

3. BIOMAS CONTINENTAIS E BIODIVERSIDADE FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Adalberto L. Val⁸, Ima C.G. Vieira⁹, Mariana M. Vale¹⁰,
Sérgio Lucena Mendes¹¹, Tiago da Mota e Silva⁹

INTRODUÇÃO: OS BIOMAS BRASILEIROS

O Brasil abriga seis biomas continentais – Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa – que juntos representam uma das maiores reservas de biodiversidade do planeta. Estes sistemas naturais desempenham papéis ecológicos, climáticos e socioeconômicos essenciais que transcendem as fronteiras nacionais, influenciando desde o regime hídrico sul-americano até a estabilidade do clima global.

Todos esses biomas (Figura 1) enfrentam crescentes pressões antrópicas combinadas com os efeitos das mudanças climáticas, resultando em perda de biodiversidade, degradação de habitats e risco crescente de colapso ecológico. Por mudanças climáticas, refere-se à definição da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) assinada durante a Rio-92; isto é, uma mudança no clima atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, que altera a composição

8 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. INPA. Manaus. AM

9 Museu Paraense Emílio Goeldi. MPEG. Belém. PA.

10 Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

11 Instituto Nacional da Mata Atlântica. INMA. Santa Tereza, ES.

Autor correspondente: dalval.inpa@gmail.com

da atmosfera e que se soma à variabilidade natural do clima do planeta observada ao longo dos séculos. Em outras palavras, está se tratando de alterações causadas por ação humana, como a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Embora o aumento da temperatura média global seja uma das manifestações destas mudanças mais comumente reconhecidas pelo público, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) deixa claro que elas envolvem um conjunto amplo de transformações, como: a) alterações no regime de chuvas, b) eventos climáticos extremos mais frequentes e mais intensos (ondas de calor, ciclones, enchentes, incêndios e secas), c) derretimento de geleiras, d) acidificação e aquecimento dos oceanos e, consequentemente, d) mudanças nos ecossistemas e na biodiversidade, como os que já são observados nos biomas brasileiros.

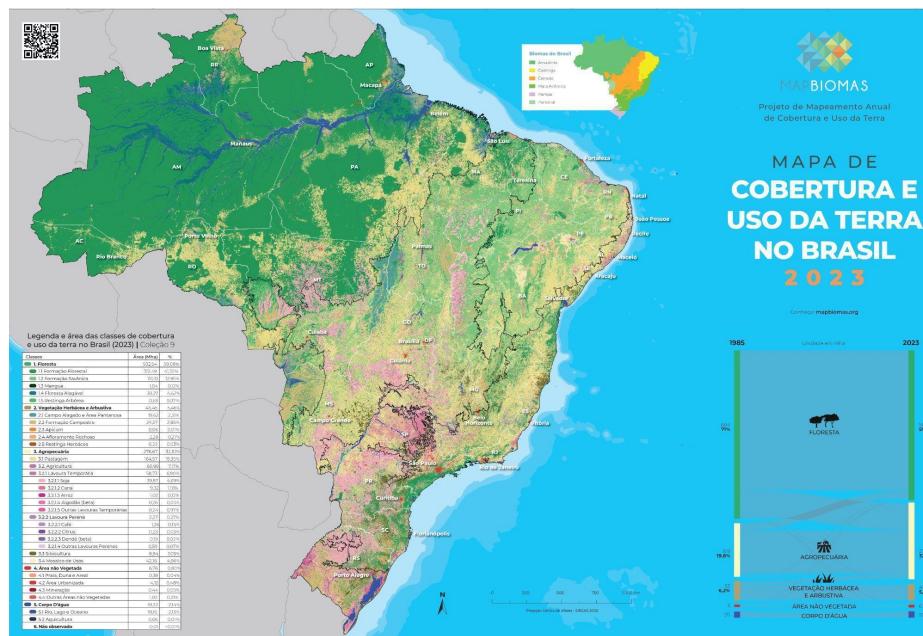


Figura 1: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil, por bioma (2023). À direita, a mudança no uso da terra, com uma redução de florestas de cerca de 71% em 1985 para 59,1% em 2023. A agricultura é responsável pela principal mudança no uso da terra na série histórica. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Colecão 9, 2023).

Frequentemente, mudanças climáticas interagem com outras pressões, como desmatamento, queimadas, sobreexploração, expansão agropecuária e a poluição, incluindo plásticos e microplásticos (Lucas et al., 2023; Souza et al., 2023). Assim, a redução desses estressores não climáticos é essencial para aumentar a resiliência da biodiversidade às mudanças climáticas (IPCC, 2022). Estudos sugerem, por exemplo, que políticas bem orientadas, como a ampliação das Unidades de Conservação em regiões de alto risco climático, podem reduzir em até 21% o impacto climático esperado sobre a biodiversidade brasileira (Vale et al., 2018; Malecha et al., 2023).

Estudos como o de Urban (2024) indicam que o risco de extinção de espécies aumenta exponencialmente com o aquecimento global: um cenário de emissões mais elevadas ameaçaria aproximadamente um terço das espécies do planeta. No Brasil, esse impacto será particularmente severo em regiões de transição e em ecossistemas fragmentados, como os da Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga. Modelagens ecológicas e climáticas concluem que certas transições de cobertura vegetal podem ser irreversíveis se cruzarem limites críticos de temperatura e umidade. O estudo de Boit et al. (2016) aponta que, mesmo sob cenários otimistas de mitigação a essas mudanças de temperatura e umidade, a combinação entre mudanças climáticas e uso da terra pode induzir a degradação florestal, substituindo ecossistemas tropicais biodiversos por sistemas pobres tanto em espécies quanto em funcionalidade ecológica. Esses pontos de inflexão, uma vez alcançados, comprometem a resiliência climática regional, alteram o regime hidrológico e intensificam as emissões líquidas de carbono que, em última instância, influenciam os modos de vida humanos em todas as regiões do planeta.

Por outro lado, o trabalho de Warren e colaboradores (2018) demonstra que limitar o aquecimento a 2°C, conforme previsto no Acordo de Paris, pode dobrar a capacidade das áreas protegidas de atuar como refúgios climáticos. Essa constatação é particularmente relevante para o Brasil, que abriga uma rede de Unidades de Conservação em expansão, mas ainda marcada por lacunas regionais e déficits de conectividade (Encalada et al., 2024). Estudos realizados no Brasil indicam que a atual rede de áreas protegidas do país é insuficiente para garantir a conservação da biodiversidade diante das mudanças climáticas (Malecha et al., 2023).

Apesar dos desafios impostos por essa crise convergente, o Brasil tem capacidade de liderar respostas inovadoras. O país desenvolveu uma

consistente arquitetura institucional de políticas ambientais, exemplificada pelo sucesso histórico do Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia (PPCDAm), que reduziu o desmatamento em 32,4% de 2023 para 2024 (MapBiomas, 2025). Programas nacionais de conservação, sistemas de monitoramento por satélite como o Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) e o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), o mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Legal por meio do programa TerraClass, redes científicas consolidadas, como o Programa Ecológico de Longa Duração (PELD) e Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio), somados ao compromisso nacional de restaurar 12 milhões de hectares de floresta até 2050, posicionam o Brasil como potencial protagonista em soluções baseadas na natureza. Além disso, a rica diversidade de conhecimentos tradicionais mantidos por povos indígenas e comunidades locais oferece estratégias de conservação e manejo sustentável que podem ser integradas às políticas de adaptação climática.

Este capítulo busca organizar e analisar o estado atual do conhecimento científico sobre os impactos das mudanças climáticas nos biomas brasileiros, identificando vulnerabilidades específicas, lacunas de conhecimento e oportunidades para estratégias integradas de conservação e adaptação. Na seção Impactos Climáticos nos Biomas Brasileiros, explica-se quais são os cenários de mudanças climáticas no Brasil e como cada um desses biomas responderia aos desafios impostos por ela. Em Ciência, Tecnologia e Inovação para a Conservação diante das mudanças climáticas, discute-se os promissores desenvolvimentos científicos para enfrentar tais desafios. Em Políticas Públicas, Governança e Instrumentos Econômicos, apresenta-se iniciativas de política e governança, informadas pelo melhor conhecimento científico disponível, que permitiriam evitar os cenários de mudança climática de maior prejuízo aos brasileiros e brasileiras. Por fim, a seção Estratégias Integradas de Conservação Climática discute prioridades e maneiras de implementação de soluções diante dos principais diagnósticos levantados ao longo do capítulo.

IMPACTOS CLIMÁTICOS NOS BIOMAS BRASILEIROS

As projeções climáticas para o Brasil revelam cenários preocupantes. Estima-se que o país possa experimentar um aumento médio das

temperaturas variando entre 3 e 6 °C até o final do século XXI, dependendo das trajetórias de emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2021). As projeções climáticas, resultantes de modelos evolutivos globais e regionais elaborados pelo IPCC e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), indicam que os padrões de temperatura e precipitação variam consideravelmente entre as diferentes regiões do país. O estudo de Malhi e colaboradores (2020) destaca que as regiões Norte e Centro-Oeste, que abrigam grandes extensões da Amazônia e do Cerrado, enfrentarão um aumento expressivo de temperatura com uma redução na precipitação anual e maior frequência de eventos de seca severa.

Na região Sul, os cenários também apontam para um aumento de temperatura, mas com uma expectativa de elevação do volume de chuvas. Essa combinação poderá intensificar eventos de inundação, especialmente em áreas como o Pampa e a Mata Atlântica. A pesquisa de Braga e Laurini (2024) sugere que esses episódios extremos de clima afetam negativamente a biodiversidade e a produtividade agrícola, agravando os desafios econômicos e sociais. Segundo os autores, identificou-se variações significativas nos padrões de aquecimento nas diferentes regiões do país entre 1961 e 2023. Em particular, destaca-se uma tendência de aumento das temperaturas observadas no bioma Amazônia, com uma elevação de 1,12°C no período, e no Cerrado, que apresentou um crescimento de 0,85°C — biomas que também sofreram com os maiores acumulados de desmatamento nos últimos 40 anos. Por outro lado, o Pantanal e o Pampa registraram aquecimentos mais modestos, de 0,17°C e 0,37°C, respectivamente.

Os cenários climáticos projetados implicam em transformações significativas nas distribuições de vegetação e nos regimes hídricos dos biomas brasileiros. Simulações realizadas por Malecha e colaboradores (2023) indicam que, sob um cenário de altas emissões de gases de efeito estufa (SSP5-8.5), haverá uma redução drástica das áreas adequadas para espécies-chave da Mata Atlântica e do Cerrado. Além disso, a degradação florestal progressiva da borda leste da Amazônia poderá se intensificar, o que põe em risco a biodiversidade já ameaçada na região (Santos et al., 2023). Essas alterações climáticas projetadas resultam em uma perda potencial de 20% a 30% da biodiversidade brasileira até 2100, com consequências mais severas para os biomas que já enfrentam fragmentação ou degradação prévia, como a Caatinga e o Pantanal (Santos et al., 2023). Trata-se de um contexto alarmante, de prejuízo da capacidade dos

biomas de prover serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação hídrica e captura de carbono.

Projeções climáticas recentes apontam que, em cenários de altas emissões (SSP5-8.5), a Amazônia poderá registrar até o final do século um aumento de 4,5 a 5,2 °C na temperatura média, acompanhado de uma redução de até 20% na precipitação anual, especialmente na porção oriental da floresta (IPCC, 2021; Malhi et al., 2020). No Cerrado, espera-se um aquecimento de até 5 °C e diminuição de até 15% nas chuvas anuais (IPCC, 2021; Marengo et al., 2022). Para a Mata Atlântica, as estimativas indicam um aumento de até 4,5 °C na temperatura média e redução próxima a 10% na precipitação (Ribeiro et al., 2011). Já na Caatinga, o cenário é de aquecimento de até 4,5 °C e queda de até 50% nas chuvas, agravando o déficit hídrico do bioma (PBMC, 2013). No Pantanal, as projeções indicam aquecimento de até 4,5 °C e redução das chuvas em até 45% (PBMC, 2013). O Pampa, por sua vez, poderá enfrentar um aumento de até 3,8 °C na temperatura média, mas com incremento significativo tanto na precipitação quanto na frequência de eventos extremos de chuva (Castellanos et al., 2022) (Figura 2).

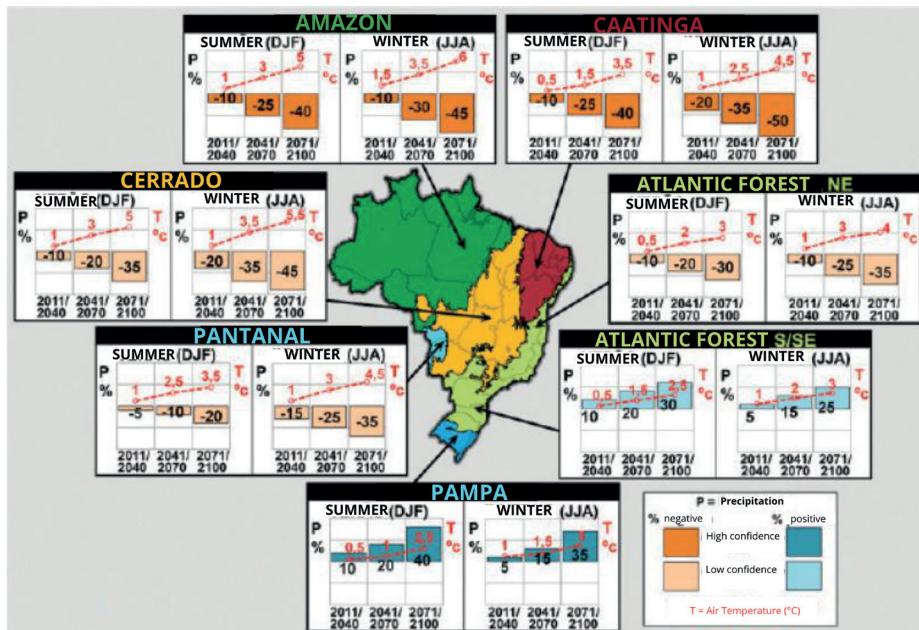


Figura 2: Projeções regionalizadas de clima nos biomas brasileiros da Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica, e Pampa para os períodos de início

(2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071-2100), baseados nos resultados científicos de modelagem climática global e regional. Regiões com diferentes cores no mapa indicam o domínio geográfico dos biomas. Fonte: Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC. 2013. Base científica das mudanças climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – Sumário Executivo. Rio de Janeiro: PBMC. ISBN: 978-85-285-0208-4.

