoeste na Amazônia, e na seca de 2015-16 anomalias negativas de chuva se concentraram na parte central e leste da Amazônia.

Análises de dados de temperatura do ar do CRU mostraram que 2016 (um ano de El Niño) foi o mais quente desde 1850, com um aquecimento de até +1 °C acima da temperatura média anual para o período de referência de 1961 a 1990, e algumas anomalias mensais de temperatura ultrapassaram +1,5 °C durante este mesmo ano¹⁴. Record históricos mostram uma tendência crescente para todas as estações, com uma maior taxa de aquecimento de junho a novembro (Figura 5). Um padrão contrastante oeste-leste também é observado, com as taxas de aquecimento sendo quase o dobro na Amazônia oriental do que na Amazônia ocidental. A zona de transição Amazônia Oriental-Cerrado apresentou uma tendência de aquecimento generalizada e significativa (0,38 °C + 0,15 °C/década) durante a estação de transição seca-úmida de julho a outubro (JASO) nas últimas quatro décadas¹⁵. Taxas mais elevadas de aquecimento na Amazônia Oriental são atribuídas à mudança na cobertura do solo e à subsequente alteração do balanço energético¹⁶.

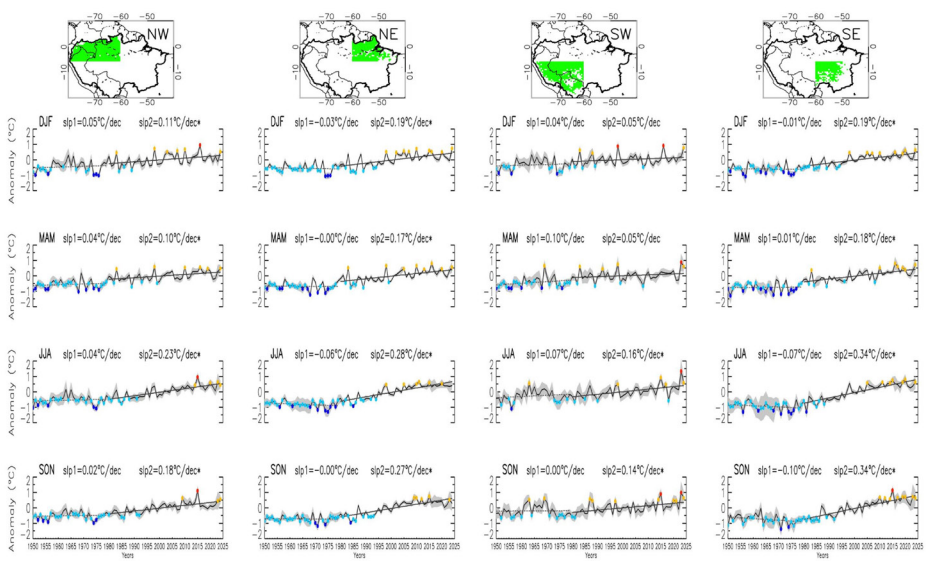


Figura 5: Séries temporais de anomalias sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) de temperatura do ar em diferentes setores das florestas perenes da Amazônia (NO, NE, SO, SE) usando dados fornecidos pela Climate Research Unit CRU Versão 4 (CRUTS4)¹⁷ para o período de referência de 1981-2010. Círculos laranja e vermelho indicam anomalias de temperatura que ultrapassam um desvio padrão (σ) e 2σ , respetivamente, enquanto círculos azul-claro e azul-escuro indicam anomalias de temperatura abaixo de -1σ e -2σ , respetivamente. As tendências lineares para o período 1950-1979 e 1980-2021 são representadas por uma linha tracejada e uma linha contínua, respetivamente. Os valores da inclinação para esses dois períodos (slp1, slp2) também estão incluídos. DJF: dezembro, janeiro, fevereiro; MAM: março, abril, maio; JJA: junho, julho, agosto; SON: setembro, outubro, novembro. NO: noroeste; NE: nordeste; SO: sudoeste; SE: sudeste¹³.

A variabilidade interanual de secas e inundações está associada ao aquecimento substancial do Atlântico tropical, e a fenômenos El Niño, que desde a década de 1990 desempenharam um papel central na intensificação do ciclo hidrológico na Amazônia¹⁸. O aquecimento do Atlântico tropical aumenta o vapor d'água atmosférico, que é importado pelos ventos alísios para o norte da bacia amazônica. Isso aumenta a precipitação e a vazão, especialmente durante a estação chuvosa¹⁸⁻²⁰. Uma intensificação do ciclo hidrológico na região foi observada em diversos estudos^{18,21}, refletindo-se no recente aumento de eventos hidroclimáticos extremos²²⁻²⁴. Além disso, nas últimas quatro décadas, diversos estudos demonstram um aumento da atividade convectiva e aumentos na precipi-

tação e na vazão fluvial no norte da Amazônia, bem como reduções dessas variáveis hidroclimáticas no sul da Amazônia²⁵, criando um “dipolo” de precipitação na região amazônica. As últimas décadas foram as mais quentes já observados na Amazônia, com quatro secas severas desde 2000 e ondas de calor.

O aumento das temperaturas e a crescente intensidade de eventos climáticos extremos, como secas, ondas de calor e inundações, causam estragos nos ecossistemas^{13,26}. A seca de 2023-24 foi marcada por chuvas excepcionalmente escassas e sete ondas de calor durante a estação seca e a pré-chuva, que varia de seca a chuvosa. Os níveis dos rios estão baixos e os incêndios aumentaram^{13,27}. Déficits de umidade do solo levaram a altas temperaturas e ondas de calor mais frequentes e severas no verão, como atestam modelos e observações climáticas^{28,29}. Essas alterações causadas pela seca e pelo calor levaram ao aumento da mortalidade de peixes e mamíferos aquáticos, à falta de água e alimentos seguros para as comunidades ribeirinhas, à interrupção do transporte fluvial, ao aumento do risco de doenças transmitidas pela água e à acentuada desfolha da vegetação ribeirinha, o que pode sinalizar a morte da vegetação e aumentar o risco de incêndios). Esses impactos na fauna aquática amazônica, não observados durante secas anteriores, indicam a gravidade da seca sem precedentes na Amazônia em 2023-24. Em 2023, as águas amazônicas sofreram alta mortalidade de peixes, botos-cor-de-rosa e outros mamíferos devido à maior temperatura da água e à diminuição da concentração de oxigênio³⁰⁻³².

