



O PONTO DE INFLEXÃO DO SISTEMA FLORESTAL AMAZÔNICO



**SIMA
CLIM**

A capa deste relatório foi criada por Auá Mendes

Auá Mendes, indígena do povo Mura, é artista gráfica, ilustradora, muralista e arte-educadora, nascida em Manaus (1999) e radicada em São Paulo desde 2020. Formada em Design Gráfico, sua trajetória combina identidade cultural com criações visuais potentes, desenvolvidas para grandes marcas como Nike, Google, Natura, Banco do Brasil, Hershey's e Nubank, além de instituições culturais como MAM, Instituto Tomie Ohtake e as Bienais de São Paulo e das Amazônias. Reconhecida por suas imponentes intervenções urbanas — murais de até 60 metros — e por sua atuação em campanhas sobre empoderamento feminino, diversidade e Amazônia, Auá se destaca como uma voz fundamental na arte contemporânea brasileira, com trabalhos também apresentados internacionalmente.



**SIMA
CLIM**

O PONTO DE INFLEXÃO DO SISTEMA FLORESTAL AMAZÔNICO

2025



Relatório de Síntese

O ponto de inflexão do sistema florestal amazônico

Autor principal coordenador:

Regina Rodrigues Rodrigues (UFSC)

Autores principais:

Andrew Hartley (Met Office)

Carlos Afonso Nobre (IEA/USP)

Carlos Alberto Nobre Quesada (INPA)

Chris D. Jones (Met Office, Universidade de Bristol)

Edson Paulo Domingues (UFMG)

Francisco de Assis Costa (UFPA)

Gustavo Luedemann (IPEA)

Jean Pierre Henry Balbaud Ometto (INPE)

Jeffrey Chambers (Universidade da Califórnia)

Lincoln Muniz Alves (INPE)

Pedro Ivo Ferraz da Silva (MRE)

Sandra de Souza Hacon (FIOCRUZ)

Tomas Ferreira Domingues (USP)

Autores revisores:

Bernardo Monteiro Flores (UFSC)

Moacyr Cunha de Araujo Filho (UFPE)



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

O Ponto de inflexão do sistema florestal amazônico / [autores principais e coordenadores Regina Rodrigues, Moacyr Araújo]. -- 1. ed. -- Recife : Edições Saint Exupery, 2025. -- (Relatórios de Síntese SIMACLIM ; 1)

Vários autores.
Bibliografia
ISBN 978-65-988223-3-0

1. Amazônia 2. Amazônia - Aspectos ambientais 3. Amazônia - Brasil 4. Desmatamento - Amazônia 5. Florestas - Amazônia - Brasil 6. Meio ambiente - Proteção 7. Mudanças climáticas - Aspectos ambientais I. Rodrigues, Regina. II. Araújo, Moacyr. III. Série

25-290165

CDD-577.098111

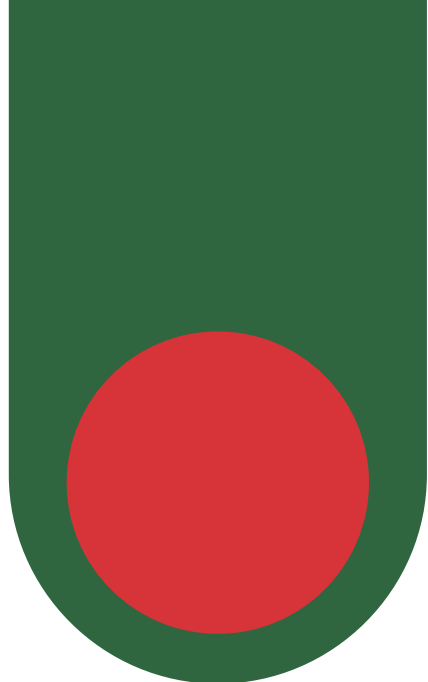
Índices para catálogo sistemático:

1. Amazônia : Biodiversidade : Floresta : Conservação : Ecologia
577.098111

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

SUMÁRIO

RESUMO EXECUTIVO	5
01. O QUE É UM PONTO DE INFLEXÃO?	9
02. POR QUE ISSO É IMPORTANTE?	32
03. O QUE PODEMOS FAZER A RESPEITO?	43
04. OPORTUNIDADES DE FINANCIAMENTO	56
REFERÊNCIAS	61



RESUMO EXECUTIVO



RESUMO
EXECUTIVO

RESUMO EXECUTIVO

As atividades humanas estão causando grandes transformações no sistema climático da Terra, resultando em temperaturas perigosamente mais altas, clima seco e ondas de calor mais intensas, com efeitos prejudiciais importantes para a natureza e a sociedade. Além desses impactos diretos, à medida que o planeta continua a mudar sob pressões crescentes, outros efeitos indiretos podem agir para acelerar os impactos das mudanças globais por meio de processos conhecidos como *feedbacks* do sistema. Esses *feedbacks* podem fazer com que as condições ultrapassem os pontos de inflexão que levam a mudanças abruptas e irreversíveis nos ecossistemas. No caso da floresta amazônica, as secas sob condições continuamente mais quentes, os padrões de precipitação alterados causados pelo desmatamento generalizado, a degradação florestal e os incêndios, todos atuam para levar os ecossistemas a ultrapassarem os pontos de inflexão potenciais que podem impactar negativamente os climas locais, regionais e globais.

As secas causam estresse às plantas e resultam em taxas elevadas de mortalidade de árvores florestais. Como o sistema climático continua a se aquecer, cada seca sucessiva ocorre em temperaturas ainda mais altas, agravando os impactos sobre o ecossistema. Ao mesmo tempo em que as florestas intactas estão sofrendo um estresse elevado, grandes áreas de floresta estão sendo derrubadas para serem convertidas em locais de atividades agrícolas e as florestas adjacentes a essas paisagens antropogênicas estão sucumbindo à degradação. Tais mudanças também aceleram a dinâmica dos incêndios que resultam em mais perdas florestais, com influência adicional na qualidade do ar devido aos aerossóis produzidos pela combustão de biomassa.

Além dos efeitos diretos do estresse por calor e seca, as mudanças nos ecossistemas amazônicos sob um clima mais quente também causam uma redução na capacidade da floresta de reciclar a precipitação de volta para a atmosfera. Esse efeito de secagem regional pode mudar as florestas para estados mais abertos, semelhantes às savanas, ao mesmo tempo em que o uso da terra resulta na substituição das árvores da floresta por culturas agrícolas que reciclam menos água. Juntas, tais mudanças climáticas e de uso da terra agem para reduzir a precipitação regional e, quando os pontos de inflexão da perda florestal são ultrapassados, a Amazônia pode ser “empurrada” para



condições permanentemente mais secas, com menor biomassa e ecossistemas mais áridos. Uma vez ultrapassados esses pontos de inflexão, as condições alteradas em escala local, regional e global podem gerar impactos negativos na segurança alimentar e hídrica, na saúde humana, na infraestrutura essencial e nos principais serviços ecossistêmicos.

Para evitar as graves consequências de ecossistemas amazônicos permanentemente alterados, é fundamental manter os níveis de aquecimento global e desmatamento abaixo daqueles que provavelmente levarão às condições de ultrapassar os pontos de inflexão. Embora seja praticamente inevitável que o mundo atinja um perigoso aquecimento de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais na próxima década, a extensão em que esse nível de aquecimento será ultrapassado e a rapidez com que poderemos reduzir as temperaturas novamente dependem fortemente de ações colaborativas globais tomadas agora para limitar as emissões.

Com relação ao desmatamento, o governo brasileiro se comprometeu a atingir o desmatamento zero (PPCDAm, NDC, 2024). As alternativas ao desmatamento devem considerar a diversidade biológica e sociocultural da Amazônia e adotar estratégias e tecnologias que considerem as interações de soluções locais, regionais e globais em escalas de tempo mais longas e relevantes e que contribuam para reestruturar as ações de conservação na Amazônia. Como as abordagens para evitar os pontos de inflexão da Amazônia são previstas e implementadas, também é fundamental reconhecer que a proteção das florestas amazônicas, por si só, não é uma solução para as mudanças climáticas, pois as emissões de carbono negro dos combustíveis fósseis não podem ser neutralizadas apenas com os sumidouros de carbono verde do sequestro de carbono da floresta.

Os planos de adaptação também devem ser implementados se os pontos de inflexão não forem evitados para garantir as funções ecológicas dos ecossistemas, dos recursos hídricos, da segurança alimentar, das comunidades florestais e da biodiversidade. Ao contrário dos esforços de mitigação, que visam reduzir os fatores de mudança, as adaptações se concentram no ajuste às mudanças que já estão ocorrendo e àquelas que são inevitáveis. Os modelos de avaliação integrada voltados para a projeção de resultados de diferentes mudanças climáticas e caminhos socioeconômicos fazem parte das ferramentas essenciais para traçar caminhos razoáveis. São



necessários sistemas de alerta precoce para detectar os processos de extinção da floresta, o risco de propagação de incêndios catastróficos e os impactos nos sistemas de produção agrícola para indicar quando planos de adaptação específicos precisam ser colocados em prática. A preparação para a adaptação em toda a Amazônia e o aumento da resiliência aos eventos extremos são fundamentais para garantir a estabilidade social e ecológica.

Os pontos de inflexão que são ultrapassados não são apenas ameaças ao meio ambiente e à biodiversidade, mas também aos milhões de pessoas que dependem da Amazônia para sua subsistência, cultura e bem-estar. No entanto, de acordo com o estudo Nova Economia para a Amazônia Brasileira do *World Resources Institute*, um cenário sem desmatamento seguindo um caminho de baixo carbono resultaria em um crescimento econômico substancial e equitativo para a região amazônica e para o Brasil. Da mesma forma, as reduções de emissões de gases de efeito estufa em escala global para evitar alterações perigosas no sistema climático também proporcionam benefícios econômicos generalizados. Os paradigmas devem mudar para que os pontos de inflexão da Amazônia sejam evitados, o que só será uma consequência de ações sociais e governamentais efetivamente integradas que catalisem mudanças proativas.

1

O QUE É UM PONTO DE INFLEXÃO?

O QUE É UM
PONTO DE
INFLEXÃO?

1. O QUE É UM PONTO DE INFLEXÃO?

A humanidade está atualmente em uma trajetória perigosa, conforme destacado pela avaliação mais abrangente do IPCC (2023) sobre as mudanças climáticas. Todas as regiões do mundo já estão sofrendo os impactos das mudanças climáticas e esses efeitos se intensificarão a cada incremento de aquecimento adicional. O risco de atingir pontos de inflexão aumenta à medida que o planeta aquece.

Os pontos de inflexão são predominantes nos sistemas interconectados da Terra, como a criosfera, a biosfera, os oceanos e a atmosfera. Embora esses sistemas geralmente respondam de forma direta às pressões humanas, como no caso das mudanças climáticas, das mudanças no uso da terra e da poluição, a superação de certos limites pode desencadear mudanças abruptas e irreversíveis devido a mecanismos de feedback autossustentáveis. Esse limite crítico é conhecido como ponto de inflexão.

As evidências sugerem fortemente que a floresta amazônica está se aproximando de um ponto de inflexão, impulsionada por um estresse sem precedentes decorrente do aumento das temperaturas, secas severas, desmatamento, degradação e incêndios (Hirota et al., 2011; Lovejoy & Nobre, 2018; Flores et al., 2024; Nobre et al., 2026). A Amazônia desempenha um papel crucial no sistema climático global, mas as projeções indicam que ela pode se deteriorar para um estado menos diversificado e produtivo se as tendências atuais continuarem. Isso não apenas resultaria em perda de biodiversidade, mas também transformaria a floresta em uma fonte de carbono para a atmosfera, exacerbando assim a mudança climática global (Gatti et al., 2021; 2023). Os sinais de alerta precoce e os dados de monitoramento indicam que partes da Amazônia já estão se desestabilizando e podem passar por uma transição devido à combinação de distúrbios, sugerindo que o sistema como um todo poderia atravessar um ponto de inflexão por volta de 2050, além do qual uma transição em todo o bioma se tornaria autossustentável (Flores et al., 2024).

No entanto, a identificação do limite exato em que a Amazônia pode se inclinar permanece incerta, com estimativas que variam amplamente. Os modelos climáticos atuais, apesar de capturarem com eficácia as tendências passadas e presentes, muitas vezes não têm a resolução necessária para prever com precisão a dinâmica desses pontos de inflexão. No entanto, as evidências de modelos conceituais e

reconstruções paleo sustentam a probabilidade de eventos de tombamento passados em sistemas semelhantes (Lenton et al., 2023).

1.1. Definição

Na linguagem cotidiana, um ponto de inflexão é quando uma pequena mudança faz uma grande diferença em um sistema (Gladwell, 2002) ou “o ponto em que uma série de pequenas mudanças ou incidentes se torna significativa o suficiente para causar uma mudança maior e mais importante” (*Oxford English Dictionary*). Aqui, um sistema é qualquer grupo de componentes interativos ou inter-relacionados que agem de acordo com um conjunto compartilhado de regras para formar um todo reconhecível e unificado – por exemplo, uma camada de gelo ou uma economia. Um ponto de inflexão é um limite. A pequena mudança que faz com que um sistema ultrapasse um ponto de inflexão pode ser descrita como um gatilho, levando a uma transformação significativa na estrutura ou função do sistema para outro estado estável.

Passar por um ponto de inflexão geralmente envolve qualidades como rapidez (mudança rápida em relação aos fatores que a forçam), autoperpetuação (a mudança continua mesmo que a força seja removida até que um novo estado seja alcançado) e irreversibilidade (a mudança é difícil ou impossível de reverter) (Milkoreit et al., 2019).

Um ponto de inflexão ocorre quando uma pequena mudança desencadeia uma transformação muitas vezes rápida e irreversível. Os pontos de inflexão são cruzados quando um sistema é empurrado para além das condições que permitem a coexistência estável e dinâmica de suas partes, forçando-o a se reorganizar em um novo estado estável. Sob mudanças graduais, como as taxas atuais de aquecimento global, os ecossistemas podem persistir em um estado aparentemente semelhante (apesar da crescente perda de resiliência) até que as condições ultrapassem o ponto de inflexão e os empurrem para um novo equilíbrio dinâmico.

As florestas tropicais, existentes na extensão mais úmida e quente dos biomas da Terra, com o aquecimento adicional possivelmente serão empurradas para condições sem analogia na Terra por milhões de anos (Williams et al. 2007; Barlow et al., 2018; Westerhold et al., 2020). Secas mais intensas sob um clima mais quente podem impulsionar transições de ecossistemas no sistema florestal amazônico com taxas mais altas de mortalidade de árvores e mudanças na composição das plantas,

levando esses sistemas a condições inéditas (Cox et al., 2004; Lapola et al., 2018; McDowell et al., 2018). O desmatamento e a degradação florestal decorrentes da mudança no uso da terra também podem fazer com que as florestas tropicais ultrapassem os pontos de inflexão.

Uma grande parte da resiliência amazônica resulta da reciclagem das chuvas, em que a umidade é devolvida à atmosfera por meio da transpiração das árvores da floresta e reprecipita a favor do vento, aumentando assim as chuvas e a estabilidade no oeste do bioma. A perda da cobertura florestal devido ao uso da terra pode enfraquecer esse efeito de reciclagem da precipitação e intensificar as condições de seca no interior e no oeste da bacia (Shukla et al., 1990; Nobre et al., 1991; Nobre et al., 2016; Marengo et al., 2018).

À medida que as taxas de precipitação diminuem em direção nível necessário para sustentar florestas de dossel fechado, as florestas perdem a resiliência e os distúrbios podem empurrar as florestas para estados de dossel mais abertos. Portanto, grandes partes do sistema florestal amazônico podem entrar em colapso, por exemplo, devido a secas extremamente quentes e frequentes.

Compreender e identificar pontos de inflexão nos sistemas ambientais da Terra é fundamental para prever e mitigar os impactos das mudanças climáticas. O ponto de inflexão da floresta amazônica ressalta a urgência de ações coordenadas para reduzir as pressões humanas, como o desmatamento, a degradação florestal e os incêndios florestais e para limitar o aquecimento global. Para abordar e mitigar de forma eficaz os riscos associados aos pontos de inflexão, é essencial entender os principais fatores por trás dessas mudanças.

A seção a seguir explorará os principais fatores que contribuem para os pontos de inflexão, incluindo mudanças climáticas, mudanças no uso da terra e outras influências antropogênicas. Ao examinar esses fatores, podemos informar melhor as nossas estratégias e ações para proteger os sistemas interconectados da Terra.

1.2. Agentes Estressores

i) Desmatamento e degradação

O sistema florestal amazônico fornece vários serviços ecossistêmicos, mas, para fins de compreensão do risco de um ponto de inflexão na

Amazônia e no sistema terrestre, dois desses serviços ecossistêmicos são de grande importância: a reciclagem de umidade e o armazenamento e sequestro de carbono. O desmatamento e a degradação florestal limitam a capacidade da floresta de prestar esses serviços e podem desestabilizar o clima global. Por exemplo, uma floresta amazônica menor, que armazena menos carbono e é mais propensa a secas, teria uma capacidade reduzida de armazenar carbono e sequestrar as concentrações atmosféricas de CO₂, ampliando, portanto, a mudança climática global.

Entre 2000 e 2022, a bacia Pan-Amazônica perdeu 12,6% de sua floresta úmida intacta de 1999 (totalizando 542,5 Mha), seja por desmatamento (8,0%) ou por degradação florestal (4,6%) (Vancutsem et al., 2021; Beuchle et al., 2023) (Figura 1). Embora essa taxa tenha diminuído no período de 2006 a 2013, o monitoramento recente mostra uma possível intensificação a partir 2018. Lapola et al. (2023) estimam que 5,5% da Amazônia está sob alguma forma de degradação causada por fogo, efeitos de borda ou extração de madeira, aumentando para 38% quando se considera também a perturbação causada por secas extremas. Eles estimam que isso pode reduzir a evapotranspiração da estação seca em até 34%.

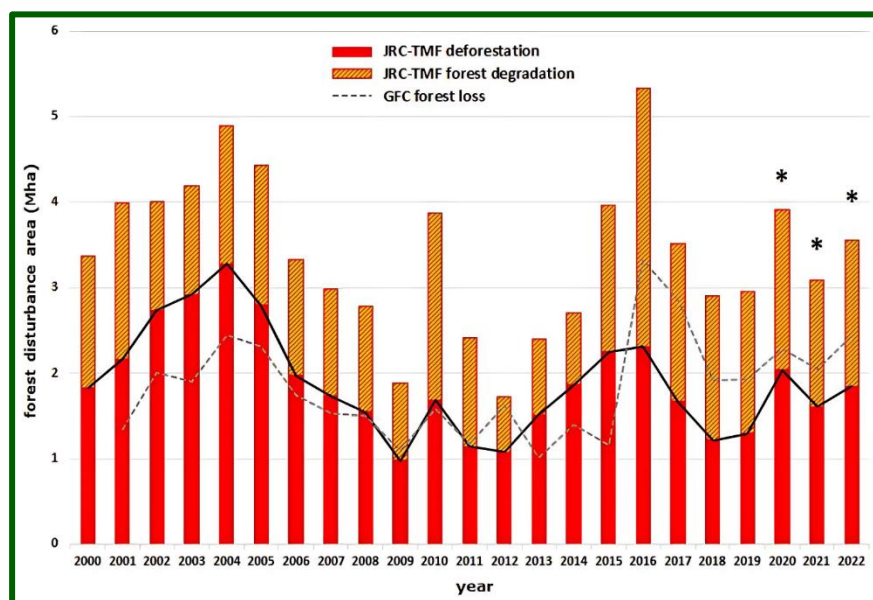


Figura 1. Taxa anual de desmatamento e perturbação de florestas tropicais úmidas do registro de longo prazo do JRC-Tropical Moist Forest (Fonte: Beuchle et al., 2023). A linha pontilhada cinza indica a perda de floresta do conjunto de dados Global Forest Cover Change (Hansen et al., 2013).