Em síntese, os cenários climáticos projetados para o Brasil indicam que o país deverá ter um futuro mais quente, com chuvas menos prevíveis e eventos climáticos extremos mais intensos e frequentes. Cada bioma responderá de maneira distinta às pressões climáticas, tornando essencial o avanço em modelagens ecológicas específicas e a integração de diferentes cenários socioeconômicos nas políticas públicas de conservação e adaptação. A compreensão desses padrões é fundamental para o desenvolvimento de estratégias adaptativas e de mitigação que considerem as especificidades regionais e os mecanismos de retroalimentação entre mudanças climáticas e uso da terra no Brasil.

As alterações observadas nos padrões de temperatura e de precipitação já estão impactando o funcionamento dos ecossistemas em praticamente todas as regiões brasileiras. Estudos recentes mostram vulnerabilidades específicas em cada um dos biomas, que são detalhadas a seguir:

Impactos na Amazônia

As mudanças climáticas estão levando ao aumento da mortalidade de árvores, redução da biomassa florestal e episódios mais frequentes de incêndios, resultando em perda de biodiversidade e diminuição dos serviços ecossistêmicos (Pinho et al., 2020). As áreas florestais do centro-leste e sudeste da bacia amazônica apresentam resiliência diminuída, coincidindo com o aumento da atividade humana no arco do desmatamento (Hirota et al., 2011) (Figura 3).

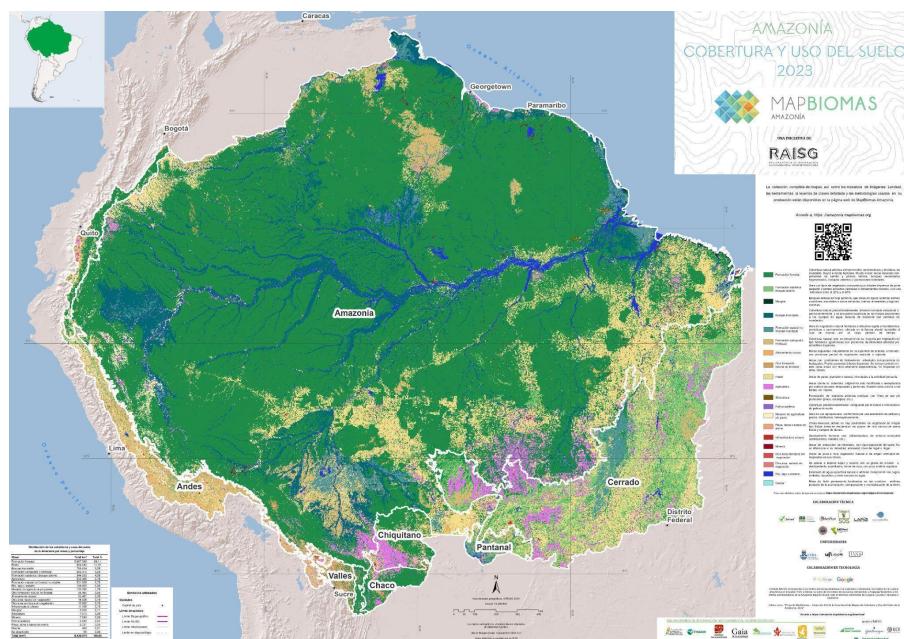


Figura 3: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Pan-Amazônia (2023) mostra a transição de uma ampla faixa, de Rondônia, passando pelo sul do Amazonas até o Pará, para pastagens. Conhecida como "Arco do Desmatamento", essa região demonstra resiliência reduzida dos ecossistemas à emergência climática. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9, 2023).

A combinação de aquecimento e redução hídrica favorece um processo de degradação florestal, no qual a floresta úmida perde sua estrutura arbórea e diversidade, evoluindo para uma paisagem mais aberta, com a perda de espécies que exigem condições mais úmidas e, portanto, conduzindo à menor capacidade de reciclagem de água no bioma (Nobre et al., 2016). Esse risco é amplificado pela degradação por atividades humanas, visto que o desmatamento acelerado tem sido um gatilho para alterações no ciclo hidrológico e aumento da temperatura regional. Segundo Silva Junior e colaboradores (2021), a taxa de desmatamento em 2020 foi a mais alta da década, superando 10.000 km², com impactos que extrapolam a perda de vegetação: esses distúrbios acumulados já comprometem a capacidade da floresta em atuar como sumidouro de carbono e regulador climático.

A interação entre desmatamento, queimadas e fragmentação florestal reduz a resiliência ecológica e pode levar ao chamado ponto de

inflexão amazônico, um limiar além do qual a floresta não conseguiria mais se regenerar, alterando permanentemente seu equilíbrio funcional e levando a um colapso hidrológico. Estima-se que esse ponto de inflexão seria atingido com a combinação de um desmatamento de 20 a 25% da Amazônia, combinado a um aumento de 2 a 2,5 °C de temperatura média global em relação ao período pré-industrial (Nobre & Borma, 2009; Lovejoy & Nobre, 2018). Este ponto pode estar próximo: cerca de 19% da floresta amazônica já foi desmatada, segundo os dados do MapBiomas (1985-2022), e a temperatura média global já aumentou cerca de 1,47 °C acima do nível pré-industrial (NASA, 2025).

Modelagem de nicho ecológico aponta que até 43% das espécies vegetais amazônicas poderão perder ao menos 30% de sua área de ocorrência até 2070 (Esquivel-Muelbert et al., 2019). De cerca de 8.000 espécies avaliadas na Amazônia, incluindo milhares de espécies de plantas, e centenas de espécies de vertebrados (sobretudo mamíferos e aves) e invertebrados (abelhas), 26% podem entrar em risco de extinção devido às mudanças climáticas em cenários pessimistas de emissão de gases de efeito estufa, caindo para 14% em um cenário de cumprimento das metas do Acordo de Paris (Malecha et al., 2024).

Outro aspecto crítico nestes cenários é a perda do papel da floresta como sumidouro de carbono. Pesquisas de longo prazo mostram que o balanço de carbono da Amazônia tem se enfraquecido; em outras palavras, o bioma tem perdido sua capacidade de absorver o carbono lançado na atmosfera, o que prejudica a mitigação das mudanças climáticas ligadas aos gases de efeito estufa. Em algumas áreas degradadas, a floresta já emite mais carbono do que absorve, especialmente nas bordas fragmentadas sujeitas a queimadas (Gatti et al., 2021). Essa inversão representa um risco não apenas para a biodiversidade regional, mas para os esforços globais de mitigação climática.

Mesmo em áreas com florestas intactas a fauna está vulnerável às mudanças climáticas, como evidenciado pela redução na taxa de sobrevivência de aves em decorrência de estações secas mais rigorosas na Amazônia ao longo dos últimos 27 anos (Wolfe et al., 2025). O estudo prevê que o aumento de 1°C na temperatura média da estação seca reduz a sobrevivência média da comunidade de aves do sub-bosque em 63%.

O aumento de temperaturas, aliado à poluição, falta de oxigênio e acidificação da água, afeta gravemente a saúde dos peixes na Amazônia. Trabalhos como os de Campos e colaboradores (2019) e Braz-Mota & Val

(2024) evidenciam que o estresse térmico crônico compromete o metabolismo aeróbico dos peixes, reduzindo sua eficiência energética e aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), que são moléculas agressivas ao organismo. Esses estresses ativam mecanismos de defesa celular e hormonal que, embora tentem proteger o animal, consomem muita energia e prejudicam funções essenciais como o crescimento, a reprodução e a imunidade (Pörtner, 2010). Esses distúrbios podem estar associados a eventos de mortandade em massa de peixes durante secas extremas na Amazônia entre 2023-2024 (Braz-Mota & Val, 2024).

A vulnerabilidade da Amazônia não se distribui de forma uniforme. Regiões como o Arco do Desmatamento (sul e leste da Amazônia) concentram os maiores índices de degradação e, portanto, são mais vulneráveis (Rorato et al., 2022). Já áreas de floresta contínua no noroeste ainda apresentam maior resiliência climática relativa. No entanto, mesmo essas áreas estão expostas a eventos extremos, como secas históricas e inundações recordes, exacerbadas por mudanças no padrão de circulação atmosférica.

Impactos no Cerrado

O aquecimento no Cerrado intensificará os períodos secos, afetando diretamente o funcionamento ecológico do bioma, incluindo a regeneração natural, os ciclos de polinização e a dinâmica dos aquíferos (Martinelli et al., 2021). A aridificação progressiva poderá converter grandes porções do bioma em paisagens semiáridas ou até mesmo estepes degradadas (Colman et al., 2024). Esse processo de transformação do bioma indica um alto risco de extinção de espécies (Muniz, Lemos-Filho & Lovato, 2024). Estudos de modelagem ecológica indicam que até 35% das espécies vegetais do Cerrado poderão enfrentar extinção regional até meados do século XXI (Poteau & Birnbaum, 2016). A perda de espécies-chave, como polinizadores e dispersores, compromete também a sustentabilidade da agricultura regional, demonstrando a interdependência entre conservação e produção.

De acordo com Castro (2023), 91,6% das Unidades de Conservação (UCs) do Cerrado apresentam risco climático alto ou moderado, sobretudo pela sua fragmentação, localização em áreas de alta pressão agrícola e limitada efetividade de gestão. A cobertura de áreas protegidas ainda é desproporcionalmente baixa: apenas cerca de 8,5% do território

(Figura 4) está formalmente protegido, sendo que a maioria se concentra em categorias com uso sustentável, frequentemente sujeitas à fragilidade regulatória.

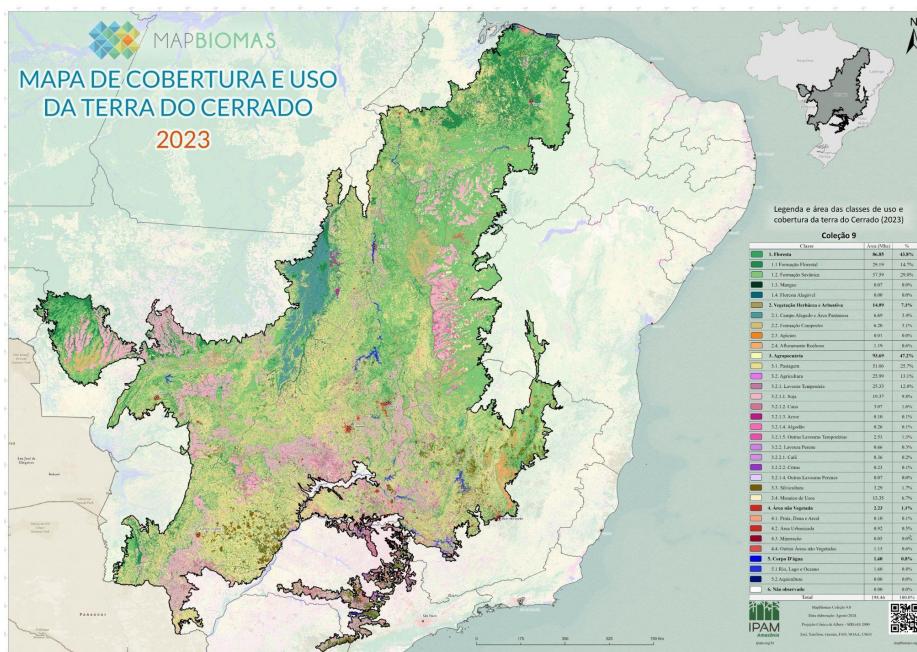


Figura 4: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Cerrado. A agricultura representa 47,2% do uso da terra no bioma. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Colecão 9. 2023).

Outro fator agravante no bioma são os incêndios frequentes, utilizados tradicionalmente como ferramenta de manejo agropecuário. Embora o Cerrado seja um bioma fogo-dependente, no contexto atual de mudanças climáticas, essas queimadas assumem proporções destrutivas, interrompendo o ciclo de nutrientes do solo, degradando os bancos de sementes e comprometendo espécies vegetais adaptadas a regimes de fogo menos intensos (Pivello, 2011). Além disso, a exposição prolongada a incêndios reduz a capacidade do Cerrado de atuar como sumidouro de carbono, transformando-o potencialmente em uma fonte líquida de emissões.

Impactos na Mata Atlântica

De cerca de 1.300 espécies avaliadas na Mata Atlântica, incluindo dezenas de espécies de plantas e centenas de espécies de vertebrados (mamíferos, anfíbios e aves) e de invertebrados (sobretudo mariposas), 31% podem entrar em risco de extinção devido às mudanças climáticas em cenários pessimistas de emissão de gases de efeito estufa, caindo para 20% em um cenário de cumprimento das metas do Acordo de Paris (Malecha et al., 2024). A fragmentação severa da Mata Atlântica é um agravante para este cenário. Afinal, esta impõe barreiras ecológicas à dispersão de espécies, o que reduz sua capacidade adaptativa frente às mudanças ambientais. A maioria das populações de flora e fauna (Figura 5) está atualmente confinada a remanescentes florestais menores que 50 hectares, o que compromete o fluxo gênico e facilita o estabelecimento de espécies exóticas invasoras (Ribeiro et al., 2009).

Estudos de modelagem de distribuição de espécies indicam que a elevação térmica poderá forçar deslocamentos altitudinais de espécies em até 300 metros, o que, em regiões montanhosas fragmentadas, pode levar ao isolamento ou extinção local devido à baixa mobilidade ou às restrições ecológicas (Elith & Leathwick, 2009).