Segundo Fleischmann et al. (2024)³², o aquecimento das águas amazônicas é generalizado. Desde 1990 observa-se uma tendência média de aquecimento de 0,6 °C por década dos lagos amazônicos. O pico foi atingido no extremo seco de 2023, quando a temperatura da água do lago Tefé, medida ao longo de toda a coluna d'água, a 2 metros (m) de profundidade, atingiu mais de 40 °C. Como consequência da seca, o nível do Rio Negro em Manaus caiu para 12, 11 m em 10 de outubro de 2024, o mais baixo em 122 anos de recorde. Pode-se observar que nos últimos 40 anos, 6 secas e 9 enchentes aconteceram na Amazônia, o que significa uma maior frequência de extremos secos e chuvosos, em comparação com décadas anteriores.

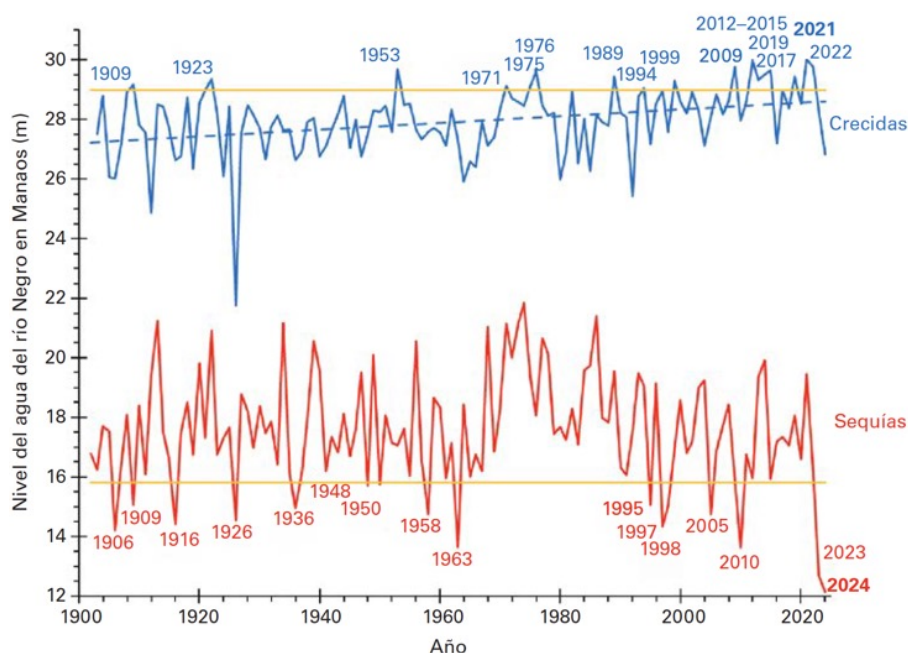


Figura 6: Níveis máximos (linhas azuis) e mínimos (linhas vermelhas) do Rio Negro no Porto de Manaus, de 1902 a novembro de 2024. Os valores em azul e vermelho indicam quando os recordes de cheia e seca foram quebrados, respectivamente. As linhas laranjas representam os limites superior (29,0 m) e inferior (15,8 m) usados para declarar episódios de cheia e seca, respectivamente. Os valores são expressos em metros (WMO 2025)²⁷.

As ondas de calor mais extremas na Amazônia ocorreram simultaneamente a sinais extremos de seca^{29,33,34}, uma “tempestade perfeita” para a biodiversidade e a conectividade e o funcionamento dos ecossistemas na Amazônia. Eventos compostos de seca e calor aumentam significativamente a incidência de incêndios na Amazônia, conforme relatado em 2005, 2010, 2015 e 2023. Isso leva a um feedback positivo entre incêndios e secas^{26,35}. O aumento da frequência de eventos compostos de seca e ondas de calor também aumenta os riscos de a floresta amazônica se aproximar de limiares térmicos críticos, além dos quais a maquinaria fotossintética dessas árvores começa a falhar, seguido por danos irreversíveis e, conseqüentemente, perda de folhas^{36–38}. Áreas que raramente vivenciaram ondas de calor na década de 1980, como a Amazônia e o nor-

deste do Brasil, vêm enfrentando condições de ondas de calor cada vez mais severas desde a década de 2000. Feron et al. (2024)³⁹ e Marengo et al. (submetido) avaliaram a progressão de condições simultâneas de calor, seca e alto risco de incêndio desde 1971. Eles descobriram que esses extremos compostos aumentaram nos últimos anos em regiões importantes da América do Sul, incluindo o norte da Amazônia e o Pantanal brasileiro

PRODUTIVIDADE ACIMA E ABAIXO DO SOLO EM UMA AMAZÔNIA SOB RÁPIDA TRANSFORMAÇÃO CLIMÁTICA

A produtividade primária líquida (NPP) é a fração do carbono fixado pela fotossíntese (produção primária bruta) que permanece no ecossistema após descontada a respiração autotrófica, e pode ser particionada em NPP aérea (NPPa) e NPP subterrânea (NPPs). A NPPa expressa a taxa de formação de biomassa nova acima do solo, estimada pela soma do incremento lenhoso das árvores vivas (incluindo recrutamento) e da produção de serapilheira, enquanto a NPPs expressa a taxa abaixo do solo, estimada pela produção de raízes finas e grossas.