Modelos de sistemas terrestres têm sido usados para entender a quantidade de perda florestal que poderia induzir um colapso sistêmico da floresta amazônica em um estado estável alternativo. Nesses estudos, o tombamento da Amazônia é geralmente definido como uma mudança para um estado de ecossistema de dossel aberto, embora outros tipos de transição tenham sido identificados (Flores et al., 2024). Embora haja grande incerteza sobre qual nível de desmatamento pode induzir uma mudança no estado estável da Amazônia, alguns estudos sugeriram que uma perda de floresta acima de 40% (em relação à extensão original da Amazônia) poderia levar a uma redução na precipitação na região que teria um impacto em todo o sistema, particularmente no sudoeste da Amazônia (Sampaio et al., 2007; Zemp et al., 2017; Staal et al., 2018).

ii) Mudanças de precipitação e temperatura

As florestas tropicais exigem condições consistentemente úmidas para se desenvolverem. As regiões sazonalmente secas, que são mais suscetíveis a distúrbios regulares, como incêndios, geralmente são dominadas por ecossistemas de savana. Consequentemente, as mudanças no clima, especificamente o aumento da temperatura da superfície e a redução das chuvas, podem levar a uma transição da floresta para um estado qualitativamente diferente. O risco de perda da floresta amazônica em função do clima é conhecido há muitos anos (Cox et al., 2000; Salazar et al., 2007; Lapola et al., 2009; Malhi et al., 2009). As mudanças climáticas em larga escala, que levam a um aquecimento e secagem substanciais da região, podem exacerbar a secagem regional devido à redução da reciclagem de água (Betts et al., 2004). As mudanças na própria floresta também afetam o clima local, conforme discutido na Seção 3.

Os estudos que investigam a possível extinção da floresta amazônica examinaram as mudanças na temperatura e na precipitação como fatores determinantes. Good et al. (2011) definem um limite no espaço climático em termos de temperatura e duração da estação seca. Se uma região ultrapassar esse limite, o risco de perda de floresta aumenta significativamente. A floresta amazônica está mais próxima desse limite do que outras florestas tropicais (Good et al., 2011) (Figura 2). Essa figura de Good et al. (2011) ilustra a relação entre a duração da estação seca, a temperatura e a fração de floresta de folha larga em regiões tropicais. A clara separação da cobertura florestal alta e baixa em zonas bioclimáticas distintas com base na duração da estação seca

e na temperatura demonstra o papel fundamental que esses fatores desempenham na determinação da resiliência da floresta. O grau de possível *dieback* depende de como cada local se move no espaço de fase (ou seja, as mudanças para um clima mais quente e mais seco movem os pontos para a direita e para cima, respectivamente), mas também de como o efeito direto do CO₂ elevado na eficiência do uso da água e na resiliência da floresta pode mover o limite para cima e para a direita.

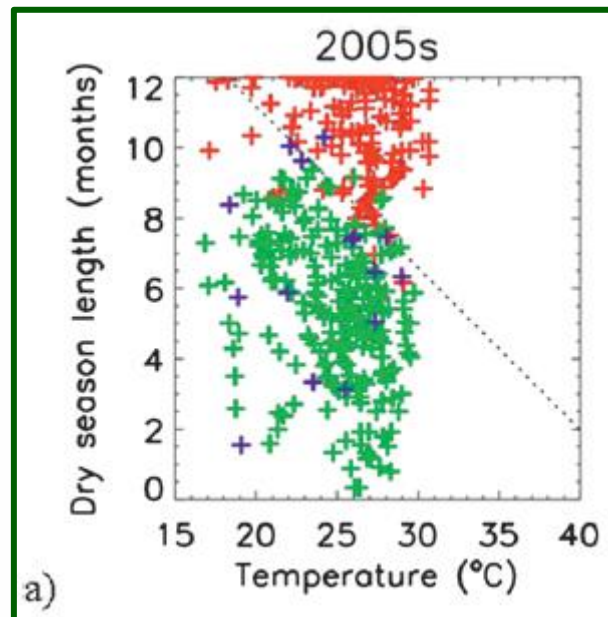


Figura 2. Zonas bioclimáticas simuladas da fração tropical de folhas largas. Os pontos de dados representam células de grade de terra tropical, com a cor indicando a fração de floresta de folha larga. A linha pontilhada indica o limite da função de resiliência da estação seca (DSR), que prevê a sustentabilidade das florestas de folhas largas sob condições climáticas variáveis. Fonte: Good et al. (2011).

Malhi et al. (2009) mostram como as reduções na precipitação levariam à transição da floresta amazônica para ecossistemas sazonais e, depois, para ecossistemas do tipo savana (Figura 3). A Figura 3 de Malhi et al. (2009) plota a distribuição dos tipos de vegetação em relação ao regime de chuvas, definido pela precipitação anual (AP) e pelo **déficit hídrico climatológico máximo** (MCWD). A área sombreada indica a zona de savana sugerida ($MCWD \leq -300$ mm, $AP \leq 1500$ mm). A figura ilustra como os tipos de vegetação passam por diferentes regimes de chuva. As florestas perenes predominam em áreas com maior AP e maior MCWD (mais negativo significa maior déficit), enquanto as savanas são mais comuns em regiões com menor AP e

maior MCWD. Isso sugere que, à medida que as condições climáticas mudam, as áreas que atualmente abrigam florestas tropicais podem passar para um estado de copa aberta (savanas ou ecossistemas degradados) se forem para a zona de savana sombreada.

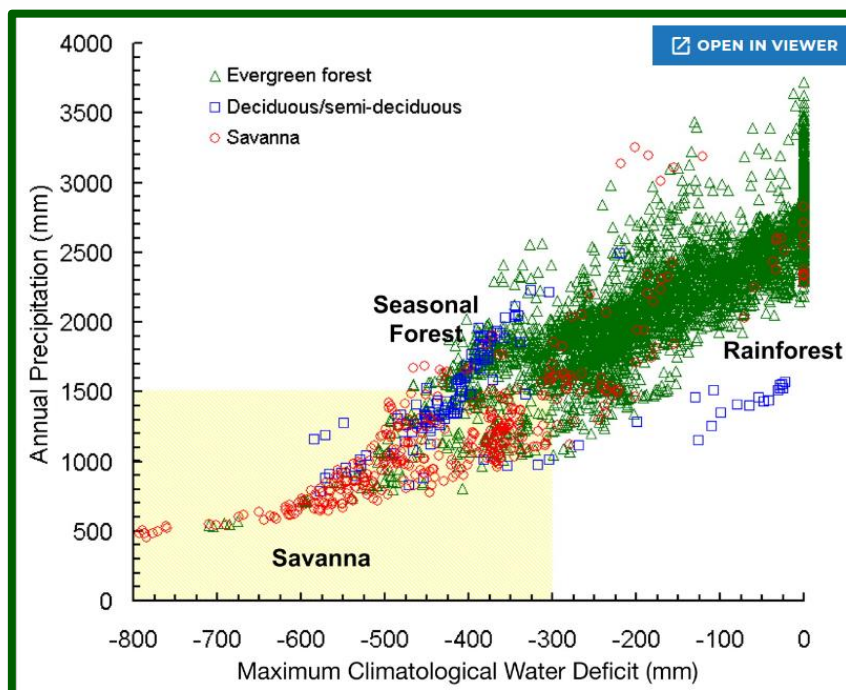


Figura 3. A relação entre o tipo de vegetação e o regime de chuvas. O regime de chuvas é derivado do TRMM para o período de 1998 a 2006. Nossa zona de savana sugerida está sombreada (MCWD < -300 mm, AP < 1500 mm). Fonte: Malhi et al. (2009).

O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6) avaliou a perda da floresta tropical como uma possível mudança abrupta que poderia ser irreversível por várias décadas (Canadell et al., 2021; Lee et al., 2021). O relatório afirma, com alta confiança, que a floresta amazônica, um dos maiores repositórios de biodiversidade e carbono do mundo, é altamente vulnerável à seca (Castellanos et al., 2023).

As mudanças na precipitação e na temperatura criam ciclos de feedback que podem acelerar a perda de florestas. Por exemplo, o desmatamento reduz a evapotranspiração, que, por sua vez, diminui a precipitação regional, criando um ciclo de secagem que ameaça ainda mais a estabilidade da floresta (Shukla et al., 1990; Nobre et al., 1991; Nobre et al., 2016). O prolongamento da estação seca é particularmente crítico. Estudos indicam que os padrões de precipitação da Amazônia estão se tornando cada vez mais sazonais, com períodos secos mais longos que estressam o ecossistema



florestal e aumentam a vulnerabilidade a incêndios e outros distúrbios (Fu et al., 2013; Costa et al., 2022). O aumento das temperaturas não apenas estressa diretamente a fisiologia das plantas, mas também exacerba as condições de seca ao aumentar as taxas de evaporação e reduzir a umidade do solo. Esses estresses combinados podem levar a floresta a ultrapassar os limites críticos mais rapidamente do que qualquer um dos fatores isoladamente (Cox et al., 2004; Duffy et al., 2015).

Harper et al. (2010) mostram como o acesso à umidade profunda do solo protege as árvores de períodos de seca sazonais, mas as secas de longo prazo causam uma mortalidade substancial. Essa mortalidade se deve principalmente à falha hidráulica, e não à redução da absorção de carbono ou da produtividade (Rowland et al., 2015; da Costa et al., 2018).

Vários estudos baseados em observações de satélite na América do Sul tropical identificam um limite crítico de precipitação entre 1.000 e 1.250 mm anuais para a distribuição da cobertura de árvores (Staver et al., 2011; Staal et al., 2020; Flores et al., 2024). Abaixo de 1.000 mm de precipitação anual, as florestas tornam-se raras e instáveis, enquanto entre 1.000 e 1.800 mm, a Amazônia apresenta dois estados estáveis de ecossistemas com alta e baixa cobertura de árvores. As florestas nessa faixa são mais vulneráveis ao colapso sob distúrbios graves em comparação com regiões com mais de 1.800 mm de precipitação anual (Flores et al., 2024). Os ecossistemas de planície de inundação, que cobrem 14% do bioma florestal, enfrentam um limite crítico de 1.500 mm de precipitação anual, sugerindo que podem ser os primeiros a entrar em colapso em um futuro mais seco.

No entanto, outros fatores podem causar distúrbios e antecipar um possível ponto de inflexão para a Amazônia. Por exemplo, se a duração da estação seca ultrapassar 8 meses, a floresta pode entrar em colapso com uma faixa de biestabilidade entre 5 e 8 meses. Nobre et al. (1991) também mostraram em um exercício de modelagem que a savanização seria atingida quando a estação seca chegasse a 6 meses devido ao alto desmatamento em todo o sul da Amazônia. Além disso, se o déficit hídrico acumulado máximo for inferior a - 350 mm, a floresta pode entrar em colapso e pode ser biestável entre - 350 e - 450 mm.

Para evitar transições de ecossistemas em escala local devido a distúrbios compostos, Flores et al. (2024) propuseram limites seguros

em condições de precipitação anual de 1.800 mm, na duração da estação seca de 5 meses e no déficit hídrico acumulado máximo de - 350 mm.

Compreender a interação entre as mudanças de precipitação e temperatura e seu impacto na floresta amazônica é fundamental para prever cenários futuros e desenvolver estratégias para mitigar esses impactos. Os complexos mecanismos de *feedback*, o papel fundamental da duração da estação seca e as graves consequências da seca prolongada ressaltam a necessidade urgente de uma ação climática abrangente.

iii) Incêndios

O fogo representa um grande distúrbio nos ecossistemas florestais que pode contribuir para o estabelecimento e a manutenção de biomas sazonais, mais secos e com menor densidade de carbono (Hirota et al., 2011; Staver et al., 2011). O fogo pode, portanto, ser um mecanismo que desencadeia a perda abrupta de florestas quando um limite climático é atingido, por exemplo, em partes da Amazônia onde a quantidade de chuva anual é inferior a 1.800 mm (Flores et al., 2024). As florestas de dossel fechado em zonas climáticas úmidas reduzem a ocorrência de incêndios, mas se o clima secar ou se a interferência humana direta fragmentar ou abrir o dossel, isso pode levar à secagem e ao aumento da vulnerabilidade a incêndios e à transição para florestas de baixa biomassa (Malhi et al., 2009). O aumento da atividade de incêndios impede o restabelecimento de árvores, mantendo assim o estado de dossel mais aberto (Druke et al., 2023). Dutra et al. (2022) quantificam como as tendências atuais de mudança climática (incluindo o prolongamento da estação seca) e o desmatamento humano levaram ao aumento da ocorrência de incêndios em um limite de floresta/desmatamento na Amazônia. Burton et al. (2021) mostraram como as mudanças futuras no risco de incêndio em toda a América do Sul aumentaram acentuadamente para níveis mais altos de mudança climática.

A área queimada (Lizundia-Loiola et al., 2020) e a duração da temporada de incêndios em toda a América do Sul (Jolly et al., 2015), embora isso também tenha sido associado a mudanças contínuas no uso da terra e não apenas às mudanças climáticas (Kelley et al., 2021).



Ainda há muita incerteza com relação aos processos que determinam a reversibilidade da perda de cobertura florestal. No entanto, evidências emergentes indicam que, à medida que mais modelos climáticos incorporam a atividade do fogo em suas simulações, os riscos de extinção da floresta amazônica aumentam (Parry et al., 2022). Essa é uma tarefa de modelagem difícil, uma vez que, em anos de seca severa, há menos raios que provocam incêndios, mas a maioria é de origem humana e criminosa. Por exemplo, mais de 95% dos incêndios foram causados pelo homem em 2023 e 2024.

iv) Variabilidade oceânica

A floresta amazônica recebe umidade do Oceano Atlântico tropical. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) traz chuvas, especialmente sobre o norte da bacia amazônica, principalmente durante o verão austral, quando a ZCIT se desloca para o sul. Essa mudança sazonal da ZCIT é fortemente controlada pelas temperaturas da superfície do Atlântico tropical. Portanto, a variabilidade interanual nas temperaturas da superfície do mar do Atlântico pode ter fortes efeitos sobre a precipitação anual na bacia amazônica. Paralelamente, outro elemento crucial do Sistema Terrestre, a Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC), é outro sistema biestável que pode afetar a estabilidade da Amazônia. Evidências de proxies paleoclimáticos e de modelos sugerem que provavelmente existe um segundo modo de circulação substancialmente mais fraco, além do modo forte atual. As mudanças entre esses modos alternativos podem ocorrer de forma relativamente abrupta (dentro de décadas) e afetar o clima global, com possíveis impactos sobre a estabilidade da floresta amazônica. A redução do AMOC passa por um estágio em que a temperatura sobre o oceano Atlântico Norte Tropical aumenta. Isso leva a secas na Amazônia, como está acontecendo cada vez mais (por exemplo, em 2005, 2010 e 2024).



A análise de modelagem feita por Nian et al. (2023) também mostra que um colapso da AMOC poderia estabilizar a floresta amazônica aumentando a precipitação e diminuindo a temperatura na maior parte da região. No entanto, evidências paleoecológicas empíricas de eventos passados de desaceleração e desligamento da AMOC (Akabane et al., 2024) sugerem que o aumento da estabilidade do sul da Amazônia provavelmente teria pouco efeito na região do “arco do desmatamento”, enquanto as florestas mais preservadas do norte da Amazônia poderiam se desestabilizar devido à redução das chuvas, aumentando assim o risco de um colapso em todo o bioma. Isso ocorre porque um colapso da AMOC tornaria o Atlântico Sul tropical mais quente e deslocaria a ZCIT para o sul. Assim, o colapso da AMOC, junto com o desmatamento no sul da Amazônia, poderia, em princípio, antecipar a extinção da Amazônia.

1.3. Cenários Potenciais de Mudança

i) Cenários do IPCC: Projeções climáticas

Em escala global, prevê-se que o clima continuará a aquecer à medida que o mundo continuar a emitir CO₂ e outros gases de efeito estufa. Quase todos os cenários projetam que o aquecimento chegará a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais na próxima década (IPCC/AR6 SYR). No entanto, o grau de aquecimento que excederá 1,5°C e a possibilidade de reduzir o aquecimento para 1,5 grau dependerão da atividade humana e das escolhas da sociedade.



O Sexto Relatório de Avaliação AR6 do IPCC (Lee et al., 2021) conclui que o aquecimento global provavelmente atingirá entre 1,6 e 2,4°C até a metade do século, dependendo do cenário de emissões. Sob emissões muito baixas (SSP1-1,9), o aquecimento poderia ser limitado a 1,4°C (com uma variação de 1,0 a 1,8°C) até o final do século, enquanto emissões muito altas (SSP5-8,5) poderiam resultar em um aquecimento de 4,4°C (com uma variação de 3,3 a 5,7°C). É importante ressaltar que já atingimos 1,55°C em 2024, e que em janeiro de 2025 atingimos 1,75°C.

Quase todas as áreas terrestres continuarão a se aquecer mais rapidamente do que a média global, embora as regiões tropicais possam se aquecer menos rapidamente do que as áreas terrestres de latitude média e alta. Os padrões de chuva variarão regional e sazonalmente, com algumas áreas ficando mais úmidas e outras mais secas. As projeções dos modelos climáticos mostram uma incerteza significativa nas mudanças das chuvas em nível global, mas continuam a sugerir uma redução da precipitação em grande parte do Brasil durante os meses de junho, julho e agosto nos cenários de baixa e alta emissão (Lee et al., 2021, Figura 4.13). Consequentemente, a extinção da floresta amazônica causada pelo clima continua sendo, portanto, um resultado plausível de baixa probabilidade, mas de alto impacto, quando se considera apenas a mudança climática como resultado do aquecimento global.

O Atlas AR6 do IPCC (Gutiérrez et al., 2021) fornece projeções climáticas regionais detalhadas, incluindo uma série de possíveis resultados para a região amazônica. Especificamente, o IPCC afirma que “é muito provável que a temperatura média anual aumente na América do Sul, com mudanças projetadas que variam de 1,0 a 6,0°C até o final do século XXI. O maior aquecimento é esperado na bacia amazônica e nos Andes centrais, especialmente durante as estações de transição seca e seca para úmida (inverno e primavera austral) (alta confiança)” (Blázquez e Nuñez, 2013a; Coppola et al., 2014; Pabón-Caicedo et al., 2020; Teichmann et al., 2021). Essas projeções estão sendo confirmadas por observações de toda a Amazônia desde 1980, mostrando que as partes central e sudeste do bioma já se aqueceram em até 2°C (Flores et al., 2024).