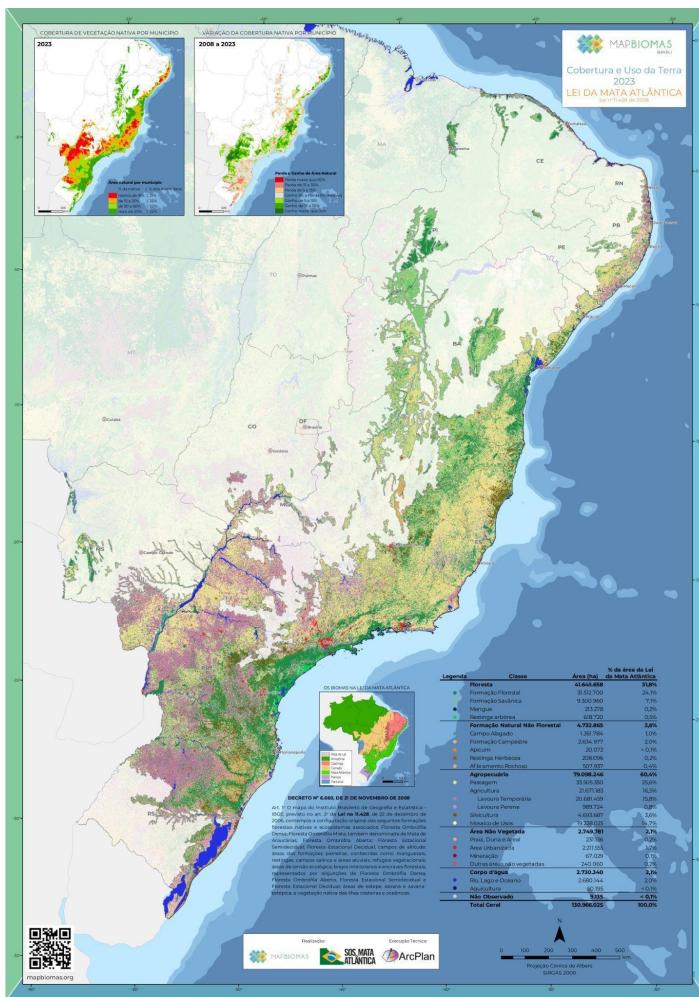


Figura 5: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Mata Atlântica. Apenas 31,8% do território corresponde a áreas de vegetação nativa. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023).

Em um estudo ecológico de longa duração realizado em Santa Catarina, observou-se que 27% das comunidades arbóreas apresentaram deslocamento altitudinal ascendente, enquanto 15% mostraram deslocamento descendente (Bergamin et al. 2024). Os deslocamentos ascendentes ocorreram principalmente em áreas de floresta montana, onde foi registrado um aumento de $0,34^{\circ}\text{C}$ na temperatura. Já os deslocamentos descendentes predominaram nas florestas de baixada, onde houve uma

redução de 0,36°C. Trata-se do primeiro registro de deslocamento altitudinal em resposta às mudanças climáticas no Brasil.

A urbanização acelerada em áreas de Mata Atlântica, especialmente no eixo Rio-São Paulo, gera pressão sobre nascentes, mananciais e encostas, comprometendo não apenas a biodiversidade, mas também a segurança hídrica regional. A poluição difusa e a impermeabilização do solo contribuem para processos erosivos e instabilidade geotécnica, resultando em risco socioambiental crescente, como deslizamentos de terras ou inundações em áreas altamente povoadas (Ribeiro et al. 2011).

Impactos na Caatinga

A Caatinga figura entre os biomas mais vulneráveis às mudanças climáticas, sobretudo pela combinação de fatores climáticos adversos, degradação antrópica e fragilidade socioeconômica regional. As projeções de aquecimento e redução de precipitação indicam períodos de seca prolongada, intensos, ampliando a desertificação e comprometendo o equilíbrio hidrológico de bacias como a do Rio São Francisco (Beuchle et al., 2015; IPCC, 2021). De fato, já se observa um aumento na duração das secas associado a um quadro de mudanças climáticas (Castellanos et al., 2022) (Figura 6).

A escassez hídrica, já crônica na região, é agravada pela degradação ambiental contínua, como desmatamento para produção de lenha e carvão, sobrepastoreio e uso insustentável da terra. Estima-se que mais de 45% da Caatinga esteja em processo avançado de degradação edáfica e perda de cobertura vegetal (Beuchle et al., 2015). Esse cenário reduz a capacidade do solo em reter umidade e reciclar nutrientes, afetando a regeneração natural e comprometendo a segurança alimentar das populações locais.

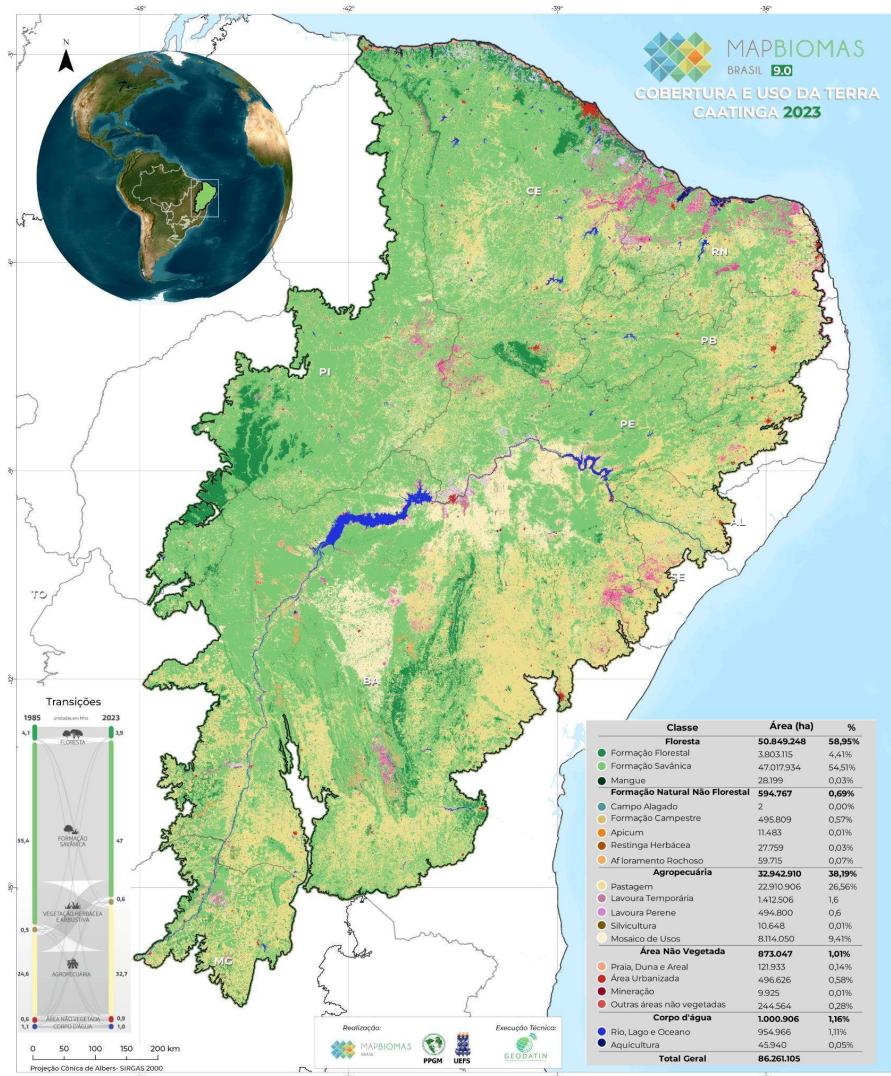


Figura 6: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Caatinga. Entre 1985 e 2023, áreas florestais, formações savânicas e vegetação arbustiva deram lugar à expansão da agricultura, que correspondeu a 32,7% do uso da terra em 2023. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023)

Espécies vegetais e animais adaptadas ao clima seco, como a aroeira (*Myracrodroon urundeuva*) e o tatu-bola (*Tolypeutes tricinctus*), enfrentam desafios inéditos de sobrevivência frente ao aumento da temperatura e ao colapso dos ciclos hídricos. Muitas dessas espécies possuem bai-

xa capacidade de dispersão, o que limita sua resposta adaptativa frente ao deslocamento de suas zonas de conforto climático (Braga & Laurini, 2024). Modelagens indicam que, sob cenários extremos, até 99% dos arranjos vegetacionais da Caatinga podem perder espécies até meados do século, indicando forte risco de extinções regionais (Moura et al., 2023).

Impactos no Pantanal

Nos últimos anos, eventos de seca extrema e megaincêndios têm gerado efeitos ecológicos severos no Pantanal. Entre 2019 e 2020, o bioma enfrentou a pior seca dos últimos 60 anos, reduzindo drasticamente a extensão das áreas alagadas e comprometendo a fauna e flora adaptadas ao ciclo hidrológico sazonal (Marengo et al., 2021). Além da redução das chuvas, o aumento das temperaturas e o prolongamento da estação seca contribuem para condições propícias à propagação de incêndios, muitos dos quais são iniciados por ação humana. A ausência de planejamento territorial integrado e a expansão da agropecuária nas bordas do bioma agravam este cenário (Figura 7).

A biodiversidade pantaneira, altamente especializada, sofre com a perda de habitats aquáticos e terrestres. Espécies como a ariranha, o cervo-do-pantanal e o tuiuiú estão entre as mais afetadas. Harris et al. (2005) destacam que a fragmentação dos ambientes naturais, a pesca predatória e espécies invasoras somam-se aos impactos climáticos como principais ameaças à resiliência ecológica do bioma.

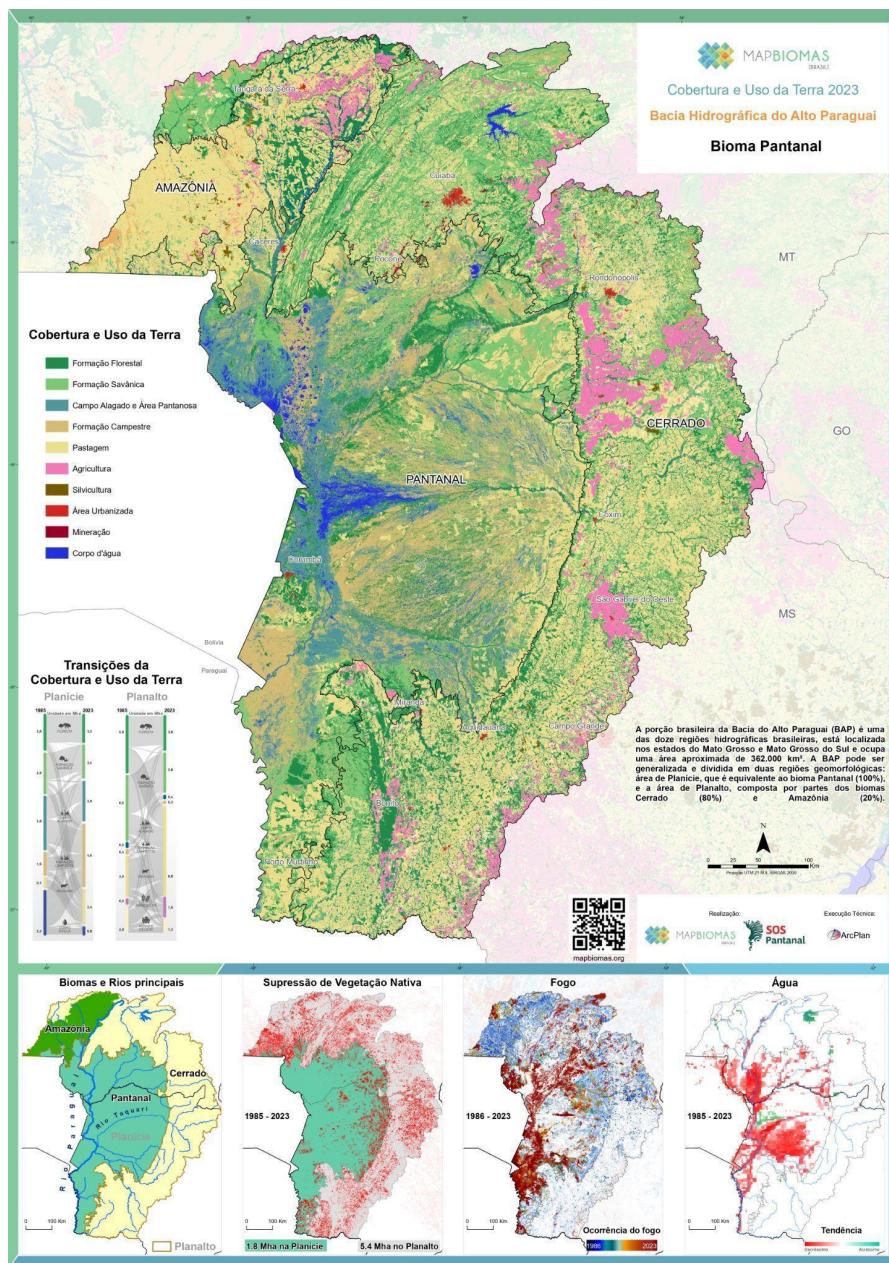


Figura 7: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Pantanal (2023), com destaque para o aumento da incidência de fogo e para a perda de superfície de água no bioma entre 1985 e 2023. Fonte: Mapbiomas (2023). Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9.