A NPP pode indicar o saldo de CO_2 do ciclo de carbono do ecossistema, uma vez que a respiração heterotrófica está ligada à decomposição da biomassa morta (serapilheira e árvores mortas), processo em que o ecossistema emite CO_2 . Estimativas da NPP, como a diferença entre recrutamento e mortalidade de árvores, podem revelar se a floresta é sumidouro ou fonte de CO_2 . Assim, quando o recrutamento supera a mortalidade, a floresta atua como sumidouro de carbono atmosférico e quando a mortalidade supera o recrutamento, a floresta atua como fonte emissora de CO_2 . Ambos processos representam o fluxo de CO_2 quando o ciclo do carbono está em uma fase de remoção ou emissão de carbono atmosférico, condição que pode variar conforme o ano climático na Amazônia (Figura 7). Por exemplo, em anos de El Niño, quando o clima na Amazônia é mais quente e seco, a NPPa entra em uma fase de emissão de CO_2 ⁴⁰, efeito que pode ser medido pela mortalidade de árvores ultrapassando o recrutamento.

Na Amazônia, ainda não sabemos exatamente como a NPP acima do solo (NPPa) poderá se comportar em resposta às mudanças climáticas e à degradação das florestas. Porém, evidências convergentes indicam que a produtividade e o balanço de carbono das florestas amazônicas es-

tão sob pressão crescente devido a secas mais frequentes e intensas, degradação por fogo, efeito de borda e extração seletiva de madeira. Perfis atmosféricos revelaram que o sudeste da Amazônia atuou como fonte líquida de carbono em 2010–2018 (fase de emissão de carbono), condição associada a ocorrência frequente de incêndios e ao aumento da temperatura e redução da precipitação (e.g. anos de El Niño), com consequente déficit de pressão de vapor da atmosfera (DPV)⁴, sugerindo queda da assimilação (fotossíntese) relativa à respiração (mortalidade).

A Amazônia é um sumidouro de carbono de dimensões continentais, conforme comprovado pela primeira vez por Phillips & Gentry (1994)⁴¹ a partir de cálculos com dados de campo obtidos em parcelas de inventários florestais. Contudo, tendências de longo prazo indicam declínio desta capacidade de sumidouro de carbono da Amazônia por aumento da mortalidade e redução do tempo de residência do carbono no ecossistema, mesmo onde o crescimento florestal se manteve, enfraquecendo o acúmulo de biomassa acima do solo⁴², indicando tendência de redução da NPPa da Amazônia. Este processo resulta de duas condições ao mesmo tempo: 1) redução da tendência de crescimento das árvores por fertilização de CO₂ atmosférico e 2) aumento do estresse ambiental devido a fatores climáticos, condição crescente no leste e sudeste da Amazônia. Em escala global, DPV mais alto reduz o crescimento da vegetação e suprime a fotossíntese via fechamento estomático, um mecanismo particularmente relevante em estações secas mais longas e quentes⁴³, fenômeno que vem se intensificando na Amazônia.

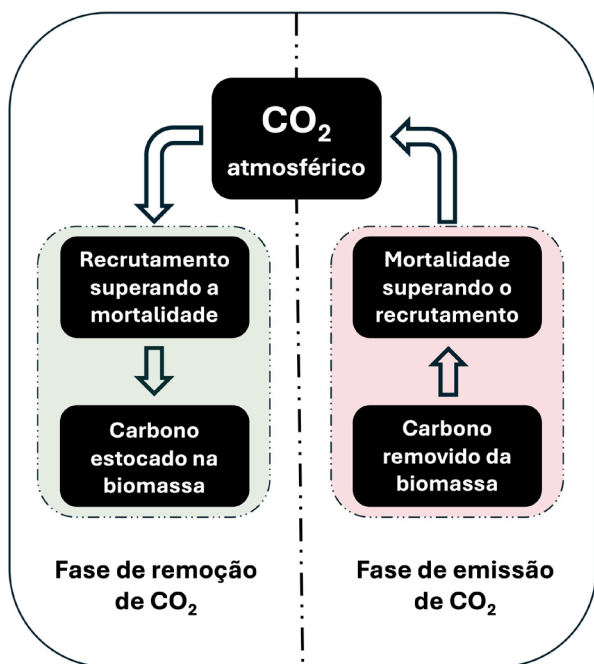


Figura 7: Troca de CO₂ entre atmosfera e vegetação em diferentes fases do ciclo do carbono. Em verde, à esquerda, o fluxo de carbono na fase de remoção de CO₂ da atmosfera pela floresta e em vermelho, à direita, o fluxo de carbono na fase de emissões. Em anos climáticos muito secos e quentes na Amazônia, o sistema tende a emitir CO₂, como durante os eventos de El Niño.

Experimentos de exclusão de chuva em Caxiuanã mostram queda persistente do crescimento lenhoso, aumento da respiração autotrófica e redução da eficiência de uso de carbono sob déficit hídrico crônico; após duas décadas, o sistema estabiliza em um novo estado de equilíbrio da NPPa, com menor biomassa e estoques de carbono⁴⁴. Em paralelo, a degradação florestal já afeta ~38% das florestas remanescentes da Amazônia e pode reduzir a evapotranspiração da estação seca em até ~34%, com perdas de carbono comparáveis ao desmatamento, o que deprime a NPPa ao abrir o dossel, aumentar a aridez do microclima e elevar a recorrência de fogo¹⁰.

Outras evidências revelam que o acúmulo de biomassa acima do solo diminuiu nas últimas décadas em função do aumento da mortalidade superando os ganhos de crescimento e encurtando o tempo de residência do carbono arbóreo⁴². Em regiões já mais quentes e desmatadas do

sudeste amazônico, o balanço líquido converteu-se em fonte, reforçando que o estresse climático e antrópico limita a NPPa⁴. Este efeito é intensificado pelo aumento da intensidade dos ventos na Amazônia, o que levam a um aumento anormal de quebra e morte de árvores⁴⁵.