O conjunto de vários modelos do CMIP6 projeta que, em um cenário de altas emissões, a precipitação pode aumentar em mais de 10% em partes do sudeste e noroeste da América do Sul e diminuir na mesma

proporção no norte da América do Sul ao longo das estações (alta confiança, evidência robusta). No cenário de altas emissões, todas as regiões brasileiras provavelmente apresentarão maior variabilidade de precipitação no futuro, com períodos extremos secos e úmidos ocorrendo com mais frequência em escalas de tempo diárias e sazonais (confiança média) (Alves et al., 2021).

Jones et al. (2009) analisaram as mudanças na floresta amazônica em um único modelo e descobriram que a perda substancial de floresta pode estar comprometida décadas antes de se tornar observável, especialmente com o aquecimento global acima de 2°C. Pugh et al. (2018) descobriram que muitos modelos, mas não todos, constatarem uma perda comprometida de longo prazo da cobertura de árvores nos trópicos para níveis de aquecimento acima de 2°C, enquanto Munday et al. (no prelo) constatarem um risco de extinção inevitável da Amazônia a longo prazo, começando já com um aquecimento global de 1,4°C.

Isso enfatiza a necessidade de usar ferramentas analíticas conhecidas como sinais de alerta precoce para detectar a perda de resiliência da floresta tropical (Boulton et al., 2022). Além disso, Burton et al. (2021) mostram grandes aumentos no risco de incêndio e na área queimada em todos os cenários, com aumentos maiores para níveis mais altos de aquecimento. Cano et al. (2022) encontraram magnitudes semelhantes de perdas de biomassa sob altas emissões devido ao aumento de incêndios, projetando um declínio de 40% na biomassa até 2100. Seu modelo mostrou que o crescimento de grama em áreas queimadas facilitou a repetição da queima e prejudicou a recuperação da floresta.

ii) O Acordo de Paris está se esgotando

Considerando que a maioria das mudanças climáticas regionais é resultado do aquecimento global (Lee et al., 2021; Mathison et al., 2024), a melhor maneira de reduzir a ameaça induzida pelo clima à Floresta Amazônica é, sem dúvida, limitar a magnitude do aquecimento global. O Acordo de Paris tem como objetivo limitar o aquecimento a bem abaixo de 2°C ou até mesmo buscar esforços para atingir 1,5°C, em parte devido ao risco da chamada “mudança climática perigosa” se o mundo exceder esses níveis. A COP26 também indicou a necessidade de não exceder 1,5°C associada ao Relatório Especial do IPCC 2018, mostrando os riscos de se atingir 2°C.



O IPCC/AR6 (SYR) avaliou que o mundo atingirá 1,5°C de aquecimento acima dos níveis pré-industriais na próxima década, mas também mostrou que é possível interromper o aquecimento global até esse nível, ou abaixo dele, se o CO₂ puder ser removido da atmosfera. A relação quase linear entre o aquecimento global e as emissões cumulativas de CO₂ significa que quanto mais CO₂ emitimos, mais quente o planeta fica. Quando as emissões líquidas zero são atingidas, a temperatura global se estabiliza aproximadamente (MacDougall et al., 2020).

No entanto, podemos ir além dessa meta, e há várias técnicas que poderiam ser ampliadas para permitir a remoção em larga escala do CO₂ da atmosfera. Em cenários de emissões globalmente líquidas negativas, o mundo esfriaria novamente abaixo dos níveis almejados pelo Acordo de Paris. O IPCC avalia 220 GtCO₂ para cada aumento de 0,1°C na temperatura. Isso significa que, para cada remoção de 220 GtCO₂, a temperatura global será reduzida em 0,1°C.

Esse cenário de “superação” pode ser uma maneira viável de manter o aquecimento global em torno de 1,5°C até 2100, mas essa estratégia pode expor o mundo a riscos e impactos elevados durante o período de superação (Reisinger et al., no prelo). O risco e a magnitude dos impactos decorrentes da superação da temperatura nos principais ecossistemas florestais, como a floresta amazônica, não são bem quantificados e foram identificados como uma lacuna de conhecimento pelo relatório especial do IPCC sobre 1,5°C (Hoegh-Guldberg et al., 2018). Munday et al. (no prelo) descobriram que o risco de perda da floresta amazônica é maior em níveis mais altos de

aquecimento global, mas pode ser mitigado em cenários de superação que levam à redução das temperaturas globais para menos de 1,5°C. No entanto, é aceito que tanto a magnitude da superação quanto a duração da superação contribuem para riscos elevados aos principais ecossistemas vulneráveis.

Por exemplo, os impactos sofridos durante a superação podem não ser reversíveis. Se atingimos 1,5°C até agora, podemos chegar a 2,5°C até 2050 e isso desencadearia muitos pontos de inflexão além do ponto de inflexão amazônico e liberaria uma quantidade gigantesca de CO₂, fazendo com que a temperatura atingisse mais de 3°C até 2100. Os componentes do Sistema Terrestre que apresentam inércia significativa, como a absorção de calor do oceano, as camadas de gelo ou os ecossistemas florestais, podem estar comprometidos com mudanças por muitas décadas ou séculos e, se o *feedback* com o clima local for forte o suficiente, essas mudanças podem ter se transformado em estados estáveis alternativos e ser realmente irreversíveis. Para componentes com dinâmica de escala de tempo mais longa do que a duração da superação, um limite climático pode ser temporariamente excedido sem necessariamente desencadear o ponto de inflexão (Ritchie et al., 2021), mas isso também envolve muitas incertezas.

O que está claro é que a rápida redução das emissões e o foco subsequente em limitar os níveis de aquecimento o mais baixo possível é a primeira estratégia fundamental para reduzir o risco de perda irreversível da floresta amazônica.

1.4. Observações: A Amazônia já está em Transformação

i) Mudanças de longo prazo na dinâmica florestal (produtividade, mortalidade, demografia geral, mudanças na composição de espécies)

Desde o final do século passado, a Amazônia vem passando por um processo de intensificação do seu ciclo hidrológico. De 1990 até hoje, foi observado um aumento significativo na precipitação anual da região e, conseqüentemente, na descarga de água do rio Amazonas em Óbidos, uma cidade no estado do Pará, Brasil, onde está localizada a confluência dos maiores rios da bacia (Gloor et al., 2013).

A precipitação amazônica aumentou na parte oeste da Bacia e diminuiu nas partes sul e norte (Marengo et al., 2022; Flores et al., 2024). Além



disso, a região tem se tornado mais quente, com estações secas mais longas (Marengo et al., 2022; Flores et al., 2024), e tem experimentado extremos hidrológicos e climáticos frequentes. Inundações e secas severas, que antes ocorriam raramente, agora são comuns e frequentes (Costa et al., 2021). A Amazônia sofreu grandes inundações em 2009, 2013, 2014, 2017 e 2021. Esses eventos foram alternados por eventos de seca extrema em 2005, 2010, 2015-16 e 2023. Essa intensificação do ciclo hidrológico também aumentou a amplitude entre esses extremos (Gloor et al., 2015).

Além disso, áreas florestais relativamente mais remotas, longe das fronteiras de desmatamento, estão sofrendo mudanças. As observações de parcelas de inventário florestal em toda a bacia mostram que, desde a década de 1970, as taxas de renovação das árvores e a produtividade florestal têm aumentado (Baker et al., 2004; Phillips et al., 2004). Embora a Amazônia tenha sido um sumidouro de carbono global significativo de cerca de 0,42 a 0,65 Pg C yr⁻¹ durante o período de 1990-2007 (Pan et al., 2011), recentemente, o sequestro de carbono está perdendo força.

Nos últimos 30 anos, o balanço de carbono da Amazônia mostrou uma tendência decrescente de longo prazo de acumulação de biomassa, na qual as taxas de aumento líquido na acumulação de biomassa diminuíram em 30%, perdendo, portanto, sua capacidade de remover carbono da atmosfera (Brienen et al., 2015). Isso resulta de um nivelamento da produtividade florestal nas últimas décadas e de uma tendência consistente de aumento da mortalidade das árvores, o que está em desacordo com as projeções de modelagem que preveem que a Amazônia seria um sumidouro de carbono no século 21 devido ao efeito de fertilização do CO₂ (Huntingford et al., 2013).

A composição das espécies de árvores também está mudando, com uma tendência lenta para mais espécies de árvores afiliadas à seca e aumento da mortalidade em árvores afiliadas à umidade (Esquivel-Muelbert et al., 2019). Os motivos mais prováveis para essa incompatibilidade entre modelos e observações são: (1) a fertilização com CO₂ está provocando uma mudança na composição das árvores para espécies de crescimento rápido com vida útil curta, (2) distúrbios relacionados ao clima, como queda de vento e secas extremas, ou (3) degradação florestal provocada pelo homem por meio de atividades como extração de madeira e incêndios (Flores et al., 2024).



Algumas regiões, como o sul e o sudeste da Amazônia, na região do arco do desmatamento, podem já sofrer degradação induzida pelo clima. Gatti et al. (2021; 2023) relatam que as florestas dessa região já estão atuando como fonte de carbono para a atmosfera e já estão sofrendo aumentos significativos de temperatura e redução de chuvas. Além das forças climáticas, a Amazônia está sofrendo forte pressão humana, seja por meio de processos de desmatamento ou de degradação das florestas remanescentes. Lapola et al. (2023) estimam que 38% da área florestal remanescente na Amazônia já está degradada por processos como exploração madeireira, exposição a secas extremas, incêndios e efeito de borda.

Os efeitos compostos da degradação, do desmatamento e da mudança no uso da terra, combinados com as mudanças no ciclo hidrológico e o aumento das temperaturas associadas às mudanças climáticas em curso, podem levar a uma degradação sem precedentes das florestas da região, aumentando o risco de um ponto de inflexão em grande escala (Flores et al., 2024).

ii) Balanço de carbono

O aumento do CO₂ atmosférico pode aumentar a produtividade florestal e o sequestro de carbono, e os Modelos do Sistema Terrestre (ESMs) projetam os maiores sumidouros de carbono impulsionados pelo CO₂ nas florestas tropicais (Canadell et al., 2021; Friedlingstein et al., 2023). As evidências observacionais apoiam um grande sumidouro de carbono de florestas tropicais, embora a força do sumidouro possa ser confundida pelo histórico de distúrbios florestais anteriores

(Chambers et al., 2013) e as elevadas taxas de mortalidade florestal nas últimas duas décadas tenham levado ao declínio dos sumidouros de carbono da floresta amazônica (Brienen et al., 2015; Hubau et al., 2020).

Secas mais quentes e mais intensas podem levar a um estresse elevado e a taxas mais altas de mortalidade de árvores, além de maiores emissões totais de carbono em escala de ecossistema e espera-se que esses chamados feedbacks carbono-clima se fortaleçam à medida que o clima da Terra continua a aquecer. Um aumento na área total desmatada da Amazônia também pode levar a uma redução na reciclagem da precipitação e a uma menor precipitação geral em escala de bacia e essa mudança no clima, impulsionada pelo uso da terra, também pode causar estresse na vegetação e maiores taxas de mortalidade à medida que os climas regionais se tornam mais secos (Shukla et al., 1990; Nobre et al., 1991; Nobre et al., 2016; Marengo et al., 2018). Medições aéreas e por satélite do CO₂ atmosférico revelam feedbacks carbono-clima reforçados em anos anormalmente secos, levando a grandes reduções nos sumidouros de carbono da floresta amazônica (Gatti et al., 2014; Liu et al., 2017).

O cruzamento dos limiares do ponto de inflexão da intensidade da seca e da área total desmatada pode empurrar o equilíbrio dos sumidouros de fertilização de CO₂ e das fontes de feedback carbono-climático, com possíveis mudanças das florestas amazônicas em cenários extremos, de sumidouros globais de carbono para fontes de carbono.

iii) Dinâmica fluvial, secas e inundações

A bacia amazônica, que abriga o maior sistema fluvial do mundo, está passando por mudanças significativas na dinâmica dos rios, secas e inundações devido às mudanças climáticas e às atividades antropogênicas. Essas mudanças estão causando impactos profundos na hidrologia, nos ecossistemas e nas populações humanas da região.

O regime de vazão do rio Amazonas é altamente sensível a variações nos padrões de precipitação e temperatura. Estudos mostraram que a vazão do Amazonas tem aumentado nas últimas décadas, provavelmente devido ao aumento da temperatura e às mudanças na distribuição das chuvas (Gloor et al., 2013). Esse aumento da descarga pode aumentar o transporte de sedimentos e alterar a morfologia do rio, afetando os habitats de espécies aquáticas e ribeirinhas (Dunne et al., 1998).



As mudanças no uso da terra, especialmente o desmatamento, também influenciaram a dinâmica dos rios. O desmatamento reduz a evapotranspiração, levando a um escoamento mais elevado e ao aumento dos fluxos dos rios durante a estação úmida (Coe et al., 2009). Por outro lado, a estação seca pode apresentar fluxos reduzidos devido à diminuição da recarga de água subterrânea, alterando potencialmente o tempo e a magnitude da descarga do rio.

A frequência e a intensidade das secas na Amazônia têm aumentado, com secas severas registradas em 2005, 2010 e 2015-2016 (Marengo et al., 2018), bem como a mais poderosa em 2023-2024. Essas secas foram associadas a temperaturas anômalas da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico, que perturbam os padrões climáticos normais e reduzem as chuvas na bacia (Espinoza et al., 2011). No entanto, a recente seca de 2023/2024 foi associada principalmente à mudança climática e não ao El Niño (Clarke et al., 2024). O El Niño reduziu a precipitação em aproximadamente a mesma quantidade que a mudança climática. Mas a forte tendência de secagem deveu-se quase que inteiramente ao aumento das temperaturas globais, de modo que a gravidade da seca de 2023-2024 que está ocorrendo é em grande parte causada pelas mudanças climáticas. Devido às mudanças climáticas, a probabilidade de ocorrência da seca meteorológica aumentou em um fator de 10 e a seca agrícola em 30.

As secas têm impactos ecológicos e socioeconômicos significativos. Elas podem levar à redução dos níveis de água em rios e lagos, afetando o abastecimento de água para as comunidades e indústrias locais. A



redução dos níveis de água também afeta as populações de peixes e outras formas de vida aquática, levando à diminuição da biodiversidade (Castello et al., 2013). Além disso, as secas aumentam a vulnerabilidade das florestas aos incêndios, que podem causar danos extensos à vegetação e liberar grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera (Aragão et al., 2018).

Embora as secas representem um conjunto de desafios, a Amazônia também está passando por inundações mais frequentes e graves. Essas inundações são frequentemente causadas por eventos extremos de chuva, que estão se tornando mais comuns devido às mudanças climáticas (Gloor et al., 2015). Grandes inundações foram registradas em 2009, 2012 e 2014, causando transtornos generalizados às comunidades e aos ecossistemas. Na verdade, as inundações recorde ocorreram em 2021 devido ao La Niña longo e recorde durante os anos de 2020, 2021 e 2022.

As inundações na Amazônia podem ter efeitos benéficos e prejudiciais. Do lado positivo, as inundações sazonais são essenciais para a deposição de nutrientes e a manutenção da produtividade das florestas de várzea e das áreas úmidas (Junk et al., 2011). No entanto, as inundações extremas podem destruir a infraestrutura, deslocar comunidades e causar a perda de vidas. Elas também podem interromper as atividades agrícolas, levando à insegurança alimentar e a perdas econômicas (Marengo & Espinoza, 2016).

A interação entre secas e inundações cria uma dinâmica complexa na bacia amazônica e contribui para moldar a resiliência do ecossistema (Mattos et al., 2023). Por exemplo, secas prolongadas podem ser seguidas por estações de chuvas intensas, levando a eventos extremos de inundação. Essa variabilidade apresenta desafios significativos para a gestão de recursos hídricos e exige estratégias adaptativas para mitigar os impactos nos sistemas humanos e ecológicos (Siqueira Júnior et al., 2015).

As mudanças observadas na dinâmica dos rios, secas e inundações na bacia amazônica destacam a vulnerabilidade da região às mudanças climáticas e às pressões antropogênicas. Para enfrentar esses desafios, são necessárias abordagens integradas que considerem a interconexão dos sistemas hidrológicos, ecológicos e humanos. A pesquisa e o monitoramento contínuos são essenciais para melhorar

nossa compreensão desses processos e para desenvolver estratégias eficazes de adaptação e mitigação.

iv) Temperatura e precipitação

A bacia amazônica tem registrado um aumento notável nas temperaturas médias nas últimas décadas. Estudos indicam que a região aqueceu aproximadamente 0,6°C a 0,7°C desde meados do século 20 (Marengo et al., 2011). Espera-se que essa tendência de aquecimento continue, com projeções que sugerem um aumento de 1,5°C a 3,5°C até 2050 em cenários de emissões moderadas a altas (IPCC, 2021).

As temperaturas mais altas têm vários impactos sobre o ecossistema amazônico. O aumento do calor pode estressar a fisiologia das plantas, reduzir as taxas de fotossíntese e alterar a distribuição das espécies. As temperaturas mais altas também aumentam as taxas de evaporação, levando à redução da umidade do solo e ao aumento do estresse hídrico para a vegetação (Malhi et al., 2008). Além disso, as temperaturas mais altas contribuem para a frequência e a intensidade das ondas de calor, o que pode estressar ainda mais as espécies vegetais e animais.

A precipitação na bacia amazônica é caracterizada por alta variabilidade, tanto espacial quanto temporal. A região recebe uma média de 2.300 mm de precipitação por ano, mas isso pode variar de 1.500 mm no leste a mais de 3.000 mm no oeste (Espinoza et al., 2009). Entretanto, observações recentes e modelos climáticos indicam mudanças significativas nesses padrões.

Vários estudos documentaram um declínio na precipitação da estação úmida e um aumento na duração e intensidade das estações secas (Gloor et al., 2013; Marengo et al., 2018). As secas severas de 2005, 2010, 2015-2016 e 2023-2024 são indicativas dessas mudanças, com algumas regiões registrando uma redução de até 30% nas chuvas durante os anos de seca (Aragão et al., 2018). Essas mudanças estão ligadas às temperaturas anômalas da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico, que interrompem os padrões climáticos normais que trazem umidade para a Amazônia (Marengo et al., 2018).

As mudanças na temperatura e na precipitação estão afetando profundamente o ciclo hidrológico da Amazônia. A redução das chuvas

durante a estação seca leva a níveis mais baixos dos rios e à diminuição da recarga de água subterrânea. Isso pode afetar a disponibilidade de água tanto para os ecossistemas quanto para as populações humanas, afetando a agricultura, a geração de energia hidrelétrica e o abastecimento de água potável (Coe et al., 2009).

Por outro lado, o aumento da intensidade das chuvas na estação úmida pode levar a inundações mais frequentes e graves, o que pode perturbar os ecossistemas, danificar a infraestrutura e deslocar as comunidades. As inundações também podem causar erosão do solo e lixiviação de nutrientes, afetando a produtividade agrícola e a saúde das florestas (Junk et al., 2011; Flores et al., 2020).