Impactos no Pampa

Já se observa crescimento nas taxas de precipitação (até 12%) em algumas regiões do bioma Pampa, o que tem provocado intensificação de processos erosivos, degradação do solo e alteração dos regimes hídricos (Overbeck et al., 2007). Adicionalmente, há uma maior frequência observada de ciclones extratropicais na região, que deve se intensificar no futuro (Castellanos et al., 2021). Além disso, a resiliência do bioma está gravemente comprometida pela substituição da vegetação nativa por monoculturas de soja, arroz e pastagens exóticas. Mais de 50% de sua cobertura original já foi convertida para uso agropecuário, e menos de 2,5% do território encontra-se formalmente protegido por Unidades de Conservação — o menor índice entre os biomas brasileiros (Roesch et al., 2009). Essa transformação promove erosão do solo e declínio da biodiversidade, o que, por sua vez, conduz à perda de serviços ecossistêmicos, como regulação hidrológica e captura de carbono (Roberti et al., 2024) (Figura 8).

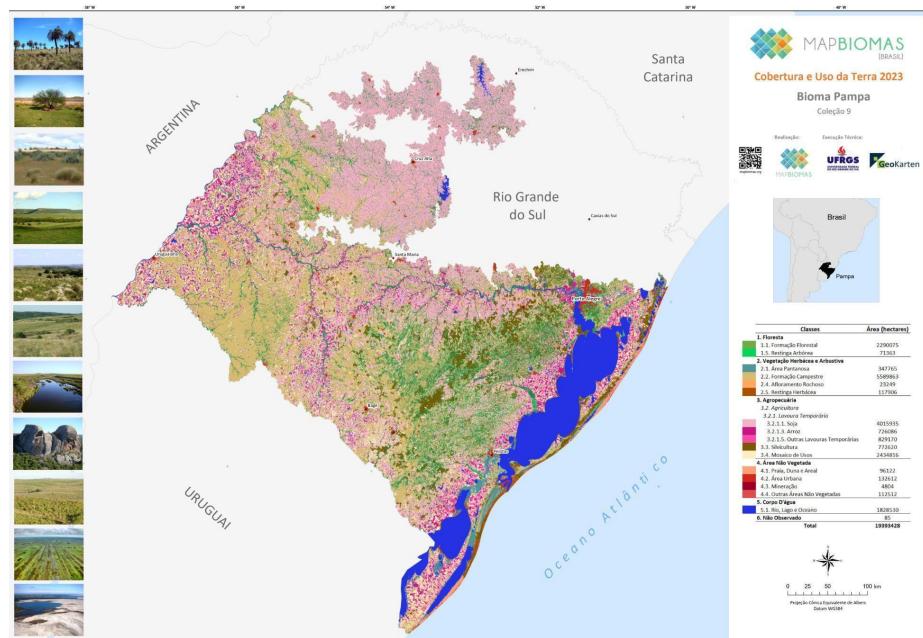


Figura 7: Mapa de Cobertura e Uso da Terra nos Pampas. Apenas 3% do bioma é protegido em uma região onde a agricultura é predominante como uso da terra. Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023.

Progressos e Lacunas no conhecimento científico atual

O conhecimento científico sobre os impactos das mudanças climáticas nos biomas brasileiros avançou substancialmente na última década, impulsionado por bases de dados biológicos, ciência aberta, novos modelos climáticos regionais, redes de monitoramento ecológico e a crescente integração entre sistemas de sensoriamento remoto e dados de biodiversidade. De fato, o Brasil é, hoje, um dos países com mais estudos sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre sua biodiversidade (Manes, et al., 2021; Manes & Vale, 2022). Entretanto, esse avanço é marcado por uma distribuição desigual de esforços científicos, com forte viés geográfico e taxonômico, que limita a capacidade do país de oferecer uma resposta sistêmica e territorialmente equitativa à crise climática (Malecha et al. 2025).

Assim, os riscos concretos identificados pela pesquisa científica ainda refletem uma realidade parcial, ancorada nos biomas mais estudados - Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica - e em grupos biológicos mais visíveis, como mamíferos, anfíbios, aves e plantas vasculares. Já biomas como o Pantanal, Caatinga e Pampa permanecem sub-representados nas bases de dados, com cobertura científica limitada e esparsamente distribuída. Um exemplo eloquente é a síntese recente de estudos sobre mudanças climáticas e biodiversidade no Brasil, que encontrou apenas 8% dos estudos na Caatinga, 3% no Pampa e 1% no Pantanal (Malecha et al. 2024). O Pantanal, embora reconhecido por sua importância hidrológica e pela riqueza de fauna aquática, carece de modelagens integradas que considerem simultaneamente cenários climáticos, regime de cheias e vulnerabilidade das populações locais. A Caatinga, por sua vez, apesar de ser o único bioma exclusivamente brasileiro, é negligenciada em análises globais e nacionais, especialmente no que se refere à sua microbiota, polinizadores nativos e dinâmica de regeneração sob estresse hídrico.

As lacunas não são apenas espaciais, mas também taxonômicas, funcionais e conceituais. Na síntese de Malecha e colaboradores (2024), 40% dos estudos são com plantas vasculares, 43% com vertebrados terrestres e 13% com artrópodes, dos quais a maioria consiste em mariposas e abelhas. Outros invertebrados, fungos, microrganismos, organismos do solo e espécies aquáticas continuam ausentes da maioria das avaliações de risco climático. Ecossistemas costeiros, como manguezais, recifes e estuários, também são sistematicamente excluídos das agendas de avaliação climática terrestre, apesar de sua conexão funcional com os gran-

des biomas. Além disso, há escassez de estudos no Brasil que explorem respostas ecológicas sistêmicas, como colapsos tróficos, sincronia de eventos fenológicos ou perda de conectividade funcional (Encalada et al., 2024) sob cenários de aquecimento global (Artaxo, 2020).

Outra lacuna está no número limitado de estudos que integrem modelagens climáticas com variáveis socioeconômicas e cenários de políticas públicas. A maioria dos modelos atuais opera com parâmetros ambientais idealizados, distantes da realidade territorial brasileira, marcada pela desigualdade de acesso à governança ambiental, pela vulnerabilidade social e pela ausência de planejamento adaptativo em escala subnacional. Como indicam Milhorance e colaboradores (2018), a adaptação efetiva às mudanças climáticas no Brasil requer não apenas conhecimento técnico, mas também coordenação interinstitucional e a integração de políticas públicas multissetoriais nos territórios.

CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A CONSERVAÇÃO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas à biodiversidade brasileira requer uma transformação na forma como mobilizamos ciência, tecnologia e inovação. A complexidade dos sistemas socioecológicos demanda abordagens integradas, baseadas em evidências, multiescalares e interdisciplinares, capazes de antecipar riscos, orientar decisões e promover a resiliência ecológica e social. Modelos ecológicos e climáticos de alta resolução, sensoriamento remoto por satélite, bioindicadores moleculares, genética da conservação, inteligência artificial aplicada ao monitoramento ambiental e estratégias de restauração em paisagens funcionalmente degradadas constituem, hoje, o núcleo de uma agenda científica emergente e urgente.

A convergência entre ciência e inovação tecnológica não apenas expande nossa capacidade de observar e compreender os impactos ambientais em tempo real, mas também apoia a tradução de dados em decisões estratégicas, a conversão do conhecimento em políticas públicas adaptativas e a transformação de evidências em esperança concreta de reversão de cenários de colapso. Neste contexto, o Brasil tem a oportunidade – e a responsabilidade – de liderar soluções inovadoras ancoradas na ciência, que combinem a riqueza de sua biodiversidade com o poder

transformador da tecnologia e da governança colaborativa. A seguir, discutem-se as frentes da ciência, da tecnologia e da inovação que apoiam para uma conservação climática eficaz e baseada em evidências.

Integração de modelagem dos impactos das mudanças climáticas com políticas públicas

A compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre os biomas brasileiros depende da consolidação de sistemas de monitoramento ambiental capazes de integrar múltiplas escalas espaciais e temporais, aliando dados ecológicos, climáticos e de uso da terra. O avanço em modelagem multibioma, com base em inteligência artificial, algoritmos preditivos e simulações baseadas em cenários, tem permitido antever trajetórias críticas de transição ecológica, colapso funcional e reorganização de ecossistemas.

A integração de dados de modelagem com políticas públicas é um dos caminhos mais promissores para a conservação climática. No bioma Mata Atlântica, por exemplo, estudos como os de Ribeiro e colaboradores (2009) e de Rezende e colaboradores (2018) demonstram que a restauração de 5,2 milhões de hectares de áreas de passivo legal poderia ampliar a cobertura florestal de 28% para 35%, superando o limiar ecológico mínimo necessário à manutenção da conectividade funcional (Encalada et al., 2024). Tais projeções, ancoradas em modelagem espacial e análise multicritério, permitem identificar áreas prioritárias para conexão de fragmentos florestais e implementação de corredores ecológicos.

Avanços em modelagem multibioma têm também fortalecido a capacidade preditiva frente a eventos extremos, como secas prolongadas, inundações e incêndios, permitindo o desenvolvimento de sistemas de alerta antecipado e mecanismos de avaliação de riscos territorializados. Ao integrar dados de biodiversidade com variáveis climáticas e socioeconômicas, esses modelos tornam-se ferramentas centrais na formulação de estratégias de adaptação e mitigação sob diferentes cenários de governança.

Inovação Ecofisiológica e Bioindicadores

O uso de bioindicadores fisiológicos e moleculares, como a ativação de mecanismos antioxidantes em organismos como tentativa de evitar danos celulares diante de temperaturas altas, tem se consolidado como uma das abordagens mais eficazes para avaliar o risco ecológico em ecossistemas tropicais aquáticos, especialmente na Amazônia. Esses biomarcadores, quando integrados a modelos ambientais e climáticos, oferecem sistemas precoces de alerta ecológico e subsidiam políticas públicas adaptativas, orientadas por risco biológico real (Dalzochio et al., 2016). Sua aplicação permite priorizar regiões e espécies mais vulneráveis, fortalecendo a resiliência dos sistemas aquáticos amazônicos frente às rápidas mudanças ambientais (Souza et al., 2025).

Soluções baseadas na natureza

A conservação da biodiversidade brasileira frente às mudanças climáticas não se limita a estratégias de contenção de danos. No caso brasileiro, soluções baseadas na natureza podem mitigar aproximadamente 80% da meta líquida de emissões até 2050 (Soterroni et al., 2023). Essas condições colocam o Brasil em uma posição estratégica para liderar políticas globais de mitigação e adaptação climática integradas à conservação da biodiversidade.

Existem evidências sólidas de que as soluções baseadas na natureza promovem a adaptação climática, protegendo os serviços ecossistêmicos que aumentam a nossa resiliência (Manes et al., 2022). Os habitats costeiros reduzem em 2,5 vezes os riscos associados às mudanças climáticas para o litoral brasileiro, como ciclones extratropicais, erosão costeira e inundações relacionadas à elevação do nível do mar (Manes et al., 2023). Na cidade do Rio de Janeiro, as florestas dentro de Unidades de Conservação reduzem a temperatura em 4oC e o risco de inundações em 20%, dois fatores que tendem a se agravar com as mudanças climáticas (Martins et al., 2024; Malecha et al., 2024). Os serviços ecossistêmicos que aumentam a nossa resiliência não são providos apenas pela vegetação, mas também pela nossa riquíssima fauna. No Brasil, 82% dos mamíferos provê pelo menos um serviço ecossistêmico (Vale et al. 2023). São 575 espécies que fornecem serviços como polinização, controle de pragas, doenças e roedores, além do ecoturismo, contribuindo para a economia, a segurança alimentar e a saúde da população.

Além da ampliação e consolidação das áreas protegidas, outras estratégias de mitigação baseadas na natureza incluem: i) a restauração de paisagens ecologicamente funcionais, com foco em corredores ecológicos, reconexão de habitats e provisão de serviços ecossistêmicos; ii) o pagamento por serviços ambientais (PSA) que remunera práticas produtivas sustentáveis; iii) a adoção de sistemas agroflorestais e agricultura regenerativa, que aliam produção de alimentos à conservação do solo e sequestro de carbono; e iv) a valorização de saberes tradicionais e indígenas que historicamente manejam os recursos naturais com baixo impacto e alta resiliência.

Sensoriamento remoto de alta resolução

O monitoramento por satélite tornou-se uma ferramenta imprescindível para a governança ambiental no Brasil. O país desenvolveu os programas PRODES, DETERe o projeto TerraClass, que fornecem taxas anuais de desmatamento e alertas em tempo real para combater ilegalidades, como mineração ilegal e exploração seletiva de madeira (Kintisch, 2007; Cortinhas Ferreira Neto et al., 2024), detectando desmatamento até sob cobertura de nuvens e (Doblas et al., 2022).

Outro exemplo positivo é o da plataforma MapBiomass. Utilizando séries temporais de imagens Landsat, algoritmos de aprendizado de máquina e validação com dados locais, o MapBiomass revelou com precisão a transformação de vastas áreas de vegetação nativa em agroecossistemas fragmentados, destacando os principais vetores de degradação em todos os biomas brasileiros (MapBiomass, 2023).

Porém, o acesso a imagens de altíssima resolução (<1 metro) é um desafio para a comunidade científica nacional. Imagens comerciais desse tipo (como PlanetScope e WorldView) têm custo elevado, limitando pesquisas em laboratórios independentes, mostrando-se necessária a formação de um repositório de imagens compradas com verbas públicas de pesquisa e, paralelamente, a realização de investimentos na evolução de sensores nacionais de alta resolução e acessíveis publicamente (Przibiszczki, 2020).

Biotecnologia para conservação e restauração

A biotecnologia é uma valiosa aliada na conservação da biodiversidade e restauração de ecossistemas frente às mudanças climáticas. Uma das principais frentes de pesquisa com esse propósito envolve a identificação de genótipos de plantas mais resistentes a alguns dos efeitos das mudanças do clima, como estresse hídrico ou exposição a temperaturas elevadas. A Embrapa é um exemplo de pesquisa em variabilidade genética de espécies florestais e agrícolas, como foi o caso do desenvolvimento de variedades de feijão e de soja tolerantes à seca por edição gênica (Embrapa, 2023). Na restauração de ecossistemas, técnicas de biotecnologia contribuem para aumentar a sobrevivência de plantas reintroduzidas em áreas degradadas, identificando aquelas populações com maior tolerância à condições adversas de clima ou de solo.