Quanto à alocação de biomassa pela vegetação, meta-análises em florestas tropicais sugerem, em média, partição de ~34% da NPP para copa, ~39% para troncos e ~27% para raízes finas, mas com forte variação espacial e ambiental⁴⁶. Em condições de déficit hídrico, os experimentos de redução de chuvas (TFE) registram queda de NPP lenhosa e mudanças fisiológicas (e.g. maior respiração foliar/detrimento), reduzindo a eficiência de uso de carbono; estudos de raízes apontam ajustes morfológicos (maior área/superfície específica) sob solos mais secos, consistentes com maior investimento relativo para manter captação hídrica/nutricional⁴⁷. Estudos também indicam que solos mais arenosos e/ou pobres na relação fósforo/nitrogênio (P/N) elevam a fração da NPP destinada a raízes finas, uma condição de alocação de biomassa radicular importante para explicar contrastes regionais na Amazônia em função de fatores edáficos⁴⁸.

Variações no ciclo hidrológico e na temperatura afetam a produtividade da floresta. A NPP e os fluxos de carbono abaixo do solo (NPPs) são fortemente modulados pela umidade. Na Amazônia, a respiração do solo responde mais à limitação hídrica de curto prazo do que ao aquecimento isolado, sendo a sensibilidade à temperatura atenuada sob seca⁴⁹. Em contrapartida, aquecimento associado à seca tende a tornar frações mais antigas do carbono do solo (e.g. carbono pirogênico) mais vulneráveis à decomposição, implicando risco de perdas de matéria orgânica do solo (MOS) sob cenários mais quentes e secos⁵⁰, o que leva a redução da NPPs. Nesse caso, a hidrologia do subsolo é chave, uma vez que raízes profundas (> 8 m) sustentam a transpiração e a manutenção das florestas na Amazônia durante estações secas prolongadas, quando o lençol freático está mais profundo e menos acessível⁵¹. A precipitação e o lençol freático modulam a floresta de modo distinto, onde o lençol raso (<5 m) está associado a ~18% menos NPPs e ~23% menos biomassa que lençol profundo, e em condições mais secas (déficit hídrico cumulativo máx. < -160 mm), há ~21% menos NPP e ~24% menos biomassa que em condições mais úmidas. Há também interação: em condições secas, o lençol raso penaliza mais a produtividade do que o lençol profundo; em climas úmidos, essa desvantagem se limita a lençóis muito rasos. Por fim, o aumento observado/projetado do déficit de pressão de vapor da atmosfera (DPV) e

o alongamento da estação seca no sul/sudeste da Amazônia ($\approx +6,5 \pm 2,5$ dias por década desde 1979) intensificam essas limitações hídrico-térmicas, com repercussões negativas para fluxos abaixo do solo^{23,43,52,53}.

Apesar dos diversos estudos disponíveis, ainda existem lacunas de dados que limitam o nosso entendimento. Por exemplo, o subsolo é um compartimento do ecossistema ainda insuficientemente observado. Há poucos registros padronizados de produção/turnover de raízes finas, exsudatos e micorrizas na Amazônia, especialmente em profundidades > 1 m e em solos arenosos de baixa fertilidade; a variabilidade espacial da alocação a raízes ainda supera a capacidade preditiva de clima simples^{48,54}.

Outro problema é a integração de escalas. Faltam séries longas de medição da NPP e sua partição. Hoje, o único programa de medições de longo prazo da NPP em campo é do GEM/Plots⁵⁵, mas não cobre a maior parte da Amazônia. Torres de fluxo de CO_2 também são raras e poucas estão operando em longo prazo para que tenhamos resultado mais acurados. Também carecemos de monitoramentos orbitais acurados de medição de biomassa para fechar os balanços de carbono acima e abaixo do solo e vincular mudanças de alocação a anomalias climáticas (e.g. El Niño/DPV).

Também carecemos de uma melhor representação espacial da degradação na Amazônia. A degradação da floresta é extensa e persistente, mas ainda sub-representada em inventários e modelos (o DETER/INPE iniciou o monitoramento em 2026); incertezas de classificação (e.g. intensidade/idade do fogo, corte seletivo e efeito de borda) propagam-se para estimativas de emissões e produtividade. O mesmo podemos afirmar para a cobertura geográfica e hidrológica. Por exemplo, o oeste e noroeste amazônico, e áreas remotas carecem de instrumentação para perfis de umidade do solo, profundidade do lençol freático e temperatura do solo em larga escala, dificultando atribuições sobre os efeitos da degradação da floresta nestes compartimentos.

Outra necessidade premente é de mais experimentos de manipulação de chuvas em campo. Além de Caxiuanã, há apenas um experimento de seca crônica acompanhando simultaneamente NPP, partição de biomassa do ecossistema, raízes profundas e matéria orgânica do solo por mais de 10–20 anos (Projeto Seca Limite). O Seca Limite está investigando os efeitos da seca no sul da Amazônia, região mais sensível às mudanças climáticas devido à alta sazonalidade de chuvas, mas os resultados ainda são preliminares.

Síntese e implicações

A combinação de ar mais seco (maior DVP), estações secas mais longas e quentes, e degradação está reduzindo o crescimento lenhoso, elevando a respiração e deslocando, em muitos contextos, a alocação de biomassa para estruturas radiculares em detrimento da biomassa aérea. Essas respostas da vegetação aos estressores ambientais ajudam a manter a captação hídrica e a função imediata do dossel, mas enfraquecem o acúmulo de biomassa acima do solo e podem aumentar a vulnerabilidade do carbono do solo. É por esse motivo que evidências recentes revelam uma forte relação entre clima extremo e emissões de carbono atmosférico pela Amazônia, indicando que a floresta pode estar passando para uma fase mais contínua de emissões de CO₂ pela vegetação.