As mudanças na temperatura e na precipitação têm efeitos em cascata sobre a biodiversidade da Amazônia. Estações secas prolongadas e temperaturas mais altas aumentam o risco de incêndios florestais, que podem causar desmatamento em larga escala e emissões de carbono. Esses incêndios também podem destruir habitats, levando à perda de biodiversidade (Aragão et al., 2018). Além disso, as mudanças nos padrões de precipitação podem alterar a distribuição de espécies vegetais e animais, pois algumas podem não conseguir se adaptar às novas condições.

A floresta amazônica desempenha um papel fundamental na regulação do clima global por meio do sequestro de carbono e do ciclo da água. Mudanças na temperatura e na precipitação podem reduzir a capacidade da floresta de sequestrar carbono, transformando-a de um sumidouro de carbono em uma fonte de carbono (Gatti et al., 2021; 2023). Isso tem implicações significativas para a mudança climática global, pois a liberação do carbono armazenado na atmosfera pode acelerar o aquecimento.

Além disso, a alteração do ciclo da água pode afetar os padrões de circulação atmosférica, podendo impactar os sistemas climáticos muito além da bacia amazônica (Marengo et al., 2011). A redução da reciclagem de umidade devido ao desmatamento e às mudanças climáticas pode levar a um ressecamento ainda maior, criando um ciclo de feedback que exacerba os impactos das mudanças climáticas.



2

**POR QUE
ISSO É
IMPORTANTE?**

**POR QUE
ISSO É
IMPORTANTE?**

2. POR QUE ISSO É IMPORTANTE?

2.1. *Feedback* da Amazônia às Mudanças Climáticas Globais: Perspectivas Locais, Regionais e Globais

A Amazônia pode retroalimentar as mudanças climáticas por meio de processos em escala local, regional e global, incluindo CO₂, balanço de calor, suprimento de umidade e aerossóis.

As trocas de dióxido de carbono com a atmosfera podem afetar a floresta e são afetadas pela floresta. A floresta amazônica é um grande depósito de carbono terrestre tanto na biomassa viva quanto na matéria orgânica do solo (aproximadamente 120 PgC e 160 PgC, respectivamente, Gloor et al., 2012). Qualquer redução no sumidouro de carbono da floresta, portanto, retroalimenta a ampliação da mudança climática global (por exemplo, Cox et al., 2000). Da mesma forma, o fechamento dos estômatos devido ao CO₂ elevado reduz a evaporação e, portanto, a umidade fica disponível para a chuva.

Essa resposta regional de secagem do clima ao CO₂ elevado por meio do fechamento dos estômatos é diferente de outras florestas tropicais e leva a uma maior vulnerabilidade da floresta amazônica (Skinner et al., 2017; Sampaio et al., 2020). Esse efeito fisiológico também gera mudanças na umidade do solo, no fluxo dos rios (Gedney et al., 2006; Betts et al., 2007) e na temperatura da superfície (Kimm et al., 2024).

Em escalas regionais, o *feedback* floresta-precipitação proporciona um forte processo de estabilização, ajudando a manter os níveis anuais de precipitação e reduzindo sua variabilidade sazonal e interanual (Stall et al., 2020).

No entanto, esse *feedback* também significa que as reduções na floresta podem amplificar a perda florestal por meio de *feedbacks* positivos – ou seja, a perda de cobertura de árvores devido ao desmatamento pode causar redução das chuvas (Costa & Pires, 2009). Shukla et al. (1990) e Nobre et al. (1991) demonstraram pela primeira vez o risco de reduções induzidas pelo desmatamento na precipitação em escala da bacia amazônica por meio do *feedback* transpiração-precipitação e da reciclagem da precipitação. As mudanças na superfície da terra decorrentes do desmatamento e da exploração madeireira afetam o ciclo da umidade e as mudanças do desmatamento em pequena escala para o desmatamento em grande

escala também podem modificar os mecanismos e os padrões da precipitação regional (Khanna et al., 2017). A vegetação pode afetar as quantidades de chuva por meio de mudanças na troca de umidade e energia na superfície (Spracklen et al., 2012). A redução da cobertura florestal pode levar à diminuição da evapotranspiração e, conseqüentemente, da umidade atmosférica e da precipitação (Aragão, 2012). O desmatamento em larga escala pode, portanto, causar redução da precipitação regional.

As florestas podem afetar a composição atmosférica local de várias maneiras. As emissões diretas de aerossóis e gases residuais, como o metano, resultam da queima. As emissões da queima de biomassa são uma grande fonte de aerossóis sobre a Amazônia e podem afetar a precipitação regional quando atuam como núcleos de condensação de nuvens. As florestas também produzem precursores de aerossóis, como o isopreno e outros BVOCs, que afetam a qualidade do ar local e levam à formação de aerossóis orgânicos secundários, que, por sua vez, podem afetar a precipitação e o balanço de energia da superfície (Figura 4).

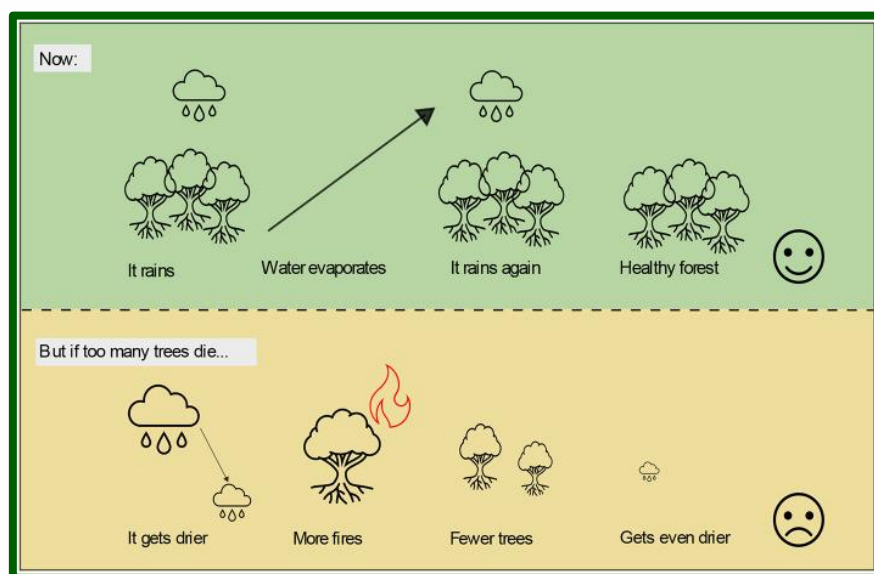


Figura 4. Os *feedbacks* positivos (autorreforçados) com a floresta são fundamentais para manter a resiliência da Amazônia. Agora, por meio da evapotranspiração, as florestas saudáveis bombeiam umidade e aerossóis para a atmosfera, contribuindo para a formação de nuvens que são transportadas a favor do vento (do oceano Atlântico para os Andes). À medida que essas nuvens precipitam, aumentando a quantidade e a estabilidade das chuvas nas partes central e ocidental do bioma amazônico, o sistema permanece resistente às mudanças climáticas. Mas se muitas árvores morrerem, por exemplo, devido a eventos de seca extrema ou



desmatamento, menos umidade será transportada pela Amazônia, causando mais mortalidade de árvores e aumentando a inflamabilidade do ecossistema. Esse *feedback* positivo da degradação florestal pode acelerar um ponto de inflexão em grande escala do sistema amazônico. Figura reproduzida de Palazzo Corner & Jones (2021).

2.2. Funcionamento do Ecossistema e Biodiversidade

A produtividade primária na bacia amazônica é alta, com pequenas variações sazonais (Aragão et al., 2009). Isso constitui uma diferença marcante em relação a todos os outros tipos de bioma, que mostram um forte declínio na produtividade durante o inverno ou nas estações secas. Nos trópicos, o clima quente e úmido favorece a troca de grandes quantidades de água e carbono entre a biosfera e a atmosfera. Ainda assim, a magnitude desses fluxos é sensível a variações interanuais no clima e, mais importante, a eventos extremos. Essa variabilidade significa que as condições ambientais exercem forte influência sobre os processos biogeoquímicos envolvidos.

À medida que o aquecimento global ocorre gradualmente e associado ao aumento das concentrações atmosféricas de CO₂, a floresta amazônica está sendo empurrada para fora de seu estado anterior de equilíbrio dinâmico (Malhi et al., 2014, Lapola et al., 2023). Enquanto as concentrações atmosféricas mais altas de CO₂ facilitam a absorção de carbono pelas plantas, associadas a um custo menor de água em termos de transpiração, as temperaturas ambientes mais altas se traduzem em uma demanda maior de vapor de água pela atmosfera. O equilíbrio resultante entre esses dois fatores contrastantes da produtividade primária e suas consequências para a Amazônia ainda está sendo investigado.

Além disso, as altas taxas de produtividade primária observadas nas florestas tropicais são, em parte, responsáveis pela manutenção da alta diversidade de espécies nessas regiões. Em um ciclo de feedback positivo, a maior disponibilidade de recursos favorece o acúmulo de espécies em escalas de tempo evolutivas, que são capazes de explorar mais plenamente os recursos devido à sua maior diversidade de estratégias ecológicas. Essa diversidade de estratégias desenvolvidas pelas plantas para competir por recursos (luz, carbono, nutrientes e água) permite a coexistência de espécies nessas comunidades hiperdiversas.

Atualmente, a perda de habitat por meio de mudanças no uso da terra, principalmente na forma de desmatamento, é a maior ameaça à biodiversidade amazônica (Vieira et al., 2008). No entanto, o aumento da temperatura ambiente, as ondas de calor mais frequentes, a diminuição da precipitação, o aumento da duração da estação seca e o aumento da frequência de secas extremas estão se tornando mais ameaçadores para a biodiversidade do que a perda de habitat. A tolerância das espécies (não apenas das plantas) determina seu desempenho (Cheng et al., 2013) em um ambiente mais quente. Além da temperatura ideal, qualquer processo (por exemplo, fotossíntese) apresentará um declínio nas taxas. Considerando o componente vegetal da Amazônia, isso se estende até o nível do ecossistema como produtividade primária reduzida. Por outro lado, as mudanças na disponibilidade de água também levaram ao declínio da produtividade primária, mas também são importantes, pois causam o aumento das taxas de mortalidade das árvores. Considerando que as árvores têm uma longa vida útil e podem levar décadas para atingir os estágios reprodutivos, o aumento da mortalidade pode causar mudanças rápidas na composição das espécies nas comunidades florestais. A rotatividade acelerada das árvores geralmente favorece espécies de crescimento rápido, como pioneiras e lianas, que são menos eficazes como estoques de carbono.

Portanto, a interação entre biodiversidade e produtividade primária na Amazônia está sujeita a mudanças climáticas, com perda de espécies e redução da produtividade primária em cenários de ambiente mais quente e seco.

2.3. Impactos nos Ecossistemas e Trajetórias de Transição (do Local ao Global)

i) Segurança hídrica e alimentar e produção de energia

A floresta amazônica é crucial para a manutenção do equilíbrio ecológico, fornecendo uma ampla gama de serviços ecossistêmicos que podem ser categorizados em quatro tipos principais: serviços de abastecimento, regulação, culturais e de apoio (TEEB, 2010). Os serviços de provisão incluem a gama diversificada de recursos que a floresta tropical fornece, como madeira, alimentos e plantas medicinais. Os serviços de regulação referem-se à capacidade da floresta tropical de estabilizar o clima por meio do armazenamento de

carbono, contribuindo assim para mitigar os efeitos da mudança climática.

A floresta amazônica desempenha um papel fundamental na regulação da água, influenciando o padrão de chuvas local e regional, o que é essencial para os ecossistemas terrestres e aquáticos. Além disso, a produção agrícola no Brasil e na América do Sul é altamente dependente das chuvas derivadas do funcionamento dinâmico e ecológico da Amazônia. Considerando a tendência atual de impactos antropogênicos diretos (fogo, desmatamento, extração seletiva de madeira) e mudanças climáticas (secas extremas), que levam à degradação de fragmentos importantes de floresta, os serviços hidrológicos da Amazônia tendem a se degradar, colocando em risco as comunidades locais, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, mas também a produção agrícola (Leite-Filho et al., 2021). A redução das chuvas em áreas críticas de produção agrícola no Brasil pode levar a perdas significativas de rendimento, aumentando os preços globais dos alimentos e afetando a segurança alimentar (Brando et al., 2020).



Em trabalho recente, Mattos et al. (2024) argumentaram que a renda econômica do setor agrícola nos estados que mais se beneficiam dessas chuvas totalizou R\$ 338 bilhões em 2021 – cerca de 57% da renda agrícola nacional. Os autores ressaltaram que as Terras Indígenas da Amazônia influenciam as chuvas que abastecem 80% da área de atividades agrícolas no país. O desmatamento e a degradação das florestas nas Terras Indígenas causam a redução dessas chuvas e, portanto, representam sérios riscos à segurança hídrica, alimentar, energética e econômica do país.

Além disso, os pequenos agricultores que, em geral, não têm acesso a tecnologias avançadas (variedades de plantas resistentes à água, sistemas de irrigação, etc.), são particularmente vulneráveis a mudanças nos padrões de chuva, o que leva à diminuição da produção agrícola, ameaçando tanto seu suprimento de alimentos quanto sua renda (Assad et al., 2013; Lapola et al., 2018).

Assim, a conservação dessas florestas é fundamental não apenas para garantir a segurança hídrica e alimentar do país, mas também para a cadeia produtiva do agronegócio e, portanto, para a produção econômica de uma parcela significativa da economia nacional (Mattos et al., 2024).

As mudanças no regime de chuvas, influenciadas pela degradação da Amazônia, podem levar a impactos além das fronteiras do Brasil, afetando países vizinhos como Bolívia, Paraguai e Argentina.

A geração de energia hidrelétrica também depende muito de padrões estáveis de precipitação e fluxos de água dos rios. De acordo com um estudo publicado recentemente pela Climate Policy Initiative/PUC-RIO e pela Amazon 2030 (<https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/cutting-down-the-hydropower-plants-how-the-amazon-deforestation-is-jeopardizing-electricity-generation-in-brazil/>), “o desmatamento na floresta amazônica poderia reduzir a capacidade de geração de energia do Brasil e a rentabilidade do setor elétrico em até 10%, afetando até mesmo as usinas hidrelétricas (UHEs) localizadas a milhares de quilômetros de distância do bioma amazônico”. O estudo destaca que 85% das maiores usinas hidrelétricas do Brasil estão sob a influência dos vapores de água provenientes da bacia amazônica.

ii) Impactos na saúde

As mudanças ambientais decorrentes do desmatamento, como o aumento da frequência de incêndios florestais e ondas de calor, representam riscos significativos à saúde das pessoas e comunidades que vivem na região, mas também remotamente devido ao transporte de partículas e aerossóis para a região sul do Brasil e outros países da América do Sul. Esses riscos incluem problemas respiratórios decorrentes da poluição do ar e maior vulnerabilidade a doenças

transmitidas por vetores, por exemplo, a malária (www.adaptabrasil.mcti.gov.br).

O aumento das temperaturas resultante da perda de florestas também aumenta os riscos de doenças relacionadas ao calor, principalmente para as populações vulneráveis. Os eventos severos de seca e inundação registrados nas últimas décadas afetam desproporcionalmente as comunidades indígenas, ribeirinhas e a população urbana (Hacon et al., 2024). Esses eventos aumentam o risco de doenças transmitidas por água, alimentos e vetores, desnutrição, lesões traumáticas, exposições químicas, doenças cardiovasculares e respiratórias, transtornos de saúde mental e o aumento da mortalidade (Papastefanou et al., 2022; Salvador et al., 2023).

As enchentes levam a doenças dermatológicas devido a traumas físicos, água estagnada, exposição a poluentes, toxinas de águas residuais, doenças infecciosas e saneamento inadequado. O maior risco de infecção de feridas e transmissão de doenças ocorre durante a fase pós-impacto (Parker & Goodman, 2022). Crianças, mulheres grávidas e idosos são os grupos mais vulneráveis afetados por enchentes e secas (Langil & Abizaid, 2020).

A crise climática ameaça a saúde humana não apenas no território brasileiro, mas também na Pan-Amazônia, afetando todos os países e suas fronteiras. Os impactos na saúde variam de acordo com o tamanho da população, a densidade, a localização, o tempo, a frequência da exposição, as condições socioeconômicas, as vulnerabilidades locais, como o acesso aos serviços de saúde e as vulnerabilidades dos indivíduos, como a comorbidade.

A região sofre uma carga tripla de mudanças climáticas, perda de biodiversidade e poluição do ecossistema, marcada por desigualdades socioeconômicas, falta de acesso a comodidades básicas, violência e dificuldades na implementação de políticas públicas (Simpson, 2024). As comunidades urbanas sofrem com a insegurança socioeconômica, a crise climática e as condições sanitárias precárias, enquanto as populações rurais e remotas enfrentam serviços de saúde inadequados, falta de logística e infraestrutura.



As comunidades indígenas são particularmente vulneráveis devido à sua dependência de recursos florestais e exposição a essas mudanças ambientais; problemas imunológicos, alta exposição a eventos climáticos extremos, pobreza de renda e baixos níveis de educação (Parry et al., 2018, Ellwanger et al., 2020; Hacon et al., 2024). A Amazônia é uma reserva significativa de arbovírus, com possíveis impactos na saúde global. As mudanças climáticas, a perda de biodiversidade e as mudanças no uso da terra aumentaram a vulnerabilidade social e ambiental, perturbaram os ecossistemas e aumentaram os riscos de transmissão de patógenos (Ellwanger et al., 2020; Vale et al., 2021; Winck et al., 2022).

A previsão de futuras epidemias na Amazônia é um desafio devido à complexa interação de fatores ecológicos e socioeconômicos. As atividades humanas criaram paisagens fragmentadas onde populações de animais de alta densidade em ecossistemas degradados são propensas a epidemias (Wegner et al., 2022). O desmatamento, as indústrias extrativistas, a perda de biodiversidade, a construção de estradas, a destruição de habitats, o comércio, a caça e os incêndios florestais, combinados com as mudanças climáticas, contribuíram para esse aumento do risco, sugerindo que os eventos de transbordamento podem se tornar mais frequentes. Exemplos de Doenças Infecciosas Emergentes (EID) incluem a Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS), a Síndrome Pulmonar por Hantavírus (HPS), a gripe aviária altamente patogênica H5N1, o vírus da gripe H1N1 e o HIV (Faria et al., 2014; Worobey et al., 2016; Gryseels et al., 2021).

A degradação ambiental representa riscos significativos à saúde na Amazônia, como o aumento de incêndios florestais que liberam poluentes que causam doenças respiratórias e cardiovasculares (Requia et al., 2021; Romero et al., 2023), a mudança nos padrões de precipitação que afetam a disponibilidade e a qualidade da água e o aumento de doenças transmitidas por vetores, como febre amarela, dengue, malária, febre de Mayaro e Oropouche (Uhart et al., 2012). Os impactos das mudanças climáticas são fortemente influenciados pelas vulnerabilidades sociais e pela capacidade de adaptação, exigindo respostas oportunas e adequadas aos riscos climáticos de início rápido e lento (Lowe et al., 2020; Winck et al., 2022).