Ferramentas de genômica e DNA ambiental (e-DNA)

O e-DNA é uma ferramenta emergente que permite monitorar a biodiversidade de forma não invasiva, utilizando-se dos vestígios de material genético encontrados em amostras, como água ou solo. Com ela, é possível identificar espécies presentes em um ecossistema, incluindo espécies raras ou não identificadas, como também as espécies invasoras (Heinrichs-Caldas et al., 2024). Além da detecção das espécies, o e-DNA auxilia no alerta precoce da ocorrência de microrganismos nocivos à vida humana e animal, no rastreamento da poluição e no aprimoramento da tomada de decisões por meio do mapeamento de interdependências ecológicas. Por ser um método não invasivo, também pode ser adotado como estratégia para reduzir custos de campo ou para gerar dados sobre territórios de difícil acesso. No entanto, a tecnologia ainda carece de investimentos estratégicos em infraestrutura digital e em plataformas de acesso aberto para explorar todo o seu potencial.

Modelagem de nicho ecológico integrando Big Data e IA

A modelagem de nicho ecológico é uma técnica utilizada para prever a distribuição de espécies, relacionando dados ambientais (como temperatura, precipitação, etc.) com a presença ou ausência de uma espécie, estimando onde ela pode ocorrer. Pesquisas brasileiras têm utilizado conjuntos de dados de ocorrência de espécies extraídos de bases como GBIF,

speciesLink, etc., integrados com projeções climáticas para estimar mudanças de distribuição de espécies e possíveis extinções locais, como é o caso do estudo que identificou riscos de perda de diversidade de anfíbios frente às mudanças climáticas (Alves-Ferreira et al. 2025). Ferramentas de *Big Data* e Inteligência Artificial têm sido aliadas para integrar dados de ocorrência, traços funcionais e relações filogenéticas, possibilitando estudos mais complexos com projeções de impacto climático. O Brasil está entre os líderes globais em publicações que usam essa ferramenta, relacionando clima e biodiversidade (Giannini et al., 2012). Essa tecnologia tem grande relevância na governança ambiental, antecipando extinções, deslocamentos e, até mesmo, identificando refúgios climáticos e áreas prioritárias para a conservação.

Plataformas de ciência cidadã e dados abertos

A **Ciência Cidadã** está emergindo tanto como forma de monitorar impactos ambientais de forma participativa, dando maior ênfase à dimensão social da ciência e à importância do engajamento público na pesquisa (Albagli & Rocha, 2021). No Brasil, projetos de ciência cidadã permitem que pessoas reportem observações de eventos climáticos extremos (alerta de enchentes, monitoramento de secas, etc.) e monitorem a biodiversidade. Comunidades tradicionais e locais complementam e validam modelos climáticos e alinhram a agenda científica às demandas locais, tornando o impacto da pesquisa mais tangível (Pereira et al., 2023). Plataformas de ciência cidadã como iNaturalist e eBird, dentre outras, tem se consolidado como ferramentas de monitoramento da biodiversidade. O Programa Monitora, conduzido pelo ICMBio, incorpora voluntários e comunidades locais em várias etapas, desde planejamento até coleta de dados, fortalecendo os laços entre cidadãos, pesquisadores e gestores de maneira qualificada no monitoramento de Unidades de Conservação.

Redes de sensores em campo (IoT)

Redes de sensores ambientais em campo, dentro do conceito de Internet das Coisas (IoT), ampliam a capacidade de monitoramento climático-ecológico no Brasil. Exemplos englobam estações meteorológicas automáticas, sensores de umidade, redes de pluviômetros, sensores de níveis de rio, dentre outros. O Centro Nacional de Monitoramento e Aler-

tas de Desastres Naturais (CEMADEN) é um caso emblemático, com mais de 4 mil pluviômetros automáticos e centenas de sensores hidrológicos distribuídos pelo país. Já os projetos AmazonFACE e o Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera (LBA) implementaram um arsenal de sensores para medir fluxos de carbono, umidade foliar, crescimento de árvores e composição atmosférica em plena Floresta Amazônica. Com isso, é possível gerar respostas rápidas a choques climáticos, aumentando a resiliência de ecossistemas e comunidades.

Tecnologias para agregação de valor em cadeias da sociobiodiversidade

Uma frente fundamental na ação climática é o desenvolvimento de tecnologias que agregam valor a produtos da sociobiodiversidade, incentivando cadeias produtivas sustentáveis que gerem renda local e substituam práticas extrativistas. Muitos são os exemplos que despontaram recentemente. Um deles é o uso de secadores solares inteligentes para processamento de frutas, castanhas, madeiras e outros produtos, desenvolvidos por pesquisadores da Embrapa Amazônia Oriental (Embrapa, 2010). O secador solar brasileiro é 53% mais econômico que métodos convencionais de secagem. Também há metodologias promissoras de extração verde de óleos e compostos bioativos, como óleos essenciais da andiroba e da copaíba, sem uso de solventes tóxicos, obtendo extratos de alta pureza sem gerar resíduos poluentes. Já metodologias de isolamento e caracterização de compostos bioativos, para uso farmacêutico, evoluíram e produziram achados promissores, como compostos com efeito antimalárico, antibiótico e anticâncer (Aldana-Mejía et al., 2025). Por fim, plataformas digitais de rastreabilidade e certificação compõem outra peça fundamental nessas cadeias, com iniciativas como o *Origens Brasil*, que fornecem selos e um QR-code rastreável para produtos da sociobiodiversidade como mel, óleo de babaçu, dentre outros. A rastreabilidade confere vantagem de mercados a esses produtos e coíbe a entrada de produtos ilegais ou que ferem direitos de populações tradicionais (Jokura, 2023).

Integração entre dados climáticos e ecológicos via repositórios interoperáveis

A pesquisa transdisciplinar que é possibilitada pelas tecnologias pode alcançar seu pleno potencial se a fragmentação dos dados entre diferentes sistemas for superada. No Brasil, existem diferentes plataformas de dados ambientais (SiBBr, AdaptaBrasil, AdaptaClima, etc.) com informações meteorológicas, bases de biodiversidade, dados socioeconômicos, dentre outros, que seguem padrões distintos e estão sob gestão de órgãos diferentes, além de não contarem com pessoal permanente dedicado. Logo, são dados que não conversam entre si, o que dificulta análises integradas e a formulação de políticas multiescalares e multibiomassas. Na América Latina, como um todo, a falta de repositórios abertos e integrados (atendendo aos princípios FAIR) tem atrasado estratégias de adaptação às mudanças climáticas (Cavazos et al., 2024). A interoperabilidade é chave para enfrentar esse desafio, adotando formatos padronizados (por exemplo, DarwinCore para dados biológicos, netCDF para dados climáticos), API abertas e serviços web que permitem cruzamentos automáticos. Somente com repositórios unificados é possível acompanhar de maneira eficiente metas de proteção de ecossistema e resiliência climática, aprimorando a qualidade das políticas públicas.

POLÍTICAS PÚBLICAS, GOVERNANÇA E INSTRUMENTOS ECONÔMICOS

A resposta aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela perda de biodiversidade nos biomas brasileiros ultrapassa os limites da ciência ecológica ou da inovação tecnológica. Ela está ancorada, sobretudo, na capacidade de construir e sustentar políticas públicas robustas, mecanismos de governança ambiental multiescalar e instrumentos econômicos eficazes. Trata-se de uma questão profundamente política, que envolve escolhas distributivas, prioridades territoriais e modelos de desenvolvimento.

Em um país marcado por desigualdades regionais, vulnerabilidades sociais e intensa pressão sobre os recursos naturais, as estratégias de conservação climática exigem articulação entre diferentes níveis de governo, setores da economia e segmentos da sociedade civil. Os mecanismos de comando e controle, os incentivos econômicos e as alianças federativas

e comunitárias formam a base institucional para enfrentar os desafios socioambientais contemporâneos com escala, legitimidade e eficiência.

As mudanças climáticas interagem com o uso da terra e com fatores socioeconômicos. O aumento de incêndios florestais no Pantanal e Cerrado, por exemplo, pode ser atribuído tanto a mudanças na precipitação quanto à expansão de práticas agropecuárias inadequadas (Pimentel et al., 2024). Essas interações complexas requerem uma abordagem integrada para lidar com os desafios ambientais, levando em consideração os impactos socioeconômicos e os modos de vida das populações locais. Vários programas nacionais têm buscado apoiar projetos de pesquisa que permitam ações mais sólidas nos vários biomas brasileiros.

Esta seção examina os principais eixos dessa governança climática aplicada à biodiversidade: os avanços e retrocessos nos mecanismos de fiscalização e controle ambiental; a evolução e os limites dos instrumentos econômicos como PSA e mercados de carbono; a articulação entre União, estados e municípios; os desafios da estratégia territorial clássica baseada em Unidades de Conservação; e o papel insubstituível dos atores locais e dos saberes tradicionais na promoção de soluções sustentáveis e justas.

Comando e Controle: Entre Avanços e Retrocessos

O Brasil acumulou, ao longo das últimas décadas, uma trajetória ambígua no uso de instrumentos de comando e controle ambiental. Por um lado, demonstrou sua capacidade institucional de frear o desmatamento por meio de políticas públicas articuladas, monitoramento remoto e repressão qualificada de ilícitos ambientais. Por outro, experimentou ciclos de fragilização regulatória, retrocessos legais e enfraquecimento de órgãos fiscalizadores, que comprometeram significativamente a governança ambiental, especialmente a partir de 2019. Por exemplo, há 44 propostas em andamento no Congresso Nacional que fragilizam a legislação ambiental brasileira, conforme levantamento realizado pelo Observatório do Clima (Freitas, 2025).

O exemplo paradigmático da efetividade do comando e controle foi o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), criado em 2004, que integra o monitoramento por satélite em tempo real com ações de fiscalização e ordenamento fundiário, entre outras estratégias, para conter o desmatamento na região.

O plano foi bem-sucedido, resultando em uma redução de 70% no desmatamento entre 2004 e 2012 (Nepstad et al., 2014). No entanto, com o enfraquecimento do programa, os índices voltaram a subir até 2021 (Silva Junior, 2021), voltando a cair em 2022 (Mataveli et al., 2024). Esses dados evidenciam o papel fundamental da vontade política no controle do desmatamento na Amazônia. O Arco do Desmatamento da Amazônia se tornou o foco de restauração no novo compromisso do Brasil no Acordo de Paris. Na sua nova Contribuição Nacionalmente Determinada, o Brasil se compromete a restaurar 6 milhões de hectares de floresta no que chama de “Arco da Restauração da Amazônia” até 2030 e 42 milhões de hectares até 2050 (Ministério da Economia, 2024), o que deve atrair novos projetos de reflorestamento para a região.

Também é importante reconhecer avanços significativos na política ambiental brasileira voltada à conservação da Mata Atlântica. A promulgação da Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428/2006) representou um marco legal pioneiro, assegurando regras específicas para a proteção e uso sustentável de um bioma. Iniciativas como a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (ProVeg) e o Pagamento por Serviços Ambientais (como o Floresta+) vêm estimulando a restauração ecológica com espécies nativas e remunerando proprietários rurais que preservam a cobertura vegetal. A ampliação de Unidades de Conservação, a exemplo da criação de Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs), também contribuem para manter fragmentos estratégicos e corredores ecológicos funcionais (Crouzeilles et al., 2013). Ademais, a efetividade da conservação da Mata Atlântica ainda depende fortemente da articulação entre governos locais, setor privado e comunidades tradicionais, que detêm conhecimentos estratégicos sobre o uso sustentável da paisagem.

Em resposta ao cenário crítico do Pantanal, o governo brasileiro tem adotado uma série de iniciativas estruturantes para a sua conservação. Destacam-se o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Pantanal (PPCPantanal), coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), que visa articular políticas públicas com estados e municípios da região. O ICMBio, por sua vez, atua na gestão de Unidades de Conservação estratégicas, como o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense e a Estação Ecológica de Taiamã, além de investir em brigadas de incêndio e monitoramento de fauna aquática. O governo também integrou o Pantanal às diretrizes do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), com foco em uso do solo compatível com a con-

servação, e fomenta o Projeto Pró-Pantanal, apoiado por recursos do Fundo Clima, com ações voltadas à restauração ecológica e fortalecimento da bioeconomia local.

Já os biomas Cerrado, Caatinga e Pampa carecem de políticas públicas robustas voltadas à sua conservação ou restauração, o que intensifica os impactos sofridos nas regiões. Ao contrário da Amazônia e da Mata Atlântica, o Cerrado não é reconhecido oficialmente como Patrimônio Nacional pela Constituição Federal, o que limita os mecanismos legais de proteção e financiamento. Iniciativas como o PPCerrado (Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado), embora promissoras, enfrentam desafios orçamentários e institucionais crônicos. A vulnerabilidade ecológica e socioeconômica na Caatinga demanda políticas de combate à desertificação, como o Plano Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (Lei 13.153/2015), cuja consolidação está em curso. Existem esforços de conservação e restauração no Pampa liderados por instituições de pesquisa, ONGs e universidades gaúchas, mas que não contam com a articulação de um plano nacional específico para o bioma.

Retrocessos institucionais nos anos recentes reverteram parte das conquistas socioambientais. A redução orçamentária e o enfraquecimento institucional de órgãos como IBAMA e ICMBio, associados à desarticulação de conselhos participativos e à flexibilização de regras de licenciamento, comprometeram a eficácia do aparato estatal de fiscalização ambiental. De acordo com Silva Junior e colaboradores (2021), o desmatamento registrado em 2020 na Amazônia Legal foi o maior da década, ultrapassando 11 mil km², o que reflete não apenas o aumento da ilegalidade, mas a perda de capacidade estatal em monitorar e coibir infrações.