Prioridades de pesquisa / monitoramento devem incluir: redes de perfis de solo (umidade / temperatura / lençol freático), séries temporais harmonizadas de NPP e partição (incluindo raízes > 1 m), experimentos de manipulação em múltiplos tipos de solo, e incorporação explícita da degradação nos modelos e inventários. Essas ações são essenciais para reduzir incertezas e projetar o futuro da produtividade amazônica sob aquecimento e secas mais severas.

AS TRANSFORMAÇÕES DA FLORESTA E SEU IMPACTO NAS EMISSÕES DE CARBONO DA AMAZÔNIA

As florestas amazônicas estão entre os ecossistemas naturais mais produtivos do mundo, armazenando carbono na ordem de 123 ± 23 bilhões de toneladas no solo e na vegetação^{56,57} – um estoque equivalente a 14 - 18 anos de emissões globais de carbono. À medida que crescem, essas florestas também ajudam a reduzir os níveis de dióxido de carbono na atmosfera, absorvendo 1,2 bilhão de toneladas de CO₂ por ano em florestas primárias e secundárias⁵⁸. Essa contribuição para a redução do CO₂ atmosférico pode parecer modesta quando comparada a todas as emissões humanas (40 bilhões de toneladas de CO₂ por ano nos últimos 10 anos⁵⁹), mas representa 25% de todas as fontes globais associadas à mudança no uso da terra (5 bilhões de toneladas de CO₂ por ano⁵⁹). Esse sumidouro de carbono vem sofrendo um declínio nas últimas décadas, com aumentos claros na mortalidade das árvores^{42,60,61} (Tabela 1). O aumento da mortalidade muito provavelmente está vinculado a mudança

das condições climáticas, como o aumento do estresse na Amazônia, principalmente durante a estação seca, cada vez mais seca, quente e longa, como resultado de fatores como desmatamento, degradação e mudanças climáticas^{4,6,58}. Este processo sobre a floresta Amazônica, pode transforma-la em um feedback positivo, podendo lançar na atmosfera uma quantidade enorme de carbono^{4,62}.

Tabela 1: Medidas de absorção de carbono em florestas primarias em estudos de longo tempo em aproximadamente 300 áreas de um hectare monitoradas quanto ao carbono estocado no tronco, serrapilheira (resíduos foliares e outros), mortalidade, etc., normalizando a área para $7.25 \times 10^6 \text{ km}^2$.

Area normalizada $7.25 \times 10^6 \text{ km}^2$	Período	absorção de C (PgC ano^{-1})
Phillips and Brienzen, 2017	1990-00	-0.54 ± 0.18
	2000-10	-0.38 ± 0.20
	2010-20	-0.20^*
Brienzen et al, 2015	1990-00	-0.62 ± 0.09
	2000-10	-0.44 ± 0.10
	2010-20	-0.23^*
Hubau et al, 2020	1990-00	-0.68 ± 0.15
	2000-10	-0.45 ± 0.13
	2010-20	-0.25 ± 0.30

*O valor foi extrapolado baseado na tendencia linear das duas décadas anteriores.

Além de sua função no balanço global de carbono, as florestas ajudam a regular o ciclo da água na região amazônica, na América latina e até globalmente. A evapotranspiração das florestas representa até 50% da formação das chuvas e mantém ativamente os rios atmosféricos que trazem precipitação essencial para o continente, ajudando a modular as temperaturas regionais e a disponibilidade de água em rios e córregos ao longo do ano^{63,64}. A perda de florestas promove a redução de chuva e aumento das temperaturas da superfície terrestre, especialmente nas área mais desmatadas, durante a estação seca, reforçando o ciclo de retroalimentação no qual a transpiração reduzida leva à redução do conteúdo de água na atmosfera e a novas reduções na precipitação^{4,6-9,63,64}. Esses processos aceleram o aquecimento regional e aumentam a probabilidade de eventos climáticos extremos, que contribuem para a degradação florestal e o empobrecimento ao longo do tempo⁶⁵. Os impactos acumu-

lativos dessas perturbações agravam a ameaça de degradação florestal irreversível, minando os sumidouros de carbono e tornando a floresta a longo prazo uma fonte de emissões ainda maior⁶⁶. Em última análise, esses processos podem levar as regiões de floresta tropical a um limiar crítico e a um eventual colapso ecológico, impedindo intervenções de manejo eficazes para mitigar esses impactos. Com o evento de El Niño de 2023, e a anomalia de temperatura do Oceano Atlântico Norte (TNA) em 2023 e 2024 (Figura 8), a região amazônica está novamente em risco de grandes incêndios, devido à seca intensa e ao aumento da temperatura do ar, associado às altas taxas de desmatamento e ao uso do fogo para manejar pastagens, áreas agrícolas e promover novos desmatamentos, que resultam em um cenário catastrófico. Eventos como esse já afetaram a Amazônia em outros anos, como o El Niño de 2015/2016⁶⁷, causando a degradação de milhões de hectares.