A governança fraca, as políticas limitadas de gestão de riscos de desastres e a adaptação climática inadequada e limitada, combinadas com as desigualdades sociais, os altos níveis de pobreza, o emprego



informal e as lacunas nos sistemas de saúde, contribuem para os impactos devastadores das mudanças climáticas sobre a saúde (CEPAL, 2022). Esses impactos perturbam a vida cotidiana, afetando a saúde, o bem-estar, o desenvolvimento social e o capital humano. Na Amazônia brasileira, a atenção primária é o tipo de unidade de saúde mais presente e o principal ponto de acesso do Sistema Único de Saúde na região, o que a torna uma estratégia essencial para enfrentar as desigualdades regionais e superar esses obstáculos (Hacon et al., 2024).

No entanto, é sabido que o setor de saúde não é capaz de combater sozinho as forças motrizes e suas pressões sobre a saúde. Portanto, o que precisamos para trabalhar melhor é a forma de trabalhar em conjunto e a conectividade. É essencial estabelecer sinergias intersetoriais entre as agendas institucionais, permitindo que o governo, as instituições de pesquisa e as agências de monitoramento colaborem em uma rede eficaz.

Além disso, a segurança alimentar na Amazônia está ameaçada por um ponto de inflexão e exacerbada pela sinergia da agricultura de monocultura, propriedade concentrada da terra, uso intenso de pesticidas, desmatamento, perda de biodiversidade, eventos climáticos extremos, dietas não saudáveis e perda de práticas alimentares tradicionais, especialmente aquelas praticadas por comunidades tradicionais, os grupos mais vulneráveis que enfrentam impactos desproporcionais (IPCC, 2022; Hacon et al., 2024). Os povos indígenas enfrentam desafios nutricionais significativos, como altas taxas de desnutrição, anemia e atraso no crescimento entre crianças e populações maternas (Segoviano-Lorenzo et al., 2022; Santos da Silva et al., 2023).

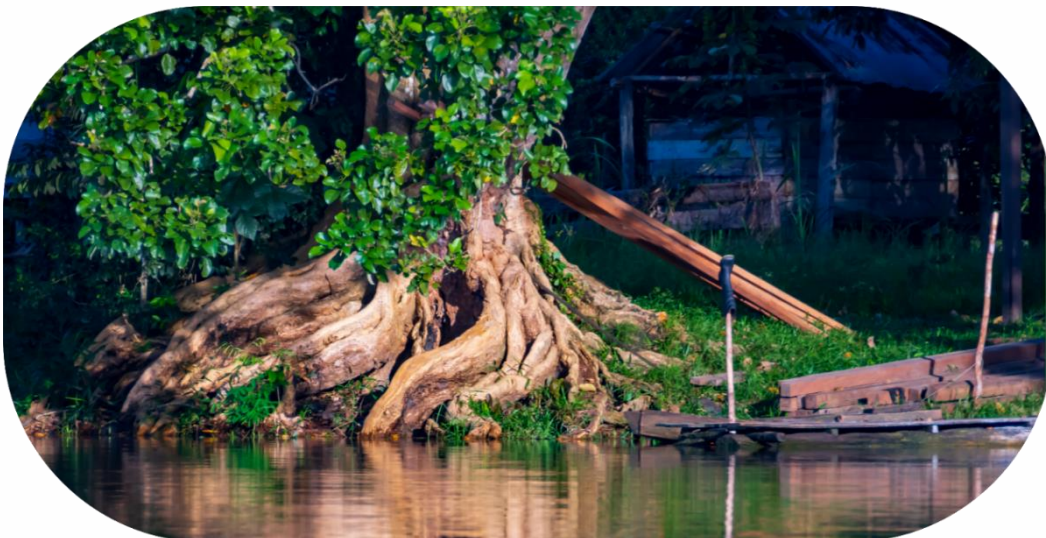
iii) Impactos no ecossistema

Décadas de pesquisa de campo revelaram muitas maneiras pelas quais os ecossistemas da Amazônia podem responder a distúrbios. Apesar da heterogeneidade relacionada a fatores biogeográficos e ambientais, bem como a históricos de distúrbios (Jakovac et al., 2022; Lapola et al., 2023), foram identificadas três trajetórias de ecossistema mais plausíveis para as florestas expostas a distúrbios compostos (Flores et al., 2024).

A primeira é uma trajetória em direção à “floresta degradada”, com copas ainda fechadas como nos ecossistemas florestais, mas com menor diversidade de espécies e alta dominância de espécies que impedem a sucessão florestal e se mantêm por meio da competição, como lianas, bambus e árvores *Vismia* sp. Essa trajetória é mais provável em partes da Amazônia que permanecem com precipitação anual acima de 1.800 mm. Nas partes da Amazônia onde a precipitação está abaixo desse limite crítico, uma segunda trajetória para “ecossistemas de dossel abertos degradados” torna-se mais provável.

O que acontece abaixo desse limiar é que a menor precipitação aumenta o risco de incêndios recorrentes que limitam o recrutamento de árvores, mantendo, portanto, o ecossistema permanentemente inflamável (Cochrane et al., 1999). Além disso, a proximidade de pastagens em fronteiras de desmatamento permite que gramíneas exóticas invadam locais perturbados, o que também reduz o recrutamento de árvores e aumenta a inflamabilidade (Silvério et al., 2013). Uma terceira trajetória para a “savana de areia branca” foi mostrada em partes sazonalmente inundadas da Amazônia (Flores et al., 2021), onde as florestas queimadas mudam para esse estado estável alternativo em poucas décadas, alterando drasticamente as redes ecológicas e os serviços ecossistêmicos.

A expansão desses três estados alternativos do ecossistema nas próximas décadas provavelmente reduzirá a capacidade do sistema amazônico de manter os fluxos de umidade atmosférica que são vitais para sua resiliência às mudanças climáticas. No entanto, são necessários mais estudos para entender melhor esses impactos na Amazônia e em outros biomas. Por exemplo, as áreas úmidas do Pantanal estão em uma região a favor do vento e recebem umidade da Amazônia. Essas áreas úmidas já estão diminuindo em extensão, e os incêndios florestais estão se tornando cada vez mais catastróficos.



3

O QUE
PODEMOS
FAZER A
RESPEITO?

O QUE
PODEMOS
FAZER A
RESPEITO?

3. O QUE PODEMOS FAZER A RESPEITO?

3.1. Desmatamento: Em quanto precisamos limitá-lo?

Conforme exposto nas seções anteriores, os pontos de inflexão que ameaçam a Floresta Amazônica podem ser alcançados por meio de mudanças no uso da terra, como desmatamento e degradação florestal, mudanças climáticas ou como um efeito combinado de ambas as mudanças ambientais. O governo brasileiro, conforme declarado em sua Contribuição Nacionalmente Determinada para a UNFCCC (NDC, 2024), optou por ir além das leis e políticas existentes e se comprometeu a atingir o desmatamento zero, de acordo com o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm).

A Comissão Interministerial Permanente de Prevenção e Controle do Desmatamento, instituída pelo Decreto 11.367/2023, definirá e coordenará ações interministeriais para reduzir as taxas de desmatamento no território nacional”. Serão definidos planos de ação para cada um dos biomas brasileiros, tendo como referência o PPCDAm, que se encontra em sua 5ª fase de implementação e tem demonstrado que, sob vontade política, a combinação de comando e controle, alternativas econômicas ao ciclo do desmatamento e outras políticas são capazes de deter as altas taxas de desmatamento (CEPAL, IPEA, GIZ, 2011).

No entanto, seu potencial para abordar a lógica da concentração de terras que começou durante a ditadura militar (Costa, 2022) e que depende do desmatamento contínuo, da degradação e da pobreza rural para manter baixos os custos da terra e da mão de obra em sua função de produção é limitado.

O modelo socioeconômico que ainda prevalece no território amazônico é aquele que começa com a apropriação ilegal de terras de áreas de florestas públicas e é transformado em pastagem de gado de baixa produtividade para forçar o reconhecimento da propriedade da terra. Isso é feito em grande escala por grileiros de terras contra os interesses dos habitantes da floresta. Essa “produção de terras” ocorre na ausência de governança estatal e distante de qualquer centro de decisão de políticas públicas, em um ambiente classificado por Costa et al. (2023) como um “ecossistema de ilegalidades”, onde a extração ilegal de madeira financia a remoção da floresta e muitas outras



atividades ilegais, como a mineração ilegal, coexistem ou estão relacionadas à atividade principal de apropriação de terras. Algumas das áreas prosperam como pontos de interesse agrícola, como Paragominas, no estado do Pará, mas a um alto custo socioecológico, incompatível com a ambição do Brasil de promover uma economia justa e verde, conforme declarado em sua NDC.

Parte do processo descrito acima reflete uma erosão da estrutura do Estado em relação à proteção ambiental (Abessa et al., 2019; Vale et al., 2021; Nunes et al., 2024). As incertezas do ciclo político e o lobby por trás das formas predatórias de exploração dos recursos naturais ainda são ameaças à continuidade das políticas que visam a deter o desmatamento (Vilani et al., 2023). As soluções propostas para o desenvolvimento regional da região devem considerar o fortalecimento das comunidades locais e a aplicação da lei em nível federal para evitar ações inconstitucionais do poder econômico sobre o ecossistema e seus habitantes.

No entanto, nenhum dos planos de desenvolvimento elaborados pelo governo federal para a região é ecologicamente viável, e o espaço deixado como potencial “desmatamento legal”, ou seja, a porcentagem das propriedades rurais em que a floresta ainda está preservada e que está acima da regra obrigatória de “reserva legal”, já está ameaçando a existência do ecossistema. Isso força a sociedade a buscar alternativas considerando o desenvolvimento da região.

As alternativas para as políticas de desenvolvimento regional devem considerar a diversidade da Amazônia em termos de diversidade biológica, diversidade sociocultural e em termos das diversas dinâmicas de comportamento, estratégias e soluções tecnológicas ao longo do tempo utilizadas pelos habitantes que, por gerações, viveram na floresta sem precisar desmatar grandes áreas. Apenas para ilustrar, Bertha Becker (2010) cita o exemplo da Nova Califórnia, em Rondônia, onde a agricultura familiar utiliza um consórcio de castanha, cupuaçu e pessegueiro mantendo a estrutura da floresta e os serviços ecossistêmicos, gerenciando os recursos naturais em um sistema comunitário de valores e cooperação.

Muitos outros empreendimentos, como esse exemplo da Nova Califórnia, estão constituindo trajetórias tecnológicas que coexistem com as trajetórias de desenvolvimento convencional que preservam a floresta indígena e as destrutivas. Val et al. (2024) explicam como o



conhecimento dos povos indígenas e das comunidades locais sobre o uso sustentável dos recursos da Amazônia é vital para a futura segurança nutricional regional e que a promoção do desenvolvimento científico e tecnológico nessa direção deve ser a base para uma bioeconomia amazônica. Costa (2024) analisa as trajetórias tecnológicas do campesinato amazônico e conclui que as trajetórias dos Sistemas Agroflorestais que tendem a seguir uma espécie de solução agrícola, em sucessões ou combinações que buscam imitar as qualidades do bioma, em uma espécie de “agricultura holística” diversa e complexa, são mais eficientes economicamente do que as que manejam os recursos originários do bioma amazônico, em uma espécie de “extrativismo dinâmico”.

De fato, muitas evidências arqueológicas mostram que mesmo grandes populações, concentradas em cidades, eram sustentadas por esse tipo de “agricultura holística”, usando a expressão de Francisco Costa (Lombardo et al., 2022). Ignora-se, em grande parte, que os mais de 10.000 anos de história de evolução cultural e tecnológica indígena e os ciclos de surgimento e declínio de culturas desenharam a composição botânica das florestas amazônicas (Magalhães, 2023), com a maioria do público acreditando que a biogeografia das espécies existe por processos que não estão ligados às atividades humanas.

Além disso, apesar do fato de que grande parte das pessoas ainda pertence a linhagens culturais que ajudaram a constituir as florestas como as conhecemos, as pessoas que carregam um conhecimento antigo e dependem desse conhecimento para sua sobrevivência não são convidadas a participar do processo de tomada de decisão. O planejamento do desenvolvimento moldará o ecossistema amazônico em breve ou causará seu colapso deixando uma composição florística desconhecida de uma paisagem semelhante à savana, como visto em sessões anteriores.

A recente criação de um Ministério dos Povos Indígenas está muito mais relacionada à necessidade de proteger a existência dos povos indígenas. Suas políticas públicas visam proteger sua saúde e fazer valer os direitos territoriais, mais do que realmente ajudar o intercâmbio cultural entre diferentes culturas e conhecimentos, o que poderia levar a uma criação mais ampla de soluções visando à preservação da função do ecossistema e, ao mesmo tempo, promovendo o desenvolvimento humano com base na equidade e na justiça climática.

Analisando essa situação, Vilani et al. (2023) sugerem sete elementos que poderiam contribuir para reestruturar as ações de conservação na Amazônia. Esses elementos são:

1. Concluir a restauração do Fundo Amazônia;
2. Incentivar todos os estados da Amazônia a criar secretarias especiais para os povos indígenas;
3. Reconsiderar grandes projetos de investimento em mineração e agronegócio;
4. Revogar as medidas antiambientais do governo anterior;
5. Estabelecer uma nova institucionalidade com os povos indígenas e as comunidades tradicionais como protagonistas;
6. Reconstruir a cidadania dos povos da Amazônia em favor da conservação da floresta; e
7. Melhorar o financiamento dos ministérios do meio ambiente e dos povos indígenas e das políticas associadas.

Esses elementos também poderiam contribuir para abordar uma lista de nove maneiras de evitar o ponto de inflexão da Amazônia, proposta pelo Painel Científico para a Amazônia (Flores et al., 2023):

1. Reduzir drasticamente as emissões globais de gases de efeito estufa;
2. Acabar com o desmatamento, a degradação e os incêndios florestais em larga escala;
3. Restauração de florestas abandonadas e degradadas em larga escala;
4. Criação e manutenção de áreas protegidas e territórios indígenas;
5. Investir em ciência, tecnologia e inovação;
6. Fortalecimento da participação de organizações da sociedade civil;
7. Desenvolvimento de uma sociobioeconomia sustentável de florestas em pé e rios caudalosos;
8. Manutenção da conectividade florestal na fronteira entre os Andes e a Amazônia; e
9. Incluir os “Direitos da Amazônia” fundamentais nas constituições dos países amazônicos.

As alternativas às práticas de desenvolvimento reducionistas dominantes geralmente são vistas como irrealis, não compatíveis com

a visão dominante baseada no neoliberalismo e no pensamento colonial. Mas, como mostram as seções anteriores, a trajetória atual não é viável e novas soluções precisam ser apresentadas.

Um grande projeto de cenário e um esforço inovador de modelagem econômica tentando prever as barreiras e as vantagens de uma alternativa “bioeconômica” para a estratégia de desenvolvimento da Amazônia e também da economia brasileira, chamada Nova Economia para a Amazônia Brasileira (Nobre et al., 2023), trouxe alguns insights importantes.

Esse tipo de compreensão da economia em nível local, nacional e global é importante para evitar mal-entendidos sobre os motivadores do desmatamento. Haddad et al. (2024) mostram que a maior parte do desmatamento na Amazônia Legal decorre de demandas locais e nacionais. Isso não significa que os importadores não devam se preocupar com a origem de seus produtos importados, mas mostra que as moratórias podem ser essenciais, mas são insuficientes como medidas para deter o desmatamento. Os autores da Nova Economia para a Amazônia Brasileira recomendam:

1. O setor público deve afirmar suas funções alocativas e distributivas para sinalizar as direções a serem tomadas pela economia no futuro;
2. O setor privado precisa aumentar sua capacidade de inovação e se tornar um impulsionador da nova economia;
3. Empregar instrumentos e métodos que permitam uma avaliação adequada do desenvolvimento social e econômico da Amazônia;
4. Estabelecer marcos claros na conceituação de planos e programas de bioeconomia que sejam compatíveis com produtos, processos e estruturas produtivas que protejam a floresta em pé, a biodiversidade e o conhecimento dos povos indígenas e das populações tradicionais;
5. A eliminação dos subsídios ou a promoção de subsídios cruzados de combustíveis fósseis para energia de fontes renováveis, com ênfase na geração solar e nos biocombustíveis de segunda geração, é essencial para a descarbonização da economia;¹

1. Pelas razões explicadas no tópico sobre mitigação climática abaixo, esse deve ser um esforço global, sendo uma recomendação para o governo brasileiro as especificidades do estudo de Nobre et al. 2023, mas tendo em mente que esse é um problema global com uma tendência global de aumento, apesar de todos os países

6. Redirecionar a disponibilidade de crédito rural, transformando gradualmente o Plano Safra em um Plano Agrícola de Baixa Emissão de Carbono (ABC);
7. Restabelecer o papel do setor público na gestão e governança territorial;
8. Restabelecer a governança e garantir os investimentos do Fundo Amazônia. O Fundo Amazônia, além de apoiar as ações de comando e controle, as comunidades indígenas e a implementação e análise do Cadastro Ambiental Rural (CAR); e
9. Criar uma estrutura metodológica e taxonomias para os mercados financeiro e de capitais sobre os requisitos para investimentos verdes na Amazônia que promovam a redução de emissões e a preservação da biodiversidade.

Todas as medidas locais para deter o desmatamento são essenciais para evitar um ponto de inflexão amazônico, mas não são suficientes. Conforme exposto nas páginas anteriores e discutido em mais detalhes abaixo, a mudança climática global pode desencadear um ponto de inflexão amazônico por si só. Isso expõe como um mito a ideia de senso comum de que proteger a floresta amazônica é uma solução para as mudanças climáticas. “Não se pode e não se deve pretender equiparar emissões de carbono ‘negro’ (carvão, petróleo ou gás) com sumidouros de carbono ‘verde’, como as florestas” (CCAG, 2024).

Não é possível neutralizar as emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis (“carbono negro”) com os sumidouros de “carbono verde” da fotossíntese. O carbono negro é retirado de um estoque de carbono estável que é muitas vezes mais antigo do que a existência humana e continuaria estável se não fosse avaliado pelos seres humanos e não pode ser compensado pelo ciclo biológico do carbono verde, que enriquece em C com a queima de combustíveis fósseis. Portanto, é correto entender que a Amazônia não é uma solução para a mudança climática induzida pelo homem, mas está ameaçada por ela, enquanto o C fóssil for despejado na atmosfera, nos oceanos e no sistema biológico.

envolvidos serem partes da UNFCCC. Sem um esforço global para reduzir as emissões, os países que abrangem a região amazônica não conseguirão evitar o ponto de inflexão da Amazônia. Para obter mais detalhes sobre os subsídios aos combustíveis fósseis, leia <https://www.imf.org/en/Topics/climate-change/energy-subsidies>.

3.2. Mitigação do Clima: Quanto o risco de atingirmos o ponto de não retorno aumenta com o aquecimento?

O Relatório de Síntese AR6 do IPCC concluiu que “cada incremento no aquecimento global intensificará riscos múltiplos e simultâneos (alta confiança)” e que “reduções profundas, rápidas e sustentadas nas emissões de gases de efeito estufa” desacelerariam o aquecimento global e, portanto, reduziriam os impactos.