Recentemente, o Projeto de Lei 2.159/2021, que trata do licenciamento ambiental, foi aprovado pelo Congresso Nacional, trazendo “uma desestruturação significativa do regramento existente sobre o tema e representando risco à segurança ambiental e social do país”, sendo considerado o maior retrocesso na legislação ambiental brasileira após as mudanças do antigo Código Florestal em 2012, segundo o próprio Ministério do Meio Ambiente e Mudanças do Clima. Conforme anunciado em nota técnica do Observatório do Clima (2025), foram identificados retrocessos graves em, ao menos, 42 dos 66 artigos da proposta. Segundo a nota, “o texto proposto criava um cenário de caos regulatório, fragilizando a avaliação de impactos ambientais, a análise de riscos, a participação pública e

controle ambiental”. Entre os pontos mais críticos, estavam a dispensa de licenciamento para diversas atividades com potencial impacto ambiental, como mineração, a introdução do autolicenciamento sem análise técnica prévia, e a possibilidade de regularização de empreendimentos ilegais por meio de anistias. O projeto também exclui da proteção territórios indígenas e quilombolas ainda em processo de reconhecimento, colocando em risco a vida das pessoas que vivem nesses territórios. Até a data de fechamento da redação deste capítulo, a Lei Geral do Licenciamento teve 63 dos 400 de seus dispositivos vetados pela Presidência da República. Dentre esses dispositivos, foi vetada a possibilidade do Licenciamento Ambiental Especial (LAE) - voltado a projetos e obras consideradas “estratégicas” — ocorra em fase única, e a possibilidade de licenciamento simplificado para empreendimentos de médio potencial poluidor, o que inclui a nova modalidade de licenciamento por autodeclaração. Os vetos do Presidente, amenizam, potencialmente, os impactos negativos da Lei sobre a gestão ambiental e resta aguardar se serão mantidos ou derrubados pelo Congresso.

O levantamento realizado para este capítulo identificou 102 projetos de lei (PLs) em tramitação relacionados a questões ambientais ou à emergência climática. Entre aqueles com potencial impacto positivo (Tabela 1), destacam-se propostas de caráter penal, que ampliam punições por crimes ambientais — sobretudo em resposta ao aumento expressivo de queimadas no período 2023-2024 —, e iniciativas voltadas à mitigação de catástrofes climáticas, impulsionadas pelas enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul e pela grave seca que afetou o Amazonas, ambos em 2024. Trata-se, em grande parte, de projetos reativos a crises específicas. Apesar disso, o conjunto dos PLs revela um cenário marcado por retrocessos e pelo desmonte de políticas de conservação e mitigação. Observa-se, ainda, a ausência de atenção às especificidades de cada bioma: apenas a Amazônia recebeu tratamento dedicado, com destaque para o PL 3443/2025, que institui a Política Nacional de Proteção Integrada da Amazônia Brasileira.

Tabela 1: Projetos de Lei (PLs) em tramitação com potencial positivo para conservação, adaptação e/ou mitigação diante da emergência climática.

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---------------------|--|---|
| PL 3443/2025 | Institui a Política Nacional de Proteção Integrada da Amazônia Brasileira, com foco na defesa dos povos e territórios tradicionais, no enfrentamento ao crime ambiental e organizado, e na valorização do conhecimento socioambiental local. | Aguardando Chancela e Publicação do Despacho. |
| PL 2900/2025 | Institui a Campanha Nacional de Incentivo à Aquisição de Produtos e Ingredientes Agroecológicos e Orgânicos Provenientes da Agricultura Familiar. | Aguardando Designação de Relator(a). |
| PL 1530/2025 | Institui o Fundo de Apoio à Produção Agrossilvipastoril, Extrativista e Artesanal realizada por Povos Indígenas, Quilombolas e Comunidades Tradicionais (FUNAP-TRADICIONAIS), para financiar e apoiar pesquisas e ações destinadas a potencializar, assistir e incentivar o desenvolvimento da produção sustentável e agroecológica para fins de comercialização nacional e internacional. | Aguardando Designação de Relator(a). |
| PL 1879/2025 | Altera a Lei nº 11.445/2007 para estabelecer medidas destinadas à manutenção e regularização do abastecimento de água em áreas suscetíveis a desabastecimento em decorrência de seca. | Aguardando Parecer. |
| PL 1525/2025 | Institui o Programa Nacional de Valorização da Cana-de-Açúcar Sustentável (PROCANAS) e estabelece incentivos para práticas agrícolas regenerativas na produção de cana-de-açúcar no Brasil. | Aguardando Designação de Relator(a). |

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---------------------|--|---|
| PL 2177/2025 | Dispõe sobre diretrizes para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas em prédios públicos e espaços públicos ou privados de circulação ou concentração de pessoas. | Aguardando Parecer. |
| PL 1286/2025 | Determina a criação de linha de crédito pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para projetos de energia renovável para a agricultura familiar. | Aguardando Parecer. |
| PL 3444/2025 | Institui o Programa de Infraestrutura Sustentável para Comunidades Insulares Amazônicas, com foco em saneamento básico, acesso à água potável e manejo ambiental. | Aguardando Chancela e Publicação do Despacho. |
| PL 1725/2025 | Veda a oferta de novos blocos de exploração de petróleo e gás na Amazônia e obriga a recuperação ambiental nas áreas com atividades de produção desses hidrocarbonetos na região. | Pronta para Pauta. |
| PL 3540/2025 | Institui o Sistema Nacional de Mapeamento dos Vetores do Desmatamento e dá outras providências. | Aguardando Chancela e Publicação do Despacho. |
| PL 3512/2025 | Dispõe sobre a instituição de metas, diretrizes e instrumentos para a redução das emissões de metano no Brasil, e dá outras providências. | Aguardando Chancela e Publicação do Despacho. |
| PL 456/2025 | Estabelece diretrizes e normas para a mobilidade urbana sustentável e para a expansão urbana ordenada, visando à prevenção de desastres no âmbito urbano, à redução das desigualdades sociais e ao incentivo de práticas sustentáveis no desenvolvimento urbano. | Pronta para Pauta. |

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---------------------|---|--------------------------------------|
| PL 3652/2024 | Apensado de projetos que dispõem das diretrizes e bases da educação nacional para incluir nos materiais didáticos material sobre mudanças climáticas. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 157/2025 | Altera a Lei nº 14.902/2024, para incluir diretriz para a mitigação das emissões poluentes causadas por veículos automotores. | Aguardando Parecer. |
| PL 367/2025 | Autoriza a União a participar de fundo que tenha por finalidade apoiar a requalificação e a recuperação de infraestruturas nas áreas afetadas por eventos climáticos extremos e apoiar empreendimentos de infraestrutura relacionados à mitigação e à adaptação às mudanças climáticas. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 3130/2025 | Altera a Lei nº 12.114/2009 para destinar recursos do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima a ações voltadas à reconstrução, ao fortalecimento da rede pública de ensino e à promoção da Resiliência Escolar Climática em territórios atingidos por eventos climáticos extremos. | Aguardando Designação de Relator(a). |
| PL 3218/2025 | Institui o Programa Nacional de Incentivo à Formação de Corredores Ecológicos em Imóveis Rurais, à Refaunação e à Adoção de Práticas Conservacionistas de Solo e Água, com criação do Selo AgroBio de Qualidade Ambiental. | Aguardando Designação de Relator(a). |
| PL 2634/2025 | Institui o Programa Nacional de Estímulo à Criação e Fortalecimento dos Conselhos Municipais do Clima e Meio Ambiente e dá outras providências. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---------------------|--|--------------------------------------|
| PL 2401/2025 | Institui o Marco Legal da Descarbonização da Indústria Brasileira, estabelece diretrizes, metas, mecanismos regulatórios e incentivos para promover a neutralidade de carbono no setor industrial até o ano de 2050. | Aguardando Designação de Relator(a). |
| PL 2402/2025 | Institui a Política Nacional de Incentivo à Economia Circular e à Logística Reversa, estabelece obrigações para fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 3658/2024 | Altera a Lei nº 12.114/2009 para possibilitar a destinação de recursos do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima para o combate ao desmatamento, às queimadas, aos incêndios florestais, à desertificação e aos desastres naturais. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 3025/2024 | Altera a Lei nº 11.445/2007, para priorizar a aplicação de recursos públicos federais em ações de saneamento básico em municípios que possuam seu território parcial ou totalmente inserido em Unidades de Conservação. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 3904/2023 | Institui a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica. | Pronta para Pauta. |
| PL 4816/2024 | Dispõe sobre a proteção e preservação de nascentes e cursos d'água, institui mecanismos de monitoramento, recuperação de áreas degradadas e penalidades mais rígidas para poluidores. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 4947/2024 | Institui a Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais (PNPSA) e dispõe sobre incentivos financeiros para a conservação ambiental. | Aguardando Designação de Relator(a). |

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---------------------|---|--------------------------------------|
| PL 3187/2024 | Altera a Lei nº 11.484/2007, que dispõe sobre o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS), e inclui incentivo a tecnologias para promoção de redução de emissões e transição energética. | Pronta para Pauta. |
| PL 3144/2024 | Institui contribuição de intervenção no domínio econômico (CIDE-Pecuária) destinada a custear o Fundo da Pecuária Limpa (FUNPECLIMP), para o financiamento de programas e ações voltados para a adoção de técnicas de agricultura de baixo carbono. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 4946/2024 | Institui a Política Nacional de Ecoturismo Sustentável. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 3604/2024 | Altera o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima para permitir o investimento de recursos no desenvolvimento de tecnologia da informação (TI) e da inteligência artificial (IA) na prevenção e contenção de incêndio em ambientes naturais, e dá outras providências. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 4364/2023 | Altera a Política Nacional sobre Mudança do Clima para incluir regras de consolidação e fomento à adoção de medidas para mitigação e para remoção de gases de efeito estufa. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |
| PL 2860/2022 | Cria o Programa de Financiamento do Combate às Mudanças Climáticas. | Aguardando Parecer do(a) Relator(a). |

| PROJETO DE LEI (PL) | O QUE É? | SITUAÇÃO |
|---|--|-------------------------------------|
| PLs 2085/2025, 3643/2024, 3299/2024, 2968/2024, 3321/2024, 3339/2024, 1703/2020, 10457/2018 | Leis que ampliam fiscalização e penalização por crimes de queimadas, desmatamento e/ou degradação significativas do meio ambiente. | Situações diversas. |
| PL 3899/2012 | Institui a Política Nacional de Estímulo à Produção e ao Consumo Sustentáveis. | Aguardando Deliberação no Plenário. |

Instrumentos Econômicos, Mercado de Carbono e Créditos de Biodiversidade

A conservação da biodiversidade e o enfrentamento das mudanças climáticas requerem, além da fiscalização ambiental, mecanismos econômicos eficazes que promovam incentivos à manutenção de florestas em pé, à restauração de ecossistemas e à transição para modelos produtivos sustentáveis. Instrumentos econômicos têm a capacidade de alinhar interesses ambientais e financeiros, transformando passivos ecológicos em ativos de valor estratégico para o desenvolvimento.

No Brasil, esse movimento ganhou impulso com a incorporação de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) no novo Código Florestal (Lei 12.651/2012) e, mais recentemente, com a Lei Federal nº 14.119/2021, que instituiu a Política Nacional de PSA. Esses mecanismos permitem que produtores rurais, comunidades tradicionais e territórios indígenas recebam por serviços prestados à sociedade, como a conservação da água, do solo, da biodiversidade e da estabilidade climática.

Outro marco regulatório recente importante é a Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelecendo as bases para um mercado regulado de carbono no país. A legislação brasileira foi promulgada logo após a formalização, na COP29 de Baku, do mecanismo global de créditos de carbono supervisionado pela ONU, previsto no Artigo 6.4 do Acordo de Pa-

ris. As Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs) a recuperar, que representam um passivo ambiental de cerca de 20 milhões de hectares, abrem espaço para uma agenda de restauração ecológica, por meio de políticas como o Crédito Rural Verde, as CRAs (Cotas de Reserva Ambiental) e o uso de áreas restauradas como ativos de carbono.

Apesar desses avanços normativos no Brasil, a consolidação do “desmatamento evitado” como ativo nos mercados de carbono ainda encontra resistência internacional, o que compromete a valorização econômica da floresta em pé. Projetos REDD+ (sigla para *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, ou Reduzindo Emissões advindas de desmatamento e degradação florestal, em tradução livre), fazem parte das estratégias de mercado de carbono. Trata-se de um mecanismo multilateral e voluntário que remunera reduções de emissões relacionadas ao combate do desmatamento e degradação. Lançado em 2005, na Conferência das Partes (COP), o mecanismo ainda não se consolidou formalmente, existindo apenas no mercado voluntário. Como o Brasil está entre os países com o maior número de emissões relacionadas ao desmatamento e à degradação, rapidamente tornou-se um dos maiores beneficiários de REDD+ no mundo (Cerbu et al. 2011). Atualmente, há mais de 700 projetos deste tipo em 57 países, sendo 91 deles no Brasil, segundo a base internacional de dados de projetos REDD+ (reddprojectsdatabase.org). Embora esses projetos voluntários gerem ondas de otimismo, sua eficiência continua limitada: um levantamento com 40 projetos comprovou que a redução de desmatamento da ordem de 47% nos primeiros cinco anos de implementação é, todavia, menos relevante que a redução proporcionada por Unidades de Conservação, por exemplo (Guizar-Coutiño et al., 2022). Além disso, a média de remuneração por meio de REDD+ ainda não é competitiva frente às atividades extrativistas, o que evidencia que mecanismos puramente financeiros podem não ser suficientes frente a um problema tão complexo (Kill, 2020).