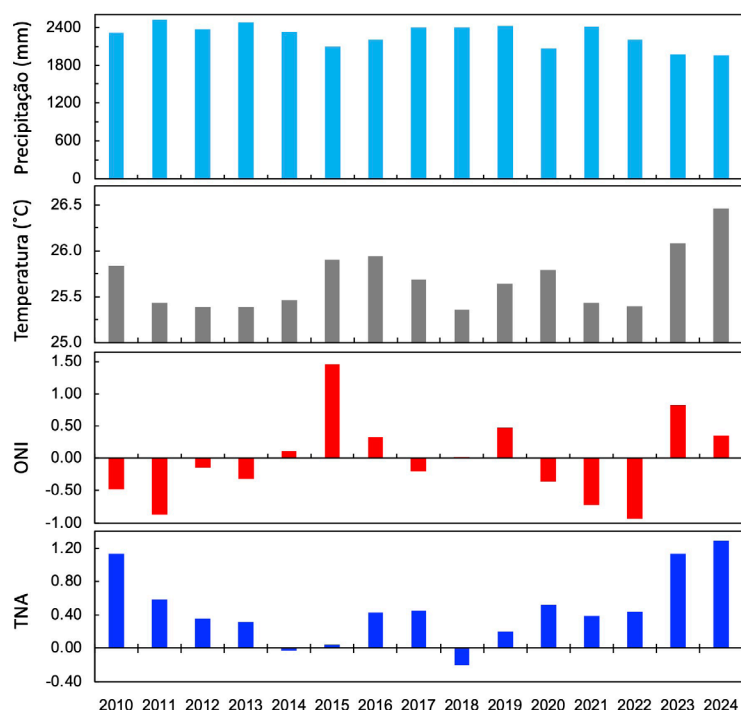


Figura 8: Precipitação acumulada para a Amazonia (GPCP⁶⁸), Temperatura média 2 m da superfície para a Amazônia (ERA569), Oceanic Niño Index⁷⁰ (ONI) e a Anomalia de temperatura do Oceano Atlântico Norte (TNA) na faixa 23.5N - 5.5N, 57.5W - 15.0W, relativo ao período 1971-2000^{69,71}.

Observando a Figura 8, constata-se que a precipitação vem diminuindo consistentemente desde 2021 e a temperatura aumentando neste mesmo período. Em consonância com este processo, a área total da Amazônia brasileira atingiu o total de 22% de sua floresta desmatada (PRODES¹), avanços cada vez maiores de degradação da floresta Amazônica, e aumento da extração de madeira, criação de gado e área plantada de soja e milho, conforme apresentado na introdução deste capítulo. Observando ainda os dois fenômenos globais do El Niño (ONI) e da anomalia de temperatura do Oceano Atlântico Norte (TNA), chegamos a constatação que as temperaturas do Oceano Atlântico Norte estão afetando mais a Amazônia do que o El Niño, pois este foi negativo nos anos de 2020 até 2022, enquanto que o TNA desde 2020 só tem aumentado, especialmente em 2023 e 2024, anos estes em que uma seca extrema foi observada na Amazônia, com rios secando e morte de mais de 200 botos na região de Tefé.

Estimativas do balanço de carbono da Amazônia na última década (2010-2020), em uma revisão baseada em estudos bottom-up e top-down indicam que a Amazônia como um todo, incluindo todos os processos de absorção e perda, considerando todas as emissões e absorções, tanto de origem natural como humana, é uma fonte de carbono da ordem de $1,10 \pm 0,73 \text{ Pg CO}_2 \text{ ano}^{-1}$ e $0,84 \pm 0,73 \text{ Pg CO}_2 \text{ ano}^{-1}$, respectivamente^{6,58}. É importante reconhecer e compreender os pressupostos por trás dessas duas abordagens, e mais pesquisas são necessárias para compreender e reduzir as diferenças entre elas. Esses resultados incluem todos os processos na Amazônia, incluindo sumidouros em florestas maduras e secundárias, recuperação de florestas perturbadas e emissões de carbono por desmatamento, degradação, exploração madeireira, decomposição, incêndios, combustíveis fósseis e agricultura (pastagens e plantações).

Gatti et al. (2023)⁶, apresentou o balanço de CO_2 para a última década (2010-2020), onde foi observado grande variabilidade interanual. A variabilidade interanual está relacionada tanto a variação das condições climáticas anuais quanto às ações humanas, que também se modificam a cada ano. O balanço de emissão de CO_2 médio para este período (2010 - 2020) foi de $1,15 \pm 0,11$ bilhões de toneladas de CO_2 por ano (Figura 4.2). Neste estudo foi identificado um aumento notável no balanço líquido de carbono da Amazônia durante 2019 e 2020⁶, com um aumento de 80% no desmatamento e 40% na queima de biomassa em comparação com 2010-2018. As emissões de carbono mais que dobraram nesse período, saltando de 0,92 para 1,91 bilhão de toneladas de CO_2 por ano. Conse-

quentemente, a Amazônia deixou de ser um sumidouro de carbono nestes dois anos e passou a ser uma fonte perceptível de carbono, em grande parte devido ao desmantelamento das medidas de controle do desmatamento e à aplicação da lei na Amazônia brasileira durante esse período. As emissões por queima de biomassa representam a maior fonte de emissão de CO₂ para a atmosfera, e na última década (2010-2020) foram responsáveis pela emissão de $1,47 \pm 0.11$ bilhões de toneladas de CO₂ por ano (Figura 9).

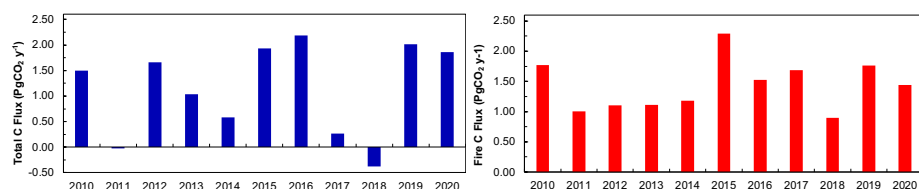


Figura 9: Balanço anual de carbono da Amazonia (barras azuis) e emissões anuais de carbono provenientes de queima de biomassa (barras vermelhas).