Embora agora seja praticamente inevitável que o mundo atinja 1,5°C de aquecimento acima do nível pré-industrial na próxima década, o grau em que ultrapassaremos esse nível de aquecimento e a rapidez com que conseguiremos reduzir as temperaturas novamente dependem muito da atividade global adotada agora para limitar as emissões. O Relatório Especial do IPCC sobre 1,5°C avaliou os riscos de aquecimento e de superação das metas de temperatura e concluiu: “Os riscos para ecossistemas terrestres únicos e ameaçados são geralmente mais altos sob um aquecimento de 2°C em comparação com 1,5°C, enquanto que, em escala global, projeta-se que riscos graves e generalizados ocorram com 2°C de aquecimento”.

O relatório AR6 WG2 (O'Neill et al., 2021 – IPCC AR6 WG2 ch.16) atualizou os motivos de preocupação e incluiu o *dieback* da floresta amazônica no RFC5 “eventos singulares de grande escala” e foi avaliado como uma transição de risco moderado para alto acima de 2°C de aquecimento global. Se a floresta amazônica atingir um ponto de inflexão e perder uma cobertura substancial, isso impactará o clima global por meio da liberação de grandes quantidades de carbono na atmosfera e poderá ser irreversível, pelo menos em escalas de tempo de décadas (Lee et al., 2021 – IPCC AR6 WG1 ch. 4). A perda de florestas também pode ser comprometida antes que mudanças substanciais sejam observadas (Jones et al., 2009), o que aumenta a importância da ação antecipada para limitar as mudanças climáticas globais.

Portanto, é imperativo para a estabilidade de longo prazo da Floresta Amazônica que os esforços de mitigação em escala global aumentem a urgência de interromper as emissões de CO₂ e limitar a extensão do aquecimento global.

3.3. Adaptação: Podemos nos Adaptar às Mudanças em Grande Escala que ocorrem?

A Amazônia está enfrentando desafios sem precedentes devido às mudanças climáticas (SPA, 2021). Com o aumento das temperaturas globais, a Amazônia está enfrentando eventos climáticos mais frequentes e intensos, incluindo secas e inundações extremas. Essas mudanças não são apenas ameaças ao meio ambiente e à biodiversidade, mas também aos milhões de pessoas que dependem da Amazônia para sua subsistência, cultura e bem-estar. Nesse contexto, a adaptação na região amazônica, aumentando a resiliência aos eventos extremos, não é apenas importante, é crucial.

A floresta amazônica é um ecossistema complexo e interdependente, onde pequenas mudanças na temperatura e na precipitação podem ter efeitos em cascata em toda a região (Ometto et al., 2022). Os modelos climáticos preveem que a Amazônia se tornará cada vez mais vulnerável a eventos climáticos extremos, levando a um risco maior de *dieback* florestal, uma situação em que grandes porções da floresta se degradam ou entram em colapso devido a secas prolongadas e ao aumento das temperaturas (Lapola et al., 2023). Esse processo ameaça transformar a Amazônia de um sumidouro de carbono em uma fonte de carbono (Gatti et al., 2021), liberando dióxido de carbono na atmosfera e exacerbando o aquecimento global.

Portanto, as estratégias de adaptação são necessárias para preservar as funções ecológicas dos ecossistemas naturais, proteger a biodiversidade e apoiar as comunidades que dependem da floresta. Ao contrário dos esforços de mitigação, que visam reduzir os fatores que provocam as mudanças climáticas, a adaptação se concentra no ajuste às mudanças que já estão ocorrendo e àquelas que são inevitáveis.

A Amazônia é o lar de uma infinidade de espécies de animais, plantas e microorganismos, muitas das quais são endêmicas, não encontradas em nenhum outro lugar do planeta. Como as mudanças climáticas alteram os habitats, muitas espécies precisarão se adaptar migrando para novas áreas, mudando seu comportamento ou evoluindo ao longo do tempo. Entretanto, o ritmo acelerado das mudanças climáticas pode superar a capacidade das espécies de se adaptarem naturalmente, levando a perdas significativas na biodiversidade. Os esforços de adaptação devem incluir a criação de corredores ecológicos, conectando áreas de conservação, que permitam que as



espécies se desloquem para habitats mais adequados à medida que as condições climáticas mudam. A proteção de áreas grandes e contíguas de floresta também é essencial para manter os serviços ecossistêmicos que a Amazônia oferece (Aragão et al., 2018).

A água é um recurso crítico na Amazônia. Secas extremas podem levar à escassez de água, enquanto inundações extremas podem danificar a infraestrutura e perturbar as economias locais, alterando a geografia das áreas inundadas e a conectividade entre os canais dos rios (Espinoza et al., 2024). A gestão eficaz da água e a previsão de inundações são, portanto, componentes vitais da adaptação na Amazônia. Restaurar e proteger áreas úmidas e planícies aluviais, que atuam como amortecedores naturais contra inundações, é uma ação crítica. Essas áreas podem absorver o excesso de água durante chuvas fortes, reduzindo o impacto sobre as comunidades a jusante. Além disso, a melhoria da infraestrutura de gerenciamento de água, como reservatórios e sistemas de irrigação, pode ajudar a garantir um suprimento estável de água durante os períodos de seca. É essencial planejar a infraestrutura de apoio para agir em eventos extremos, por exemplo, o fornecimento de água e alimentos para regiões remotas durante longos períodos de seca ou o planejamento da estrutura distribuída e da brigada de incêndio para agir para evitar grandes incêndios.

Os povos indígenas e as comunidades tradicionais da Amazônia têm uma profunda ligação com a floresta e possuem conhecimentos valiosos sobre seu manejo (SPA, 2021). No entanto, eles também estão entre os mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. A adaptação na região amazônica deve priorizar as necessidades e os direitos dessas comunidades, garantindo que elas tenham os recursos e o apoio necessários para lidar com as mudanças nas condições. A preocupação com as populações vulneráveis nos sistemas urbanos da região também é fundamental.

Essas comunidades são as primeiras a serem afetadas pelos extremos climáticos e o aumento da resiliência e a criação de oportunidades de adaptação precisam ser fundamentais para o planejamento e a governança urbanos. As ações de adaptação em sistemas urbanos incluem, entre outras, soluções baseadas na natureza, fortalecimento das redes de comunicação e informação, apoio a uma arquitetura melhor e mais favorável ao clima em casas e edifícios comunitários, tratamento de resíduos e redução da exposição à poluição. Além disso,

as estratégias de adaptação baseadas na comunidade podem incluir a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, o aumento da segurança alimentar e a melhoria do acesso à água potável. Ao integrar o conhecimento tradicional com a pesquisa científica, essas estratégias podem ser adaptadas às necessidades específicas de cada comunidade, ajudando a desenvolver a resiliência contra as ameaças relacionadas ao clima.

A adaptação na Amazônia requer estruturas políticas sólidas e governança eficaz nos níveis local, nacional e internacional. Os governos devem implementar e aplicar políticas que protejam a Amazônia de mais desmatamento e degradação. Isso inclui a regulamentação do uso da terra, a promoção do desenvolvimento sustentável e a garantia de que as medidas de adaptação sejam integradas às estratégias mais amplas de mudança climática. A adaptação também deve contar com informações sólidas, com base científica e acessíveis, que devem chegar ao gestor em nível local e fornecer um mapeamento claro dos riscos de impacto climático e das possíveis soluções.

A cooperação internacional também é essencial. Acordos e organizações multilaterais, como a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA), desempenham um papel fundamental na coordenação dos esforços de adaptação às mudanças climáticas e na proteção da Amazônia.

3.4. Pesquisa: Observações, Alerta precoce, Modelagem, IA, etc.

As principais prioridades de pesquisa em torno do Ponto de Inflexão do Sistema Florestal Amazônico são:

1. Resposta da floresta às mudanças. Compreender as respostas atuais e potenciais da floresta à seca regional, às ondas de calor e aos incêndios florestais e ao CO₂ elevado por meio de experimentos in situ, observações de campo e de sensoriamento remoto e estudos de modelagem;
2. Evidências para a mitigação da mudança climática global. Quanto mais provável é a travessia de um ponto de inflexão na Amazônia com o aumento do aquecimento. Existe um nível de aquecimento global que pode tornar muito mais provável um ponto de inflexão na Amazônia e, portanto, que precisamos evitar?

3. Sistema de alerta precoce. Como saberemos se estamos nos aproximando de um ponto de inflexão na Amazônia? Aprimorando os ESMs e usando esses modelos para entender os elementos do sistema terrestre que podemos considerar como um aviso antecipado de um tombamento da Amazônia, e como podemos usar a observação da Terra para monitorar esses sinais de “desaceleração crítica”;
4. Cascatas de tombamento no sistema terrestre. Outros elementos do sistema terrestre induziriam a um tombamento da Amazônia? Por outro lado, quais elementos de tombamento do sistema terrestre se tornariam mais instáveis em um cenário de colapso da floresta amazônica?
5. Compreensão dos impactos locais, regionais e globais de um ponto de inflexão amazônico. Quais serão as consequências sociais e ecossistêmicas de um ponto de inflexão na Amazônia e o que isso significaria em termos práticos para a segurança alimentar e hídrica, a saúde humana, a infraestrutura crítica e outras metas de desenvolvimento sustentável?
6. Apoio à decisão e coprodução de respostas políticas. Como essas novas informações com base científica podem ser usadas para informar e interagir com a governança local, nacional, regional e global existente?

A Tabela 1 a seguir traz uma relação de prioridades de pesquisa e respectivos projetos em torno do Ponto de Inflexão do Sistema Florestal Amazônico.

Tabela 1. Relação de prioridades de pesquisa e respectivos projetos em torno do Ponto de Inflexão do Sistema Florestal Amazônico.

Prioridade de Pesquisa	Projeto	Breve descrição da contribuição do projeto
Resposta das florestas às mudanças	AmazonFACE	Projeto financiado pelo Reino Unido e pelo Brasil para construir torres que bombeiam CO ₂ para o ar ao redor das árvores, a fim de estudar sua resposta ao aumento do CO ₂ atmosférico.
Resposta das florestas às mudanças	CSSP Brasil Parcelas florestais (RAINFOR)	Apoio ao experimento Caixana throughfall e desenvolvimento do Modelo do Sistema Terrestre do Reino Unido para representar a resposta da vegetação à seca, CO ₂ , temperatura e mudança no uso da terra. Monitoramento da dinâmica de árvores em regiões da floresta

		amazônica.
Evidências para mitigação	OptimESM & TipESM & ClimTip	Simulações do modelo do sistema terrestre (ESM) para identificar pontos de inflexão em uma série de níveis de aquecimento global. Outras simulações examinarão o potencial de reverter os pontos de inflexão reduzindo as emissões de CO ₂ .
Sistema de alerta precoce	DicaESM	Usar ESMs para identificar precursores de pontos de inflexão que possam ser usados para monitoramento e entender a reversibilidade quando um alerta antecipado for identificado.
Sistema de alerta precoce	Agência Espacial Europeia	A atividade ESA CLIMATE SPACE Tipping Elements tem como objetivo fortalecer os níveis de confiança em nossa compreensão do risco de elementos de ruptura e mudanças abruptas, aproveitando os registros de dados climáticos.
Cascatas de gorjetas	DicaESM	As simulações de ESM induzirão pontos de inflexão, e as simulações de continuidade no novo estado estável podem revelar novas dependências no sistema terrestre.
Impactos locais e globais	DicaESM	Impactos multissetoriais avaliados por meio de uma série de modelos de impactos, incluindo estresse térmico humano, queimadas, secas, inundações, doenças infecciosas.
Suporte à decisão	DicaESM	Atividades de contato com instituições associadas, como os governos nacionais europeus e a Comissão Europeia.

Links:

DicaESM: <https://www.tipesm.eu/>

ClimTip: <https://www.climate-tipping-points.eu/>

AmazonFACE: <https://amazonface.unicamp.br/en/>

CSSP Brasil:

<https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/collaboration/wcssp/cssp-brazil/inde>

4

OPORTUNIDADES DE FINANCIAMIENTO

OPORTUNIDADES
DE FINANCIAMIENTO

4. OPORTUNIDADES DE FINANCIAMENTO

Financiar a transformação necessária do *business as usual* para a nova economia na região amazônica é provavelmente o obstáculo mais significativo, além de convencer a sociedade de que outro modelo é possível.

No âmbito internacional, a Convenção sobre Mudanças do Clima estabeleceu que os países desenvolvidos deveriam financiar ações de combate à mudança do clima nos países em desenvolvimento, como o Brasil e outros países amazônicos, por meio de empréstimos e doações, estabelecendo um mecanismo de financiamento no Artigo 11¹. Os quatro fundos climáticos multilaterais mais importantes, o Fundo de Adaptação², os Fundos de Investimento Climático (CIFs)³, o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF)⁴ e o Fundo Verde para o Clima (GCF)⁵ – têm programas e projetos dedicados a esforços de adaptação e/ou mitigação relacionadas ao setor florestal.

Os Fundos de Investimento Climático, criados antes da UNFCCC projetar a arquitetura de financiamento climático, tendo o Fundo Verde para o Clima como principal instrumento financeiro, servem como uma espécie de laboratório para o financiamento de ações climáticas de formas inovadoras, tendo investido mais de US\$ 7 bilhões desde 2008. O CIF apoia a mudança transformacional em direção ao desenvolvimento de baixo carbono e resiliente ao clima. Ele tem um subsídio para apoiar os Povos Indígenas e as Comunidades Locais (IPLC) e um programa de investimento florestal destinado a “reverter o impacto das ações humanas e das mudanças climáticas nos ecossistemas florestais, por meio da capacitação de governos e comunidades locais para lidar de forma sustentável com os fatores de desmatamento e degradação florestal”⁶. Os subsídios ainda são muito pequenos para impulsionar a mudança necessária da tendência de exploração econômica insustentável dos recursos naturais da região amazônica ou de outros lugares. Sua existência, no entanto, é o reconhecimento da comunidade internacional do caminho a ser

1 <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

2 <https://www.adaptation-fund.org/>

3 <https://www.cif.org/>

4 <https://www.thegef.org/>

5 <https://www.greenclimate.fund/>

6 <https://www.cif.org/>

seguido, e as lições aprendidas com os subsídios já investidos são valiosas para a prospecção contínua de soluções.

O Fundo Amazônia⁷ estabeleceu um nível mais alto de investimento, com os doadores financiando alternativas econômicas sustentáveis de uso dos recursos naturais, planejamento do uso da terra, mecanismos de monitoramento e controle e ciência, tecnologia e inovação. Mais de US\$ 1 bilhão já foi investido e muitas lições devem ser aprendidas com seu monitoramento. Nesse sentido, o Projeto Arco da Restauração, liderado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), tem como objetivo restaurar 240.000 km² até 2050 na Amazônia brasileira. O Fundo Amazônia está começando a apoiar doações a IPLCs para fazer a restauração florestal. A avaliação de impacto necessária do Fundo Amazônia deve se concentrar na mudança macrotransformacional, conforme discutido por Van den Berg & Magro (2019), mais do que nos resultados micro de investimentos em projetos individuais. Isso ocorre porque as mudanças no sistema precisam de menor aversão ao risco de investimento, considerando o maior risco de inação e os custos sem precedentes de atingir o ponto de inflexão.

Outro fundo importante é o Fundo Brasileiro para o Clima⁸ que também mantém um programa de Florestas Nativas, voltado para projetos associados ao manejo florestal sustentável; ao plantio de florestas com espécies nativas, incluindo a cadeia produtiva; ao processamento e consumo de produtos florestais de origem sustentável; bem como ao desenvolvimento tecnológico dessas atividades. O Fundo está recebendo US\$ 1,9 bilhão para empréstimos e as taxas de juros cobradas pelo programa Mata Nativa serão de 1%.⁹

Os paradigmas podem mudar em um cenário em que não são causados de forma proativa, mas sim uma consequência de diferentes fatores que catalisam a mudança ou de forma proativa, como este documento recomenda que aconteça, como resultado das ações dos empreendedores para uma mudança (Uitto et al., 2019). Para promover a mudança de comportamento dos empreendedores, é necessário haver sinalização social e elaboração de políticas eficazes. Apesar de todas as iniciativas de financiamento e colaboração internacionais, o

7 <https://www.amazonfund.gov.br/en/home/>

8 <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/fundo>

9 <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/04/federal-government-signs-contract-for-brl-10-4-billion-from-the-climate-fund>



governo brasileiro tem o maior ônus no financiamento de todo o monitoramento, aplicação da lei e ciência e educação necessários para proteger a Amazônia.

No entanto, ele não consegue dar os incentivos corretos para que o investimento privado flua para atividades sustentáveis. Um exemplo é a falta de aplicação de seu código florestal (Azevedo-Ramos et al., 2017; Brock et al., 2021; Kushner et al., 2023), o que frustra os poucos proprietários de terras que investiram na restauração ou manutenção de florestas protegidas acima do limite legalmente obrigatório dentro de suas propriedades, esperando uma compensação financeira em um mercado de conformidade. Nobre et al. (2023) estimam que os investimentos necessários para a transição para a nova economia na Amazônia brasileira sejam da ordem de meio trilhão de dólares, recursos financeiros que só podem ser alcançados se o investimento privado for considerado. Carvalho et al (2017) estimaram os custos do controle do desmatamento legal na Amazônia, que poderiam ser alcançados com baixos custos. Souza et al. (2024) analisaram os custos econômicos de políticas de desmatamento zero no Cerrado e na Amazônia.

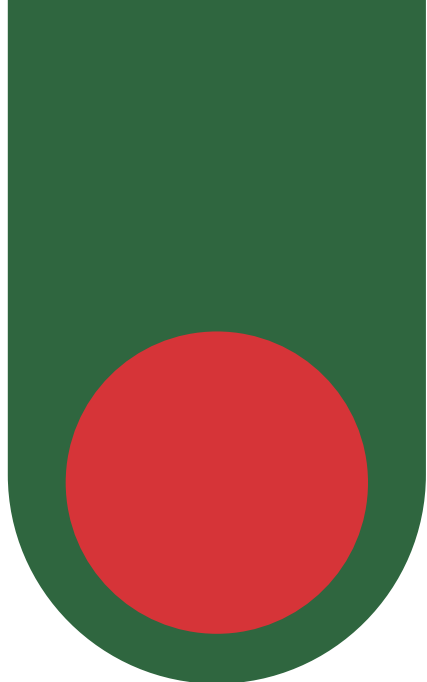
De acordo com os autores, uma forma de compensar esses custos seria aumentar os investimentos nos setores agrícolas para aumentar sua produtividade. Seria necessário um investimento anual de 2,3% do PIB nessas regiões para financiar esse cenário de desmatamento zero: o valor total investido seria de R\$ 225 bilhões nos biomas Amazônia e Cerrado de 2021 a 2040, equivalente a uma média de R\$ 11,6 bilhões anuais.

De acordo com o estudo Nova Economia para a Amazônia Brasileira do *World Resources Institute* (WRI; Nobre et al., 2023), um cenário livre de desmatamento seguindo um caminho de baixo carbono resultaria em um crescimento econômico substancial e equitativo para a região amazônica e para o Brasil. Esse cenário produziria benefícios econômicos significativos, criaria empregos e contribuiria positivamente para as metas climáticas do Brasil. Os investimentos necessários para facilitar essa transição seriam de 1,8% do PIB nacional do Brasil anualmente, representando um ligeiro aumento de 0,8% em comparação com o cenário de referência. Especificamente, isso se traduz em um adicional de R\$ 2,56 trilhões (equivalente a US\$ 513 bilhões) até o ano de 2050.