Além dos créditos de carbono, um instrumento que tem sido discutido no mercado internacional são os créditos de biodiversidade. Diferentemente dos créditos de carbono, que focam na redução ou remoção de gases de efeito estufa, os créditos de biodiversidade valorizam a proteção de habitats, espécies e serviços ecossistêmicos essenciais para a estabilidade ambiental. Contudo, sua implementação apresenta desafios técnicos relevantes, como a dificuldade de medir e quantificar esses benefícios de forma precisa, a necessidade de metodologias robustas para

avaliação e monitoramento, além da garantia da adicionalidade e da prevenção da dupla contagem dos créditos (Vardon & Lindenmayer, 2023). Também é impossível se pensar cenários de sucesso de sua implementação sem os graves problemas de transparência, de equidade e de justiça social na comercialização dos créditos (Swift, 2024). Ainda não houve tempo suficiente para que tenham se desenvolvido estudos que atestem a eficiência de créditos de biodiversidade.

A consolidação dos instrumentos econômicos requer, portanto, uma estratégia integrada, que articule: i) segurança jurídica para projetos e contratos de PSA; ii) integração entre mercados voluntários e regulados de carbono; iii) rastreabilidade ambiental dos produtos e cadeias produtivas; iv) inclusão de agricultores familiares e povos tradicionais nos fluxos de pagamento e decisão.

Governança Multinível e Articulação Federativa

A conservação da biodiversidade em um país com as dimensões, complexidade territorial e diversidade socioambiental do Brasil exige uma governança ambiental multinível, ou seja, a construção de políticas públicas articuladas entre União, estados, municípios e sociedade civil. A descentralização da gestão ambiental, prevista na Constituição de 1988, tem potencial para ampliar a capilaridade das ações e adaptá-las às realidades locais. No entanto, sua efetividade depende de integração vertical, cooperação federativa e compartilhamento equitativo de responsabilidades e recursos. Iniciativas como o Consórcio da Amazônia Legal, formado por nove estados da região, mostram a capacidade institucional subnacional de formular respostas integradas à crise climática. Porém, tais iniciativas ainda operam com financiamento instável, frágil conexão com políticas federais e limitada replicabilidade em outros biomas.

No âmbito dos municípios, crescem os consórcios intermunicipais de gestão ambiental, particularmente em áreas de fronteira agropecuária, como o Matopiba e o sudeste do Pará. Esses arranjos têm potencial para construir pactos regionais de uso sustentável da terra, mas carecem de instrumentos técnicos e financeiros que garantam sua permanência. A articulação entre escalas também demanda integração entre setores. A política climática brasileira, expressa nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), precisa dialogar com as políticas de ordenamento territorial, regularização fundiária, transporte, energia e desenvolvimento

rural. Como apontam Warren et al. (2018), mesmo que os compromissos internacionais sejam cumpridos, os benefícios para a biodiversidade serão limitados se não forem acompanhados de planejamento espacial estratégico, conectividade ecológica e proteção de áreas funcionais para a migração de espécies. Portanto, a governança climática eficaz exige que os instrumentos federativos estejam ancorados em pactos territoriais legítimos, com financiamento descentralizado, compartilhamento transparente de dados e mecanismos de coordenação intergovernamental. Sem isso, as políticas ambientais tendem a se fragmentar e perder capacidade de transformação sistêmica.

Áreas Protegidas e Limites da Estratégia Territorial Clássica

As Unidades de Conservação (UCs) são a espinha dorsal da política de conservação da biodiversidade no Brasil. Compreendendo cerca de 30% do território nacional, considerando-se áreas terrestres e marinhas, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) é um marco institucional consolidado. No entanto, o agravamento da crise climática impõe novos desafios às estratégias territoriais clássicas, revelando limitações tanto na distribuição das UCs entre os biomas quanto em sua capacidade de adaptação às mudanças ambientais em curso.

Estudos recentes demonstram que a eficácia das UCs em proteger espécies pode decair significativamente em cenários de aquecimento global. Segundo Malecha et al. (2023), a maioria das UCs brasileiras não manterá as condições climáticas adequadas às espécies que abrigam. Muitas populações protegidas atualmente poderão se deslocar para áreas fora dos limites das UCs nas próximas décadas, tornando urgente o desenvolvimento de estratégias dinâmicas de conservação, baseadas no planejamento da paisagem.

Outro problema estrutural é o viés geográfico na alocação das UCs entre os biomas. Enquanto a Amazônia e, em menor grau, a Mata Atlântica, concentram a maior parte das unidades de proteção integral, biomas como Pampa e Caatinga permanecem desprotegidos, com menos de 1% de suas áreas abrangidas por esse tipo de unidade (Jenkins et al. 2015). Essa assimetria compromete a representatividade ecossistêmica do SNUC e enfraquece a capacidade do sistema de funcionar como uma rede de refúgios climáticos nacionais.

Além da cobertura territorial, há também desafios de efetividade de gestão, incluindo falta de Plano de Manejo, carência de pessoal, orçamento insuficiente, conflitos fundiários e pressões externas como mineração, grilagem e caça ilegal. Tais vulnerabilidades reduzem a resiliência institucional das UCs frente às mudanças climáticas e dificultam a implementação de ações adaptativas, como o manejo da conectividade, o uso de zonas-tampão e a integração com áreas privadas e territórios de uso coletivo.

Diante desse cenário, torna-se fundamental repensar a política de áreas protegidas a partir de uma lógica mais dinâmica, que reconheça as mudanças na distribuição potencial de espécies, incorpore ferramentas como os corredores ecológicos climáticos, e articule-se com instrumentos como pagamentos por serviços ambientais, mosaicos de conservação e reservas privadas. A efetividade futura do SNUC dependerá de sua capacidade de responder a uma realidade ambiental em rápida transformação.

Atores Locais e Saberes Tradicionais

A governança climática e ecológica no Brasil não será eficaz sem o reconhecimento e a valorização ativa dos atores locais e dos saberes tradicionais. Povos indígenas, comunidades quilombolas, extrativistas, ribeirinhos e agricultores familiares não são apenas beneficiários potenciais de políticas ambientais; são, sobretudo, agentes históricos e contemporâneos de conservação. Suas práticas territoriais, baseadas em manejo adaptativo e conhecimento ecológico acumulado, vêm garantindo a preservação de vastas áreas de vegetação nativa, mesmo sob pressões externas crescentes.

Territórios indígenas apresentam os menores índices de desmatamento da Amazônia Legal, mesmo em regiões de forte expansão agropecuária e mineração (Qin et al., 2023). Isso resulta de sistemas de governança territorial baseados em reciprocidade, cuidado intergeracional e conhecimento sofisticado sobre ecossistemas locais. Esses territórios funcionam como barreiras efetivas contra a degradação ambiental, além de atuar como zonas de conectividade ecológica e resiliência climática (Halla, 2020) (Figura 9).

A inclusão dos saberes ecológicos tradicionais nas políticas de conservação e adaptação climática é, portanto, não apenas um imperativo ético e constitucional, mas uma estratégia eficiente de gestão ambiental.

No Cerrado e na Caatinga, por exemplo, práticas como o manejo comunitário do fogo, a gestão de sementes nativas, a apicultura tradicional e o uso de plantas medicinais constituem formas resilientes de lidar com a escassez hídrica, o fogo e as mudanças no regime de chuvas (Welch & Coimbra Jr., 2021). Ignorar esses sistemas é perder oportunidades de inovação e de capacidade adaptativa.

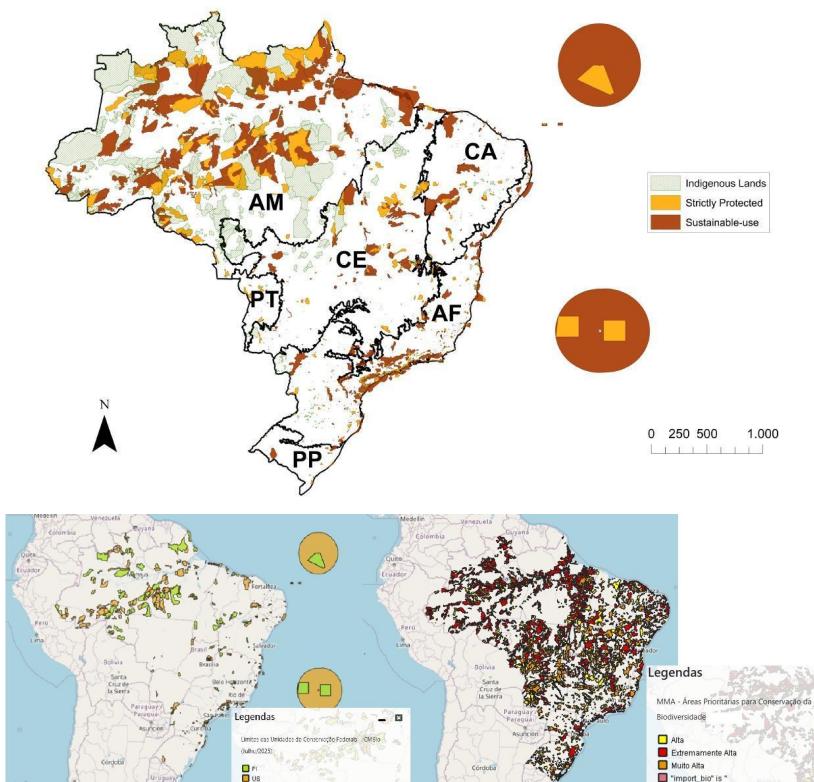


Figura 9: Distribuição de Territórios Indígenas, Unidades de Conservação, Reservas de Uso Sustentável e Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade no Brasil. Fontes: Malecha, A., Vale, M. M., & Manes, S. (2023). Ampliar a rede de áreas protegidas brasileiras é vital em um clima em mudança. Conservação Biológica, 288, Artigo 110360. <https://doi.org/10.1016/j.bio>

Iniciativas de cartografia social, protocolos comunitários de consulta livre e informada, e integração em redes de cogestão têm avançado em várias regiões do país, mas ainda enfrentam barreiras institucionais e políticas. O reconhecimento formal dos territórios, a regularização fun-

diária, a proteção contra invasões e a inclusão nos programas públicos ambientais são passos essenciais para consolidar a presença de grupos tradicionais na governança climática.

Além disso, programas como o Floresta+ Comunidades, o Pagamento por Serviços Ambientais em Terras Indígenas (PSATI) e o fortalecimento de organizações comunitárias são caminhos promissores para garantir repartição justa de benefícios, respeito aos direitos coletivos e sinergia entre políticas públicas e saberes locais. A integração desses atores amplia não apenas a escala da conservação, mas também sua legitimidade social e política.

ESTRATÉGIAS INTEGRADAS DE CONSERVAÇÃO CLIMÁTICA

A construção de uma agenda estratégica para a conservação da biodiversidade em tempos de mudanças climáticas exige ações articuladas, multiescalares e intersetoriais, com base em ciência sólida, planejamento territorial e justiça ambiental. Embora o Brasil disponha de conhecimento técnico-científico, instrumentos legais e boas tecnologias ambientais, a eficácia dessas ferramentas ainda é limitada por desarticulações institucionais, assimetrias regionais e déficits de governança socioambiental.

Superar esses obstáculos implica alinhar esforços de prevenção, restauração, gestão adaptativa e inclusão social, por meio de estratégias que integrem modelos preditivos, planejamento territorial funcional, participação de comunidades locais e valorização de saberes tradicionais. Essa integração não deve ser apenas temática, mas também operacional, promovendo sinergias entre políticas de conservação, clima, agricultura, infraestrutura e desenvolvimento regional.

Nesta seção, são apresentados os principais eixos de uma estratégia integrada de conservação climática para os biomas brasileiros, com base nas evidências científicas reunidas neste trabalho. A proposta visa orientar ações públicas e sociais que respondam à emergência climática de forma territorialmente justa, ecologicamente eficaz e institucionalmente viável.

Tabela 2: Matriz de Mudança: Promover a Conservação Climática nos Biomas Brasileiros

| PROBLEMA | META (CURTO PRAZO) | META (LONGO PRAZO) |
|---|--|--|
| 1. Desmatamento e degradação ameaçam a resiliência ecológica. | Reducir o desmatamento e degradação em todos os biomas. | Zerar o desmatamento ilegal e restaurar 12 milhões de hectares até 2030. |
| 2. UCs mal distribuídas e vulneráveis ao clima. | Revisar a rede de UCs com base em critérios de risco climático. | Ampliar rede com foco em conectividade e refúgios climáticos até 2035. |
| 3. Caatinga, Pantanal e Pampa com cobertura científica insuficiente. | Lançar editais direcionados a esses biomas. | Equilibrar esforços de pesquisa entre biomas até 2030. |
| 4. Governança ambiental fragmentada. | Consolidar comitês interfederativos em todos os estados. | Implementar pactos territoriais em todos os biomas até 2035. |
| 5. Plataformas de dados ambientais desintegradas. | Consolidar repositórios interoperáveis com princípios FAIR & CARE. | Estabelecer um sistema nacional unificado até 2035. |

| | MECANISMOS DE IMPLEMENTAÇÃO | ATORES ENVOLVIDOS | INDICADORES E MÉTRICAS |
|--|---|--|---|
| | Reforço institucional (IBAMA/ICMBio), retomada dos PPCs, PSA e estímulo à produção sustentável, métodos ativos e passivos de restauração, destinação de terras públicas para conservação e/ou para territórios indígenas. | MMA, IBAMA, ICMBio, governos estaduais, MPF, produtores rurais, comunidades locais, universidades, institutos de pesquisa e INCTs. | <ul style="list-style-type: none"> - km2 desmatados/ano por bioma - Área restaurada (ha) - Número de fiscalizações efetivas - valor pago em PSA - cadeias de valor sustentáveis estruturadas com base em produtos da sociobiodiversidade. - km2 de terras públicas destinadas à conservação e/ou territórios indígenas. |
| | Planejamento sistemático de conservação, criação de corredores ecológicos e mosaicos agroflorestais, integração com PSA e RPPNs. | ICMBio, SNUC, ONGs, gestores de UCs, estados, municípios, comunidades locais. | <ul style="list-style-type: none"> -% de território protegido por bioma. - Índices de Conectividade ecológica. - UCs criadas/ redesenhas. - Planos de manejos atualizados. |
| | Fomento orientado por lacunas, apoio a redes científicas como PP-Bio, inclusão de grupos de pesquisa, integração com INCTs. | MCTI, CNPq, Capes, universidades, institutos de pesquisa, INCTs e FAPs. | <ul style="list-style-type: none"> - Produção científica por bioma - Consolidação de redes científicas por bioma - Proporção de financiamento para cada bioma |
| | Consórcios intermunicipais, coordenação multisectorial e políticas integradas. | MMA, MDA, estados, consórcios intermunicipais, conselhos, sociedade civil. | <ul style="list-style-type: none"> - Comitês interfederativos ativos - Planos territoriais integrados - Participação social nos conselhos |
| | Coordenação entre MCTI/MMA, formação de equipe dedicada, manutenção e acessibilidade pública. | MCTI, INPE, IBGE, MMA, universidades, institutos de pesquisa e desenvolvedores públicos. | <ul style="list-style-type: none"> - N° de base de dados interoperáveis - Acessos às plataformas públicas - Grau de adesão a padrões FAIR & CARE |