As emissões de carbono diferem de região para região dentro da Amazonia, influenciadas por diferentes condições climáticas, devido à magnitude do desmatamento acumulado historicamente e da degradação florestal^{4,6}. Após um declínio no desmatamento de aproximadamente 80% entre 2004 e 2012, após este período observa-se um aumento gradual até 2018 e intenso a partir de 2019. Em 2023 houve uma importante redução no desmatamento e seguida de nova redução em 2024. As reduções observadas foram 37% e 51%, respectivamente, em relação a taxa de 2022 (Figura 1). As taxas de desmatamento na Amazônia vêm aumentando, especialmente no “arco do desmatamento”, contribuindo para um aquecimento substancial nessas regiões^{4,6}. A região sul do estado do Amazonas e Acre apresentaram importante aumento no desmatamento. O estado do Amazonas foi o segundo estado com maior área desmatada nos anos 2021 e 2022 (Figura 2). Embora a aplicação de políticas de proteção ambiental no Brasil tenha sido responsável pela redução do desmatamento em 84% entre 2004 e 2012, entre 2013 e 2018 apresentou um aumento de 44% em relação a 2012 (a menor taxa registrada) e entre 2019 e 2022, o desmantelamento das políticas públicas causou um aumento

de 150% em relação a 2012. O desmatamento sempre está associado a incêndios florestais, que amplificam os impactos sobre a floresta.

Na Figura 3, onde foram apresentadas 3 sub-regiões da Amazonia, a Região 1, que apresentou 28% de desmatamento acumulado até o ano de 2018, e 28% de redução na chuva e 2,3 °C de aumento na temperatura (durante o pico da estação seca, nos meses agosto, setembro e outubro), e aumento de 16% em área queimada e apresentou as maiores emissões de CO₂ na Amazonia, com uma emissão média para a última década de 0,72 bilhão de toneladas CO₂ por ano, sendo as emissões de queimadas de 0,59 bilhão de toneladas CO₂ por ano. Na Região 2, onde o desmatamento acumulado até 2018 foi de 8%, a redução observada de chuva foi de 20% e 1,6 °C de aumento na temperatura, e uma emissão média total de 0,13 bilhão de toneladas de CO₂ por ano e 0,44 bilhão de toneladas de CO₂ por ano, oriundos de queimadas, e neste período apresentou 6% de sua área queimada^{5,6}.

A Amazônia como um todo, aqueceu na média anual 1,0 °C, e durante o pico da estação seca (agosto-outubro) o aquecimento foi de 1,4 °C, considerando o período de 1979 a 2018. Em regiões altamente desmatadas, os efeitos são particularmente agudos. No sudeste da Amazônia, onde o desmatamento afetou mais de 28% da área de terra até 2018 (até 2023 se estendeu para 33%), durante os meses mais agudos da estação seca: agosto e setembro, as temperaturas aumentaram em 3,1 °C. No nordeste da Amazônia (38% desmatado), a precipitação acumulada anual diminuiu 11%, incluindo perdas na estação seca de 35%, mostrando que os impactos da perda florestal no ciclo da água podem ser tão significativos quanto a contribuição para as emissões de carbono^{4-6,58}. Além disso, a intensificação e o aumento da duração da estação seca representam um aumento no estresse climático para a floresta, o que ampliará as perdas de carbono, especialmente por meio de incêndios, à medida que as florestas ficam mais secas devido a redução de chuva e o aumento de temperatura, este processo as torna mais inflamáveis⁷².

REFERÊNCIAS

1. PRODES. Amazon Deforestation Monitoring Project (PRODES / INPE). (2022). Available at: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>.

2. MMA GOV BR. PPCDAm. (2017). Available at: <http://redd.mma.gov.br/pt/acompanhamento-e-a-analise-de-impacto-das-politicas-publicas/ppcdam>.
3. Soares-Filho, B. *et al.* Cracking Brazil's Forest Code. *Science* (80-.). 344, 363–364 (2014).
4. Gatti, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595, 388–393 (2021).
5. Gatti, L. V. *et al.* *Human Impacts on Carbon Emissions and Losses in Ecosystems services*. (2023). doi:10.55161/HUYE3394
6. Gatti, L. V. *et al.* Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement. *Nature* 621, 318–323 (2023).
7. Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M. & Börner, J. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 12, 2591 (2021).
8. 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.* 124, 5268–5281 (2019).
9. Leite-Filho, A. T., Costa, M. H. & Fu, R. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *Int. J. Climatol.* 40, 2328–2341 (2020).
10. Lapola, D. M. *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science* (80-.). 379, eabp8622 (2023).
11. Mapbiomas_Amazonia. The MapBiomas Amazon Collection 9.0 includes annual land use and land cover data for the period 1985-2023. (2025). Available at: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. (Accessed: 11th August 2025)
12. Ministry of Development, Industry, C. and S.-B. G. Comexstat. *wood exportation* (2025). Available at: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. (Accessed: 9th July 2025)
13. MARENGO, J. A. *et al.* Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *Acta Amaz.* 54, (2024).
14. Jiménez-Muñoz, J. C. *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* 6, 33130 (2016).
15. Marengo, J. A., Jimenez, J. C., Espinoza, J.-C., Cunha, A. P. & Aragão, L. E. O. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Sci. Rep.* 12, 457 (2022).
16. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 321–328 (2012).

17. 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, 109 (2020).
18. Gloor, M. *et al.* Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1729–1733 (2013).
19. Gloor, M. *et al.* Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. *Global Biogeochem. Cycles* 29, 1384–1399 (2015).
20. 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).
21. Barichivich, J. *et al.* Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Sci. Adv.* 4, (2018).
22. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050 (2016).
23. Marengo, J. A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* (2018). doi:10.3389/feart.2018.00228
24. Espinoza, J.-C., Marengo, J. A., Schongart, J. & Jimenez, J. C. The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather Clim. Extrem.* 35, 100406 (2022).
25. Paca, V. H. da M., Espinoza-Dávalos, G., Moreira, D. & Comair, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* 12, 1244 (2020).
26. Espinoza, J.-C. *et al.* The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Sci. Rep.* 14, 8107 (2024).
27. WMO. State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2024. (2025).
28. Lorenz, R., Jaeger, E. B. & Seneviratne, S. I. Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophys. Res. Lett.* 37, (2010).
29. Marengo, J. A. *et al.* Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Front. Clim.* 7, (2025).
30. Ratier, R. Água a 38 °C, peixe podre e jacar. morto: Cientistas mostram colapso no AM. (2023). Available at: <https://www.uol.com.br/ecoa/colunas/rodrigo-ratier/2023/10/17/agua-a-38-oc-peixe-p%0D%0Aodre-e-jacare-morto-cientistas-mostram-colapso-no-am.htm>. (Accessed: 19th November 2023)