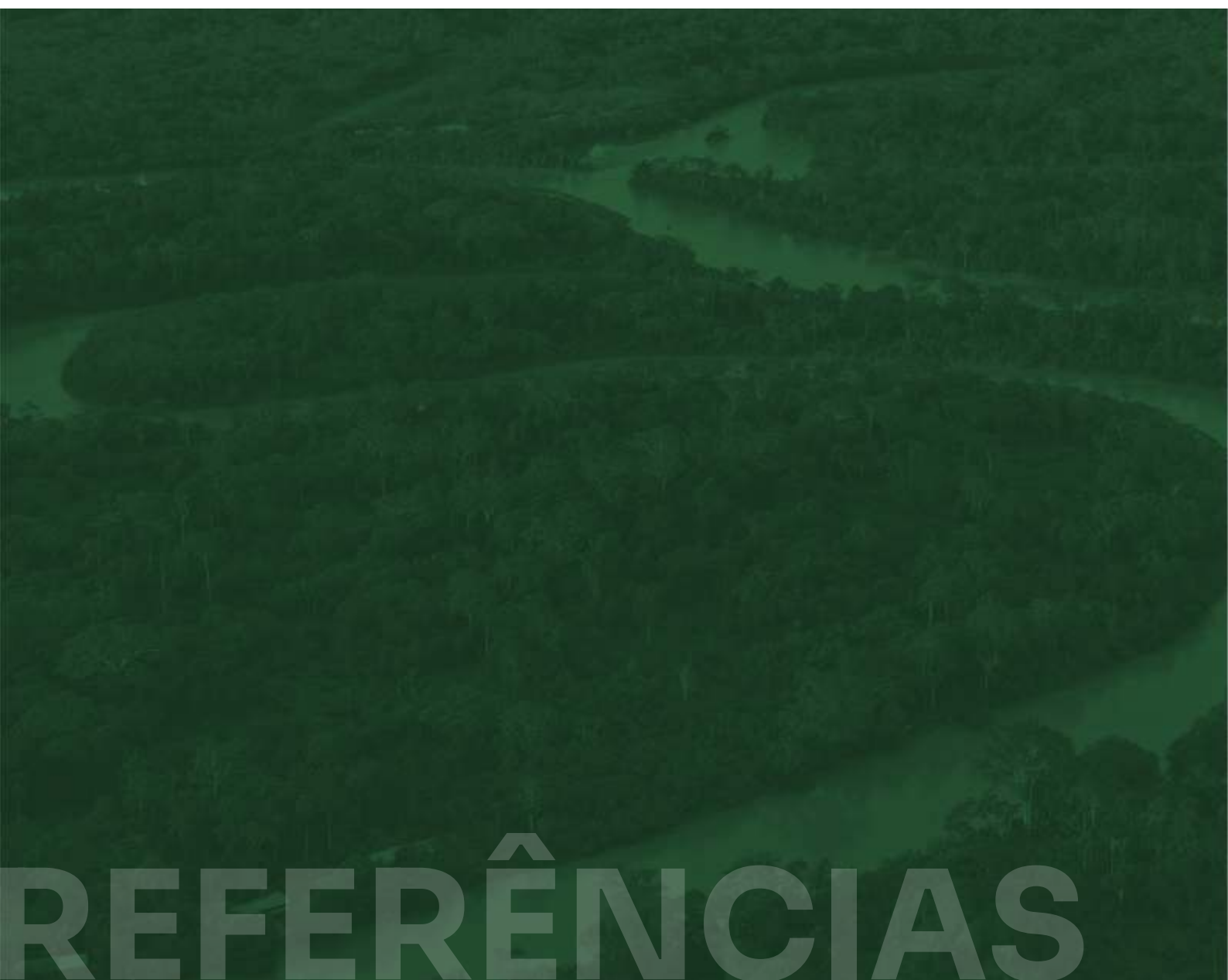


Esse nível de fluxo de investimento só pode ser alcançado se a regulamentação for projetada e aplicada de forma a evitar todo o investimento privado potencial em atividades que contrariem a nova economia para a Amazônia brasileira, ou seja, projetar uma estrutura de mercado em que empréstimos privados e subsídios e empréstimos públicos só estejam disponíveis para atividades que promovam ou sejam neutras para a preservação dos serviços ecossistêmicos da Amazônia, como modelos de negócios de soluções baseadas na natureza (Kreibiehl et al., 2022).

O Tropical Forests Forever Facility (TFFF) é outra das estratégias do Brasil para lidar com as mudanças climáticas e o financiamento. Ele foi apresentado durante a COP28 em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos. Seu objetivo é compensar os países em desenvolvimento que conservam suas florestas tropicais, canalizando o capital investido para ativos verdes e aplicando os retornos para manter as florestas em pé. Na estratégia proposta, a iniciativa fará pagamentos para cada hectare de florestas em pé, com penalidades para cada hectare que for desmatado ou degradado. Ela também garantiria recursos adicionais para a proteção da biodiversidade, dos territórios tradicionais e da manutenção dos serviços ambientais. Criaria um veículo internacional para compensar os países pela preservação de suas florestas tropicais. O plano parece implementar essa política de maneira simplificada, comparando fotos de satélite e fazendo pagamentos por hectare de área verde mantida.



REFERÊNCIAS



REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- ABESSA, D.; FAMÁ, A.; BURUAEM, L. The systematic dismantling of Brazilian environmental laws risks losses on all fronts. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3, p. 510-511, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0855-9>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- AKABANE, et al., 2024. Weaker Atlantic overturning circulation increases the vulnerability of northern Amazon forests. *Nature Geoscience*, v. 17, p. 1284-1290, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41561-024-01578-z>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ARAGÃO, L. E. O.; et al. Above and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences*, v. 6, p. 2759-2778, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-6-2759-2009>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ARAGÃO, L. E. O. C. The rainforest's water pump. *Nature*, v. 489, n. 7415, p. 217-218, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature11485>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ARAGÃO, L. E. O.; et al. 21st century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9, p. 536, 2018.
- AZEVEDO-RAMOS, C.; et al. Limits of Brazil's Forest Code as a means to end illegal deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, v. 114, p. 7653-7658, 2017.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; ERWIN, T.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; NUÑEZ VARGAS, P.; PITMAN, N. C. A.; SILVA, J. N. M. VÁSQUEZ MARTÍNEZ, R. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 359, n. 1443, p. 353-365, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/RSTB.2003.1422>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BARLOW, J.; et al. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature*, v. 559, p. 517-526, 2018.
- BECKER, B. K. Novas territorialidades na Amazônia: desafio às políticas públicas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 5, n. 1, p. 17-23, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1981-81222010000100003>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BETTS, R. A.; COX, P. M.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1-3, p. 157-175, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0050-y>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BETTS, R. A.; BOUCHER, O.; COLLINS, M.; COX, P. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; HEMMING, D. L.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D.; SEXTON, D. M. H.; WEBB, M. J. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature*, v. 448, n. 7157, p. 1037-1045, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature06045>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BOULTON, et al., 2022. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature*, v. 12, p. 271-279, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01287-8>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BRIENEN, R. J. W.; PHILLIPS, O. L.; FELDPAUSCH, T. R.; GLOOR, E.; BAKER, T. R.; LLOYD, J.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; MONTEAGUDO-MENDOZA, A.; MALHI, Y.; LEWIS, S. L.; VÁSQUEZ MARTINEZ, R.; ALEXIADES, M.; ÁLVAREZ DÁVILA, E.; ALVAREZ-LOAYZA, P.; ANDRADE, A.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ARAUJO-MURAKAMI, A.; ARETS, E. J. M. M.; ARROYO, L.; ... ZAGT, R. J. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, v. 519, n. 7543, p. 344-348, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature14283>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BROCK, et al. Implementing Brazil's Forest Code: a vital contribution to securing forests and conserving biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, v. 30, p. 1621-1635, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02159-x>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- BURTON, et al., 2021. South American fires and their impacts on ecosystems increase with continued emissions. *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2020. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cli2.8>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- CANO, et al., 2022. Abrupt loss and uncertain recovery from fires of Amazon forests under low climate mitigation scenarios. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 119, n. 52, p. e2203200119, 2022. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2203200119>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- CANADELL, J. G. et al. Chapter 12: Climate change and regional impacts. In:

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

CARVALHO, L. M.; et al. Controlling deforestation in the Brazilian Amazon: Regional economic impacts and land-use change. *Land Use Policy*, v. 64, p. 327–341, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.001>. Acesso em: 17 ago. 2025.

CASTELLANOS, E. J.; LEMOS, M. F.; ASTIGARRAGA, L.; CHACÓN, N.; CUVI, N.; HUGGEL, C.; MIRANDA, L.; VALE, M. M.; OMETTO, J. P.; PERI, P. L.; POSTIGO, J. C.; RAMAJO, L.; ROCO, L.; RUSTICUCCI, M.; MENEZES, J. A.; BORGES, P.; BUENO, J.; CUESTA, F.; DRENKHAN, F.; VALLADARES, Central and South America. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2025.

CASTELLO, L.; et al. Vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conservation Letters*, v. 6, n. 4, p. 217–229, 2013.

CCAG – Climate Crisis Advisory Group. Voluntary carbon markets: potential, pitfalls, and the path forward. Reino Unido, 2024. Disponível em: <https://www.ccag.earth/reports/voluntary-carbon-markets-pitfalls-potential-and-the-path-forward>. Acesso em: 17 ago. 2025.

CEPAL – Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe. Panorama Social da América Latina e do Caribe 2022: A transformação da educação como base para o desenvolvimento sustentável. Resumo executivo, 2022.

CHENG, H.; SINHA, A.; CRUZ, F. W.; WANG, X.; EDWARDS, R. L.; M., F.; RIBAS, C. C.; VUILLE, M.; STOTT, L. D.; AULER, A. S. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. *Nature Communications*, v. 4, n. 1, p. 1–6, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms2415>. Acesso em: 17 ago. 2025.

CLARKE, B.; BARNES, C.; RODRIGUES, R. R.; et al. Mudanças climáticas, e não o El Niño, são o principal fator de seca excepcional na altamente vulnerável Bacia do Rio Amazonas. *World Weather Attribution Report*, 2024.

COCHRANE, M. A.; et al., 1999. Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.284.5421.1832>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COE, M. T.; et al. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1903–1908, 2009.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/JOC.2048>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COSTA, F. DE A. Da estrutura fundiária à dinâmica do desmatamento: a formação de um mercado de terras na Amazônia (1970–2017). *Nota de Política Econômica – MADE/USP*, n. 19, 2022.

COSTA, F. DE A.; LARREA, C.; ARAÚJO, R.; BENATTI, J. H.; GIRALDO, V.; HECHT, S.; MURMIS, M. R.; PETERS, S.; SCHMINK, M.; TERÁN, E.; TRECCANI, J. Land Market and Illegalities: the deep roots of deforestation in the Amazon. *Policy Brief – Science Panel for the Amazon*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55161/SLBQ1069>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COSTA, F. DE A. A economia dos sistemas agroflorestais na Amazônia: uma trajetória crítica para o desenvolvimento sustentável (1995–2017). *Economia e Sociedade*, v. 33, n. 2, p. e260717, 2024.

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*, v. 408, n. 6809, p. 184–187, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35041539>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COX, P. M.; et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 137–156, 2004.

DA COSTA, et al., 2018. Stand dynamics modulate water cycling and mortality risk in droughted tropical forest. *Global Change Biology*, v. 24, n. 1, pp. 249–258, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.13851>. Acesso em: 17 ago. 2025.

DUFFY, P. B.; BRANDO, P.; ASNER, G. P.; FIELD, C. B. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 112, n. 43, p. 13172–13177, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1073/PNAS.1421010112/SUPPL_FILE/PNAS.201421010SI.PDF. Acesso em: 17 ago. 2025.

DUNNE, T.; et al. O comportamento de um rio de leito rochoso em um trecho de leito de areia: o rio Amazonas, Brasil. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 23, n. 12, p. 1061-1076, 1998.

DRUKE, et al., 2023. Fire may prevent future Amazon forest recovery after large-scale deforestation. *Nature*, v. 4, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00911-5>. Acesso em: 17 ago. 2025.

DUTRA, et al., 2022. Fire Dynamics in an Emerging Deforestation Frontier in Southwestern Amazonia, Brazil. *Fire*, v. 6, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/6/1/2>. Acesso em: 17 ago. 2025.

ELLWANGER, J. H.; et al. Além da perda de diversidade e das mudanças climáticas: impactos do desmatamento da Amazônia sobre doenças infecciosas e saúde pública. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, 2020.

ESPINOZA, J. C.; et al. Hotspots de precipitação no sul da bacia amazônica, distribuição temporal e espacial e controles atmosféricos associados. *Climatic Change*, v. 96, p. 187-197, 2009.

ESPINOZA, J. C.; et al. The influence of the tropical Atlantic and Pacific Oceans on the Amazon basin's rainfall variability and climate extremes. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 26, p. 342-358, 2011.

ESQUIVEL-MUELBERG, A.; BAKER, T. R.; DEXTER, K. G.; LEWIS, S. L.; BRIENEN, R. J. W.; FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO-MENDOZA, A.; ARROYO, L.; ÁLVAREZ-DÁVILA, E.; HIGUCHI, N.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; SILVEIRA, M.; VILANOVA, E.; GLOOR, E.; MALHI, Y.; CHAVE, J.; BARLOW, J.; ... PHILLIPS, O. L. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, v. 25, n. 1, p. 39-56, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/GCB.14413>. Acesso em: 17 ago. 2025.

FARIA, et al. HIV epidemiology. The early spread and epidemic ignition of HIV-1 in human populations. *Science*, v. 346, p. 56-61, 2014.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C. E.; HAUCK, J. LANDSCHÜTZER, P.; LE QUÉRE, C.; LUIJKX, I. T.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SCHWINGSHACKL, C.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S. R.; ANTHONI, P.; ... ZHENG, B. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, v. 15, n. 12, p. 5301-5369, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/ESSD-15-5301-2023>. Acesso em: 17 ago. 2025.

FU, R.; YIN, L.; LI, W.; ARIAS, P. A.; DICKINSON, R. E.; HUANG, L.; CHAKRABORTY, S.; FERNANDES, K.; LIEBMANN, B.; FISHER, R.; MYNENI, R. B. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 110, n. 45, p. 18110-18115, 2013.

FLORES, et al., 2020. Soil erosion as a resilience drain in disturbed tropical forests. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-019-04097-8>. Acesso em: 17 ago. 2025.

FLORES, et al., 2021. White-Sand Savannas Expand at the Core of the Amazon After Forest Wildfires. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-021-00607-x>. Acesso em: 17 ago. 2025.

FLORES, B. M.; ESQUIVEL-MUELBERG, A.; EHRLICH, M.; VILANOVA, E.; CHAVES, R.; HIROTA, M.; KALAMANDÉEN, M. Nove maneiras de evitar o ponto de inflexão da Amazônia. *Policy Brief - Science Panel for the Amazon*, 2023.

FLORES, B. M.; et al. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, v. 626, p. 555-564, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOUGHTY, C. E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L. G.; BASSO, L. S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C. S. C.; BORGES, V. F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L. O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O. L.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, v. 506, n. 7486, p. 76-80, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature12957>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GATTI, L. V.; et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, p. 388-393, 2021.

GEDNEY, N.; COX, P. M.; BETTS, R. A.; BOUCHER, O.; HUNTINGFORD, C.; STOTT, P. A. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, v. 439, n. 7078, p. 835-838, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature04504>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GLADWELL, M. *The tipping point: how small things can make a big difference*. Back Bay: 2002.

GLOOR, M.; GATTI, L.; BRIENEN, R.; FELDPAUSCH, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MILLER, J.; OMETTO, J. P.; ROCHA, H.; BAKER, T.; DE JONG, B.; HOUGHTON, R. A.; MALHI, Y.; C. ARAGÃO, L.

E. O.; GUYOT, J. L.; ZHAO, K.; JACKSON, R.; PEYLIN, P.; SITCH, S.; POULTER, B.; ... LLOYD, J. A review of the status, decadal trends and main determinants. *Biogeosciences*, v. 9, n. 12, p. 5407-5430, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/BG-9-5407-2012>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GLOOR, M.; et al. Intensificação do ciclo hidrológico amazônico nas últimas duas décadas. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 9, p. 1729-1733, 2013.

GLOOR, M.; et al. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 29, n. 9, p. 1384-1399, 2015.

GOOD, P.; JONES, C.; LOWE, J.; BETTS, R.; BOOTH, B.; HUNTINGFORD, C. Quantifying Environmental Drivers of Future Tropical Forest Extent. *Journal of Climate*, v. 24, n. 5, p. 1337-1349, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3865.1>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GRYSEELS, S.; et al. Risk of human-to-wildlife transmission of SARS-CoV-2. *Mammal Review*, v. 51, p. 272-292, 2021.

GOOD, P.; et al. 2011. Quantifying Environmental Drivers of Future Tropical Forest Extent. *Journal of Climate*, v. 24, n. 5, p. 1337-1349, 2011. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/5/2010jcli3865.1.xml>. Acesso em: 17 ago. 2025.

HADDAD, E.; et al. Fatores econômicos do desmatamento na Amazônia Legal brasileira. *Nature Sustainability*, v. 7, p. 1141-1148, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01387-7>. Acesso em: 17 ago. 2025.

HARPER, et al. 2010. Role of deep soil moisture in modulating climate in the Amazon rainforest. *Atmospheric Science*, v. 37, n. 5, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009GL042302>. Acesso em: 17 ago. 2025.

HIROTA, M.; HOLMGREN, M.; VAN NES, E. H.; SCHEFFER, M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, v. 334, p. 232-235, 2011.

HOEGH-GULDBERG, O.; JACOB, D.; TAYLOR, M.; BINDI, M.; BROWN, S.; CAMILLONI, I.; DIEDHIU, A.; DOYLE, R.; EBI, K.; ENGELBRECHT, F.; GUIOT, J.; HIJIOKA, Y.; MEHROTRA, S.; PAYNE, A.; SENEVIRATNE, S. I.; THOMAS, A.; WARREN, R.; ZHOU, G. Chapter 3: Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (eds.). *Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-*

industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

HUBAU, W.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; AFFUM-BAFFOE, K.; BEECKMAN, H.; CUNÍ-SANCHEZ, A.; DANIELS, A. K.; EWANGO, C. E. N.; FAUSET, S.; MUKINZI, J. M.; SHEIL, D.; SONKÉ, B.; SULLIVAN, M. J. P.; SUNDERLAND, T. C. H.; TAEDOUUM, H.; THOMAS, S. C.; WHITE, L. J. T.; ABERNETHY, K. A.; ADU-BREDU, S.; ZEMAGHO, L. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, v. 579, n. 7797, p. 80-87, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>. Acesso em: 17 ago. 2025.