31. Marmontel, M., Fleischmann, A., Val, A. & Forsberg, B. Safeguard Amazon's aquatic fauna against climate change. *Nature* 625, 450–450 (2024).
32. Fleischmann, A. *et al.* Extreme warming of Amazon waters in a changing climate. (2024). doi:10.31223/X56D9T
33. Costa, D. F., Gomes, H. B., Silva, M. C. L. & Zhou, L. The most extreme heat waves in Amazonia happened under extreme dryness. *Clim. Dyn.* 59, 281–295 (2022).
34. Libonati, R. *et al.* Drought–heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: A comprehensive review. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1517, 44–62 (2022).
35. Aragão, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* 9, (2018).
36. Docherty, E. M. *et al.* Long-term drought effects on the thermal sensitivity of Amazon forest trees. *Plant. Cell Environ.* 46, 185–198 (2023).
37. Doughty, C. E. *et al.* Tropical forests are approaching critical temperature thresholds. *Nature* 621, 105–111 (2023).
38. Slot, M. *et al.* Leaf heat tolerance of 147 tropical forest species varies with elevation and leaf functional traits, but not with phylogeny. *Plant. Cell Environ.* 44, 2414–2427 (2021).
39. Feron, S. *et al.* South America is becoming warmer, drier, and more flammable. *Commun. Earth Environ.* 5, 501 (2024).
40. Matias Reis, S. *et al.* Sensitivity of tropical woodland savannas to El Niño droughts. *Biogeosciences* 22, 3949–3964 (2025).
41. Phillips, O. L. & Gentry, A. H. Increasing Turnover Through Time in Tropical Forests. *Science* (80-.). 263, 954–958 (1994).
42. Brien, R. J. W. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344–348 (2015).
43. 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, 1–12 (2019).
44. Sanchez-Martinez, P. *et al.* Amazon rainforest adjusts to long-term experimental drought. *Nat. Ecol. Evol.* 9, 970–979 (2025).
45. Reis, S. M. *et al.* Climate and crown damage drive tree mortality in southern Amazonian edge forests. *J. Ecol.* 110, 876–888 (2022).
46. Malhi, Y., Doughty, C. & Galbraith, D. The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 366, 3225–3245 (2011).

47. Metcalfe, D. B. *et al.* Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytol.* 187, 608–621 (2010).
48. Huaraca Huasco, W. *et al.* Fine root dynamics across pantropical rainforest ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 27, 3657–3680 (2021).
49. Meir, P., Metcalfe, D. ., Costa, A. C. . & Fisher, R. . The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1849–1855 (2008).
50. McFarlane, K. J. *et al.* Experimental warming and drying increase older carbon contributions to soil respiration in lowland tropical forests. *Nat. Commun.* 15, 7084 (2024).
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. Brando, P. M. *et al.* Drought effects on litterfall, wood production and below-ground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1839–1848 (2008).
53. Meir, P., Mencuccini, M. & Dewar, R. C. Drought-related tree mortality: addressing the gaps in understanding and prediction. *New Phytol.* 207, 28–33 (2015).
54. Cordeiro, A. L. *et al.* Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interact.* 1, 3–16 (2020).
55. Malhi, Y. *et al.* The Global Ecosystems Monitoring network: Monitoring ecosystem productivity and carbon cycling across the tropics. *Biol. Conserv.* 253, 108889 (2021).
56. MALHI, Y. *et al.* Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 15, 1255–1274 (2009).
57. MALHI, Y. *et al.* The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 12, 1107–1138 (2006).
58. Gatti, L. V *et al.* Cross Chapter 1: The Amazon Carbon Budget. in Amazon Assessment Report 2021 (UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2021). doi:10.55161/VNBV7494
59. Friedlingstein, P. *et al.* Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data* 14, 4811–4900 (2022).
60. Phillips, O. L. & Brien, R. J. W. Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance Manag.* 12, 1 (2017).

61. Hubau, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 80–87 (2020).
62. Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. & Totterdell, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184–187 (2000).
63. Costa, M. H. *et al.* Chapter 5: The Physical hydroclimate system of the Amazon. in *Amazon Assessment Report 2021* (UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2021). doi:10.55161/HTSD9250
64. Costa, M. H. *et al.* Chapter 7: Biogeophysical Cycles: Water Recycling, Climate Regulation. in *Amazon Assessment Report 2021* (UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2021). doi:10.55161/KKHX1998
65. Uribe, M. del R. *et al.* Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. *Nat. Clim. Chang.* 13, 274–281 (2023).
66. Read, D. *et al.* *The role of land carbon sinks in mitigating global climate change.* (2001).
67. Berenguer, E. *et al.* Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118, (2021).
68. Adler, R. *et al.* The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation. *Atmosphere (Basel)*. 9, 138 (2018).
69. Hersbach, H. *et al.* Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present* (2023). doi:10.24381/cds.adbb2d47
70. Climate Prediction Center, N. Oceanic Nino Index. (2025). Available at: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. (Accessed: 21st May 2025)
71. Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A. & Cid-Serrano, L. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *J. Geophys. Res. Ocean.* 104, 7841–7848 (1999).
72. Brando, P. *et al.* Amazon wildfires: Scenes from a foreseeable disaster. *Flora* 268, 151609 (2020).
- Marengo JA, Calim Costa M, Cunha AP, Espinoza, JC, Jimenez JC, Libonati R, Geirinhas J., Miranda V, Trigo IF, Sierra JP, Maria TO, Meeiros O (2025b) Characterization of the exceptional heatwave conditions observed in Brazil during the record-hot years of 2024 and 2025, submitted, *Int. J. Climatol*