HUNTINGFORD, C.; ZELAZOWSKI, P.; GALBRAITH, D.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; FISHER, R.; LOMAS, M.; WALKER, A. P.; JONES, C. D.; BOOTH, B. B. B.; MALHI, Y.; HEMMING, D.; KAY, G.; GOOD, P.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; ATKIN, O. K.; LLOYD, J.; GLOOR, E.; COX, P. M. Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. *Nature Geoscience*, v. 6, n. 4, p. 268-273, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/NNGEO1741>. Acesso em: 17 ago. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Resumo para formuladores de políticas*. In: H. Lee; J. Romero (eds.): *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra, Suíça: IPCC, 2023.

JAKOVAC, C. C.; et al., 2022. Strong floristic distinctiveness across Neotropical successional forests. *Science*, v. 8, n. 26, 2022. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abn1767>. Acesso em: 17 ago. 2025.

JOLLY, W. M.; COCHRANE, M. A.; FREEBORN, P. H.; HOLDEN, Z. A.; BROWN, T. J.; WILLIAMSON, G. J.; BOWMAN, D. M. J. S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, v. 6, n. 1, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>. Acesso em: 17 ago. 2025.

- JONES, et al., 2009. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature*, v. 2, p. 484-487, 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo555>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- JUNK, W. J.; et al. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). *Wetlands Ecology and Management*, v. 19, n. 6, p. 609-621, 2011.
- KELLEY, D. I.; BURTON, C.; HUNTINGFORD, C.; BROWN, M. A. J.; WHITLEY, R.; DONG, N. Technical note: Low meteorological influence found in 2019 Amazonia fires. *Biogeosciences*, v. 18, n. 3, p. 787-804, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-18-787-2021>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- KHANNA, J.; MEDVIGY, D.; FUEGLISTALER, S.; WALKO, R. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 3, p. 200-204, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate3226>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- KIMM, H.; PARK, S. W.; JUN, S. Y.; KUG, J. S. How Does Plant CO₂ Physiological Forcing Amplify Amazon Warming in CMIP6 Earth System Models?. *Earth's Future*, v. 12, n. 6, p. e2023EF004223, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2023EF004223>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- KREIBIEHL, K.; et al. Investment and finance. In: IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. [P. R. Shukla; J. Skea; R. Slade; A. Al Khourdajie; R. van Diemen; D. McCollum; M. Pathak; S. Some; P. Vyas; R. Fradera; M. Belkacemi; A. Hasija; G. Lisboa; S. Luz; J. Malley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- KUSCHNIG, M.; et al. Eroding resilience of deforestation interventions – evidence from Brazil's lost decade. *Environmental Research Letters*, v. 18, 074039, 2023.
- LANGILL, J. C.; ABIZAID, C. O que é uma inundação ruim? Perspectivas locais de inundações extremas na Amazônia peruana. *Ambio*, v. 49, p. 1423-1436, 2020.
- LAPOLA, D. M.; OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: The role of CO₂ fertilization and seasonality. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 23, n. 3, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008GB003357>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- LAPOLA, D. M.; et al. Limiting the high impacts of Amazon forest dieback with no-regrets science and policy action. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 46, p. 11671-11679, 2018.
- LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; C. ARAGÃO, E. O.; BERENGUER, E.; CARMENTA, R.; LIDDY, H. M.; SEIXAS, H.; J. SILVA, C. V.; L. SILVA-JUNIOR, C. H.; C. ALENCAR, A. A.; ANDERSON, L. O.; ARMENTERAS, D.; BROVKIN, V.; CALDERS, K.; CHAMBERS, J.; CHINI, L.; COSTA, M. H.; FARIA, B. L.; WALKER, W. S. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, 2023.
- LEE, J.-Y.; MAROTZKE, J.; BALA, G.; CAO, L.; CORTI, S.; DUNNE, J. P.; ENGELBRECHT, F.; FISCHER, E.; FYFE, J. C.; JONES, C.; MAYCOCK, A.; MUTEMI, J.; NDIAYE, O.; PANICKAL, S.; ZHOU, T. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B., eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2021.
- LENTON, T. M.; ARMSTRONG MCKAY, D. I.; LORIANI, S.; ABRAMS, J. F.; LADE, S. J.; DONGES, J. F.; MILKOREIT, M.; POWELL, T.; SMITH, S. R.; ZIMM, C.; BUXTON, J. E.; BAILEY, E.; LAYBOURN, L.; GHADIALI, A.; DYKE, J. G. The Global Tipping Points Report 2023. Exeter: University of Exeter, 2023.
- LIZUNDIA-LOIOLA, J.; OTÓN, G.; RAMO, R.; CHUVIECO, E. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v. 236, 111493, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- LOMBARDO, et al. Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. *Nature Communications*, v. 13, 3444, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- LOWE, R.; et al. Emerging arboviruses in the urbanized Amazon rainforest. *BMJ*, v. 371, 2020.
- MACDOUGALL, A. H.; FRÖLICHER, T. L.; JONES, C. D.; ROGELJ, J.; DAMON-MATTHEWS, H.; ZICKFELD, K.; ARORA, V. K.; BARRETT, N. J.; BROVKIN, V.; BURGER, F. A.; EBY, M.; ELISEEV, A. V.; HAJIMA, T.; HOLDEN, P. B.; JELTSCH-THÖMMES, A.; KOVEN, C.; MENGIS, N.; MENVIEL, L.; MICHOU, M.; ZIEHN, T. A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂. *Biogeosciences*, v. 17, n. 11, p. 2987-3016, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-17-2987-2020>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MAGALHÃES, M. P. O prístino e o devenirs na história indígena de longa duração na Amazônia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 18, n. 3, p. e20220079, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2178-2547-BGOELDI-2022-0079>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MAIA, H. C.; HARGRAVE, J. C.; GÓMEZ, J. J. C.; RÖPER, M. C. Avaliação do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento da Amazônia Legal – PPCDAm 2007–2010. Brasília, DF: CEPAL; IPEA; GIZ, 2011.

MALHI, Y.; et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, v. 319, n. 5860, p. 169–172, 2008.

MALHI, Y.; et al. 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 106, n. 49, p. 20610–20615, 2009. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0804619106>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MALHI, Y.; GARDNER, T. A.; GOLDSMITH, G. R.; SILMAN, M. Tropical Forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 39, n. 1, p. 125–159, 2014. DOI: 10.1146/annurev-environ-030713-155141.

MATTOS, et al., 2023. Double stress of waterlogging and drought drives forest–savanna coexistence. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 120, n. 33, p. e2301255120, 2023. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2301255120>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MATTOS, et al. Manutenção das Terras Indígenas é fundamental para a segurança hídrica e alimentar em grande parte do Brasil. Nota Técnica Instituto Serrapilheira, 2024.

MARENGO, J. A.; et al. Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems *Climate Change*, v. 2, n. 3, p. 253–271, 2011.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016.

MARENGO, J. A.; et al. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region. *Frontiers in Earth Science*, v. 6, 228, 2018.

MCDOWELL, N.; et al. Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist*, v. 219, n. 3, p. 851–869, 2018.

MILKOREIT, M. Cognitive capacities for global governance in the face of complexity: the case of climate tipping points In: *Global Challenges, Governance, and Complexity*. Edward Elgar Publishing, 2019.

NDC – Nationally Determined Contribution, Brasil, 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%202023%20adjustment.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.

NIAN, D.; BATHIANY, S.; BEN-YAMI, M.; BLASCHKE, L. L.; HIROTA, M.; RODRIGUES, R. R.; BOERS, N. A potential collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation may stabilise eastern Amazonian rainforests. *Communications Earth & Environment*, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01123-7>. Acesso em: 17 ago. 2025.

NOBRE, C. A.; et al. Riscos de uso da terra e mudanças climáticas na Amazônia e a necessidade de um novo paradigma de desenvolvimento sustentável. *Anais da Academia Nacional de Ciências*, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016.

NOBRE, C. A.; et al. Nova economia para a Amazônia brasileira. São Paulo: WRI Brasil, 2023. Relatório. Disponível em: <http://www.wribrasil.org.br/nova-economia-da-amazonia>. Acesso em: 17 ago. 2025.

NUNES, et al. Lessons from the historical dynamics of environmental law enforcement in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 14, 1828, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52180-7>. Acesso em: 17 ago. 2025.

O'NEILL, et al. IPCC AR6 WG2, capítulo 16, 2021.

PALAZZO CORNER, S.; JONES, C. D. Tipping Points: Climate Surprises. *Frontiers for Young Minds*, v. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frym.2021.703610>. Acesso em: 17 ago. 2025.

PAPASTEFANOU, P.; et al. Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators. *Biogeosciences*, v. 19, p. 3843–3861, 2022.

PARKER, E. R.; MO, J.; GOODMAN, R. S. The dermatological manifestations of extreme weather events: A comprehensive review of skin disease and vulnerability. *J. Climate Change Health*, v. 8, p. 100–162, 2022.

PARRY, L.; et al. Social Vulnerability to Climatic Shocks Is Shaped by Urban Accessibility. *Annals of the American Association of Geographers*, v. 108, p. 125–143, 2018.

- PARRY, I.; RITCHIE, P.; COX, P. Evidence of Amazon rainforest dieback in CMIP6 models. *EGUsphere* [preprint], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-82>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- PHILLIPS, O. L.; BAKER, T. R.; ARROYO, L.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; NÚÑEZ VARGAS, P.; SILVA, J. N. M.; TERBORGH, J.; VÁSQUEZ MARTÍNEZ, R.; ALEXIADES, M.; ALMEIDA, S.; BROWN, S.; CHAVE, J.; VINCETI, B. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976–2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 359, n. 1443, p. 381–407, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/RSTB.2003.1438>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- PUGH, T. A. M.; JONES, C. D.; HUNTINGFORD, C.; BURTON, C.; ARNETH, A.; BROVKIN, V.; CIAIS, P.; LOMAS, M.; ROBERTSON, E.; PIAO, S. L.; SITCH, S. A Large Committed Long-Term Sink of Carbon due to Vegetation Dynamics. *Earth's Future*, v. 6, n. 10, p. 1413–1463, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018EF000935>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- REQUÍA, W. J.; AMINI, H.; MUKHERJEE, R.; GOLD, D. R.; SCHWARTZ, J. D. Health impacts of wildfire-related air pollution in Brazil: a nationwide study of more than 2 million hospital admissions between 2008 and 2018. *Nature Communications*, v. 12, p. 6555, 2021.
- RITCHIE, P. D. L.; CLARKE, J. J.; COX, P. M.; HUNTINGFORD, C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature*, v. 592, n. 7855, p. 517–523, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03263-2>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ROMERO, L. S.; JACOBSON, L. da S. V.; HACON, S. de S. Mortalidade cerebrovascular: tendência e sazonalidade nas capitais brasileiras, 2000–2019. *Revista de Saúde Pública*, v. 57, n. 1, 53, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2023057004813>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ROWLAND, et al., 2015. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, v. 528, p. 119–122, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature15539>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 9, p. 9708, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007GL029695>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SALVADOR, C.; et al. Public Health Implications of Drought in a Climate Change Context: A Critical Review. *Annual Review of Public Health*, v. 44, p. 213–232, 2023.
- SAMPAIO, G.; SHIMIZU, M. H.; GUIMARÃES-JÚNIOR, C. A.; ALEXANDRE, F.; GUATURA, M.; CARDOSO, M.; DOMINGUES, T. F.; RAMMIG, A.; VON RANDOW, C.; REZENDE, L. F. C.; LAPOLA, D. M. CO2 physiological effects can cause rainfall decrease as strong as large-scale deforestation in the Amazon. *Biogeosciences*, v. 18, n. 8, p. 2511–2525, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/BG-18-2511-2021>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SANTOS DA SILVA, L. L.; et al. Maternal pre-pregnancy body mass index, gestational weight gain and child weight during the first 2 years of life in an Amazonian birth cohort. *J. Hum. Nutr. Diet. Off. J. Br. Diet. Assoc.*, v. 36, p. 1327–1338, 2023.
- SEGOVIANO-LORENZO, M. del C.; et al. Prevalência de desnutrição, anemia e helmintíase transmitida pelo solo em crianças em idade pré-escolar que vivem em populações periurbanas na Amazônia peruana. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 38, n. 11, p. e00248221, 2022.
- SCHAEFER, B. M.; KRAUSE, S. Financiamento eleitoral e representação política no Brasil durante o governo Bolsonaro (2019–2022): entre velhos e novos problemas. *Revista Uruguaya de Ciencia Política*, v. 33, n. 1, p. 1–24, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.26851/rucp.33.2>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. *Science*, v. 247, n. 4948, p. 1322–1325, 1990.
- SILVÉRIO, D.; et al. Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Phil. Trans. R. Soc. B*, v. 368, n. 1619, p. 20120427, 2013. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2012.0427>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; et al. Hydrological Changes Driven by Climate Change and Deforestation in the Amazon. *Science Advances*, v. 1, n. 6, e1500321, 2015.
- SIMPSON, S. Challenges in the Amazon Basin: Environment, Security, and Governance. Instituto Republicano Internacional, 2024. Disponível em: <https://www.iri.org/news/challenges-in-the-amazon-basin-environment-security-and-governance/>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- SKINNER, C. B.; POULSEN, C. J.; CHADWICK, R.; DIFFENBAUGH, N. S.; FIORELLA, R. P. The Role of

Plant CO₂ Physiological Forcing in Shaping Future Daily-Scale Precipitation. *Journal of Climate*, v. 30, n. 7, p. 2319–2340, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0603.1>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SOUZA, G.; DOMINGUES, E.; MAGALHÃES, A. Impactos do Crescimento Econômico com Preservação Florestal nos Biomas Amazônia e Cerrado no Brasil. *Economia da Mudança Climática*, 2024.

SPRACKLEN, et al. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, v. 489, p. 282–285, 2012. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11390>. Acesso em: 17 ago. 2025.

STAAL, A.; et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 6, p. 539–543, 2018.

STAAL, A.; FLORES, B. M.; AGUIAR, A. P. D.; BOSMANS, J. H. C.; FETZER, I.; TUINENBURG, O. A. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 4, p. 044024, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB738E>. Acesso em: 17 ago. 2025.

STAVER, C.; et al. The Global Extent and Determinants of Savanna and Forest as Alternative Biome States. *Science*, v. 334, n. 6053, p. 230–232, 2011. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1210465>. Acesso em: 17 ago. 2025.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon Tipping Point. *Science Advances*, v. 4, eaat2340, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>. Acesso em: 17 ago. 2025.

UHART, M.; et al. A 'One Health' Approach to Predict Emerging Zoonoses in the Amazon, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3549.1609>. Acesso em: 17 ago. 2025.

UITTO, J.; et al. Evaluating Transformational Change – Lessons from International Environmental Funds. In: VAN DEN BERG, R. D.; MAGRO, C.; MULDER, S. S. Evaluation for Transformational Change. Exeter, Reino Unido, p. 105–130, 2019.

VAL, A. L.; et al. Como a Bioeconomia na Amazônia Pode Contribuir para a Segurança Alimentar dos Povos Originários e Consumidores Tradicionais. In: HUNGRIA, M. (org.). *Segurança Alimentar e Nutricional: O Papel da Ciência Brasileira no Combate à Fome*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, v. 1, p. 105–115, 2024.

VALE, et al. Could a future pandemic come from the Amazon?. *Zenodo*, v. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4606591>. Acesso em: 17 ago. 2025.

VALE, et al. The COVID-19 pandemic as an opportunity to weaken environmental protection in Brazil. *Biological Conservation*, v. 255, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.108994>. Acesso em: 17 ago. 2025.

VAN DEN BERG, R. D.; MAGRO, C. Systems Assessments for Transformational Change: Challenges and Opportunities. In: VAN DEN BERG, R. D.; MAGRO, C.; MULDER, S. S. Evaluation for Transformational Change. Exeter, Reino Unido, p. 131–155, 2019.

VIEIRA, I.; TOLEDO, P.; SILVA, J.; HIGUCHI, H. Desmatamento e ameaças à biodiversidade da Amazônia. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 68, n. 4, p. 949–956, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500004>. Acesso em: 17 ago. 2025.

VILANI, et al. The first acts of Brazil's new president: Lula's new Amazon institutionalism. *Environmental Conservation*, v. 50, n. 3, p. 148–151, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0376892923000139>. Acesso em: 17 ago. 2025.

WEGNER, G. I.; MURRAY, K. A.; SPRINGMANN, M.; MULLER, A.; SOKOLOV, S. H.; SAYLORS, K.; MORENS, D. M. Averting wildlife-borne infectious disease epidemics requires a focus on socio-ecological drivers and a redesign of the global food system. *EClinicalMedicine*, v. 47, p. 101386, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101386>. Acesso em: 17 ago. 2025.

WESTERHOLD, T.; et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, v. 369, p. 1383–1387, 2020.

WILLIAMS, J. W.; JACKSON, S. T.; KUTZBACH, J. E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, p. 5738–5742, 2007.

WINCK, G. R.; et al. Socioecological vulnerability and the risk of zoonotic disease emergence in Brazil. *Science Advances*, v. 8, 2022.

WOROBAY, M.; et al. 1970's and 'Patient 0' HIV-1 genomes illuminate early HIV/AIDS history in North America. *Nature*, v. 539, p. 98–101, 2016.

ZEMP, D. C.; et al. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, v. 8, n. 1, p. 14681, 2017.





A complexidade dos efeitos das mudanças ambientais e climáticas globais, incluindo suas projeções futuras, demanda abordagens inter e transdisciplinares. Essas abordagens são essenciais para compreender as interações entre os sistemas sociais, biofísicos e ecológicos, caracterizando os riscos de impacto, a vulnerabilidade, as possibilidades de mitigação de suas causas, e as soluções de adaptação. O Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas – SIMACLIM tem como principal missão integrar pesquisas acumuladas e em curso de várias redes e grupos de pesquisa nacionais e internacionais, organizando informações e auxiliando no planejamento do Estado brasileiro para alcançar metas estabelecidas em acordos sobre Mudanças Climáticas. O SIMACLIM está sendo financiado pelo MCTI através do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT, Processo FINEP 01.22.0584.00.

<https://simacлим.com.br/>

@simacлим

Coordenação Geral:

Moacyr Cunha de Araujo Filho

Conselho Consultivo:

Aloísio Lopes de Melo (MMA)

Ana Paula Leite Prates (MMA)

Jean Pierre Henry Balbaud Ometto (Rede Clima)

Lilium Beatris Chagas de Moura (MRE)

Márcio Rojas da Cruz (MCTI)

Moacyr Cunha de Araujo Filho (Rede Clima)

Oswaldo Luiz Leal de Moraes (MCTI)

Pedro Ivo Ferraz da Silva (MRE)

Gestão Administrativa:

Leonardo Bruto Vieira da Costa

Secretaria Executiva:

Claudia von Sohsten Cavalcanti

Érica Menero

Izabelle Lima Cabral

Assessoria de Comunicação:

Pedro Zanforlin Marcondes de Carvalho

REALIZAÇÃO:



SIMACLIM

Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas

APOIO:



Rede Clima
Mudanças Climáticas
Globais no Brasil



Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



UFPE



Finep
INOVAÇÃO E PESQUISA

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



GOVERNO FEDERAL

UNIÃO E RECONSTRUÇÃO