| PROBLEMA | META (CURTO PRAZO) | META (LONGO PRAZO) |
|---|---|--|
| 6. Instrumentos econômicos incipientes. | Regular instrumentos econômicos, de maneira baseada em evidências, e com foco em justiça social e equidade (e.g. créditos de biodiversidade). | Consolidar uma economia verde com inclusão socio-produtiva até 2035. |
| 7. A descontinuidade e subfinanciamento da ciência comprometem a resposta à emergência climática | Garantir financiamento estável e plurianual para CT&i e ampliar a participação pública em políticas ambientais | Consolidar uma base científica e cidadã robusta para informar políticas adaptativas até 2030. |
| 8. Conhecimentos tradicionais marginalizados. | Integrar lideranças e formalizar protocolos de consulta | Consolidar cogestão adaptativa de territórios e coparticipação em projetos de pesquisa até 2030. |

| MECANISMOS DE IMPLEMENTAÇÃO | ATORES ENVOLVIDOS | INDICADORES E MÉTRICAS |
|---|--|---|
| Segurança jurídica, rastreabilidade, regulamentação, expansão de programas. | MMA, MRE, MAPA, setor privado, bancos públicos, comunidades tradicionais e locais. | <ul style="list-style-type: none"> - Nº de contratos de PSA ativos - Volume de créditos de carbono/biodiversidade comercializados - Participação de povos e comunidades tradicionais nos fluxos de pagamento - Resultados de desmatamento evitado/ biodiversidade conservada. |
| Recompor o orçamento de C&t, criar linhas permanentes de fomento à ciência climática e à inovação verde, utilizar compras governamentais e benefícios fiscais, ampliar editais de decência cidadã, garantir institucionalidade de conselhos participativos. | MCTI, CNPq, Capes, FAPs, universidades e institutos de pesquisa, movimentos sociais, comunidades tradicionais e locais. | <ul style="list-style-type: none"> - Volume anual de investimento federal em CT&I voltado para clima, biodiversidade e mudanças ambientais - Nº de projetos multidisciplinares ou interdisciplinares apoiados por ano - Nº de conselhos ativos com representação de comunidades tradicionais e sociedade civil organizada. |
| Reconhecimento fundiário, PSA indígena, participação em conselhos, editais de pesquisa que exigem co-participação de comunidades tradicionais, valorização de práticas locais | FUNAI, INCRA, MMA, MCTI, CNPq, Capes, organizações indígenas, quilombolas e ribeirinhos, MDS, MDA, universidades e institutos de pesquisa. | <ul style="list-style-type: none"> - Nº de territórios com protocolos formais de consulta - Nº de comunidades beneficiadas por PSA ou projetos de conservação - Proporção de UCs com participação formal de povos tradicionais - Proporção de projetos de pesquisa com participação de povos tradicionais. |

Manter o compromisso com desmatamento zero até 2030

A prevenção da degradação e da perda de habitats naturais constitui o primeiro e mais custo-efetivo eixo de uma estratégia integrada de conservação climática. Em muitos casos, evitar a conversão de ecossistemas é mais eficiente, ambiental e economicamente, do que restaurá-los posteriormente. No contexto dos biomas brasileiros, essa lógica ganha urgência diante do ritmo atual de desmatamento, especialmente na Amazônia, no Cerrado e na Caatinga.

Portanto, zerar o desmatamento em curso é uma condição indispensável para evitar o colapso funcional dos ecossistemas (Vieira & Silva, 2024; Vieira, 2023) . Isso requer: I) recomposição das capacidades institucionais de fiscalização ambiental, sobretudo nos órgãos federais como IBAMA e ICMBio; II) fortalecimento do PPCDAm e seus equivalentes em outros biomas, como o PPCerrado; III) tolerância zero à grilagem, ao desmatamento ilegal e à impunidade ambiental, que alimentam ciclos de especulação fundiária e destruição sistêmica; e IV) reconhecer e valorizar os territórios que já se mantêm conservados, por meio de mecanismos de pagamento por serviços ambientais (PSA), estímulo à produção sustentável e proteção jurídica a comunidades tradicionais e povos indígenas. Prevenir perdas não é apenas proteger o que resta; é também garantir continuidade ecológica, segurança climática, direitos dos povos indígenas e comunidades tradicionais e soberania sobre os ativos naturais estratégicos do país.

Restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030

A restauração ecológica desponta como uma das estratégias mais eficazes e custo-efetivas para enfrentar simultaneamente a crise climática e a perda de biodiversidade. Restaurar apenas 15% das áreas convertidas em pontos estratégicos pode evitar até 60% das extinções previstas globalmente, além de contribuir com até 30% do sequestro de carbono necessário para manter o aquecimento global abaixo de 2 °C (Strassburg et al., 2020). No contexto brasileiro, essa estratégia assume um valor adicional, pois integra obrigações legais previstas no Código Florestal, como a recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais.

Na Mata Atlântica, por exemplo, a restauração de 5,2 milhões de hectares de passivo legal não apenas pode elevar a cobertura florestal

de 28% para mais de 35%, como sugerido por Ribeiro et al. (2009), mas também reconectar fragmentos isolados, ultrapassar limiares críticos de conectividade funcional e fortalecer a resiliência ecossistêmica frente ao aquecimento global. Além disso, dados do MapBiomas (2023) indicam que a maioria dessas áreas está em propriedades privadas, reforçando a necessidade de políticas de incentivo econômico e arranjos cooperativos entre setores público e privado.

O engajamento com metas internacionais como a Década da Restauração da ONU (2021–2030) e a meta 2 do Marco Global da Biodiversidade de Kunming-Montreal, que visa restaurar pelo menos 30% dos ecossistemas degradados até 2030, pode ajudar a reposicionar o Brasil como líder global em soluções baseadas na natureza. Estratégias de restauração passiva, combinadas com nucleações e modelos adaptativos, vêm demonstrando sucesso na regeneração da biodiversidade e na recuperação de serviços ecossistêmicos, mesmo em paisagens antropizadas (Brancalion et al., 2019).

Já para um processo de restauração ativa, uma cadeia de suprimentos voltados à restauração é crucial para garantir a quantidade e a diversidade de sementes e mudas necessárias. Tal cadeia é caracterizada por três elos principais (a) coleta e processamento de sementes, (b) produção e comercialização de mudas e (c) serviços e monitoramento de restauração. Portanto, ampliação da restauração requer a ampliação da produção, comercialização e prestação de serviços que se traduziria, também, em ampliação da oferta de oportunidades e renda para a população local (Jacovak et al., 2024).

Ampliar e Redesenhar a Rede de Áreas Protegidas

De acordo com Malecha e colaboradores (2023), uma parcela significativa das espécies atualmente protegidas por UCs no Brasil poderá perder suas condições climáticas ideais até o final do século. Isso significa que, sem ajustes espaciais, as UCs podem se tornar “ilhas ecológicas obsoletas”, incapazes de acompanhar os deslocamentos da biodiversidade induzidos pelas mudanças ambientais. É fundamental, portanto, que a expansão da rede considere novas áreas de refúgio climático, em especial nos biomas sub-protegidos, como o Pampa e a Caatinga, que concentram menos de 1% das UCs de proteção integral.

Além da criação de novas unidades, é necessário reconfigurar a funcionalidade da rede, promovendo: a) a formação de corredores ecológicos climáticos, que garantam mobilidade genética e adaptativa; b) a integração entre áreas públicas e privadas, incluindo RPPNs, terras indígenas, territórios de uso tradicional e OMECs (outros mecanismos espaciais eficazes); c) a conversão de terras públicas não designadas - cerca de 600 mil km² atualmente vulneráveis à grilagem e desmatamento ilegal (Vieira & Silva, 2024) - em áreas protegidas ou terras indígenas; d) o uso de planejamento sistemático de conservação para orientar decisões de alocação territorial. O redesenho da rede de UCs não deve ocorrer isoladamente, mas articulado com estratégias de restauração ecológica, regularização fundiária e manejo adaptativo da paisagem.

Por fim, a maioria das UCs ainda carece de Plano de Manejo, uma deficiência que precisa ser urgentemente corrigida, incorporando nesses planos perspectivas de longo prazo para a adaptação às mudanças climáticas. A inclusão de instrumentos de governança participativa, como conselhos gestores fortalecidos e pactos territoriais de conservação, também é essencial para garantir legitimidade e efetividade em longo prazo.

Manter e ampliar a conectividade ecológica

A fragmentação da paisagem e o isolamento de habitats naturais figuram entre os principais fatores de risco para a biodiversidade em cenários de mudanças climáticas. Ecossistemas desconectados comprometem o fluxo gênico, dificultam a dispersão de espécies em resposta às mudanças do clima, reduzindo a resiliência ecológica, especialmente frente a eventos extremos e alterações no regime climático. Por isso, a manutenção e ampliação da conectividade ecológica deve ser considerada um eixo estruturante do planejamento territorial brasileiro (Encalada et al., 2024).

O de Ribeiro e colaboradores (2009) demonstra que a criação de corredores ecológicos, mosaicos agroflorestais e o manejo da matriz da paisagem são estratégias fundamentais para permitir o deslocamento altitudinal e latitudinal de espécies, à medida que suas áreas de distribuição se deslocam por efeito das mudanças climáticas. A integração funcional de fragmentos florestais, áreas úmidas e savânicas é especialmente urgente em biomas altamente degradados, como a Mata Atlântica, o Cerrado e o Pantanal.

É essencial que o planejamento ecológico seja incorporado aos processos de: I) expansão urbana; II) implementação de infraestrutura de transportes e energia; III) zoneamento ecológico-econômico; IV) regularização fundiária e ordenamento rural; e V) uso de forma eficiente de áreas já desmatadas, reduzindo pastagens de baixa produtividade, convertendo-as em sistemas de produção diversificados.

A criação e o fortalecimento de Zonas de Amortecimento, Corredores Ecológicos e Mosaicos de Conservação permitem articular territórios com diferentes graus de proteção, ampliando a conectividade sem comprometer a produção. Iniciativas como o Projeto Corredores Ecológicos do MMA, embora promissoras, ainda carecem de escala nacional e de articulação com políticas setoriais. Adicionalmente, a adoção de ferramentas geoespaciais e modelagens de conectividade devem ser incorporadas à governança territorial, como circuitos de fluxo ecológico, análises de resistência da paisagem e identificação de gargalos funcionais.

Financiar e Fortalecer a Ciência, Inovação e Participação

A transição para uma nova era da conservação climática exige uma revolução no papel da ciência e da tecnologia, ancorada na geração de conhecimento aplicado, no monitoramento de alta resolução e na integração entre saberes acadêmicos, tradicionais e locais. Sobretudo, porque o Brasil não pode depender de soluções geradas em outros países, ainda que cientificamente mais avançados, pois elas não foram desenvolvidas para as necessidades específicas de nossos biomas.

Frente à complexidade e à velocidade das transformações climáticas e ecológicas, torna-se cada vez mais necessário investir em sistemas dinâmicos de observação, modelagem e resposta adaptativa, sustentados em ampla base social e territorial. As plataformas AdaptaBrasil (<https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br>) do Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação e AdaptaClima (<http://adaptaclima.mma.gov.br/plataforma>) do Ministério do Meio Ambiente e Mudanças Climáticas são bons exemplos. Ferramentas como bioindicadores fisiológicos e moleculares, modelagem ecológica espacial, *big data* de biodiversidade e sensoriamento remoto multitemporal estão se consolidando como instrumentos essenciais para entender e antecipar os impactos climáticos sobre a biodiversidade brasileira.

Paralelamente, os saberes ecológicos tradicionais, acumulados por povos indígenas, comunidades quilombolas e populações tradicionais, oferecem chaves interpretativas e práticas resilientes para o manejo da biodiversidade em contextos extremos. Incorporá-los de forma legítima às políticas públicas é essencial não apenas por justiça epistêmica, mas por eficácia territorial e adaptabilidade socioecológica.

O papel do Estado é decisivo na construção de arranjos institucionais voltados ao financiamento de soluções como estas, não apenas por meio do investimento direto em pesquisa via Ministérios como o da Ciência, Tecnologia e Inovação, mas também por meio de instrumentos indutivos, como compras governamentais, subsídios e incentivos fiscais para empresas que investem em pesquisa e desenvolvimento. Embora o Brasil já disponha de marcos legais que permitem esse tipo de atuação, sua aplicação ainda é limitada, fragmentada e pouco articulada entre os diferentes níveis de governo (Rauen & Paiva, 2023; WEF, 2018).

A governança científica da conservação climática deve, portanto, estar baseada em: I) infraestrutura científica pública e descentralizada; II) financiamento de longo prazo para pesquisa aplicada; III) integração entre redes de dados ecológicos, climáticos e sociais; e IV) inclusão plena das comunidades locais na produção e no uso do conhecimento.

CONCLUSÕES

O momento é decisivo: o Brasil reúne condições únicas para liderar uma nova agenda global, alicerçada em soluções baseadas na natureza, conhecimento tradicional e inovação tecnológica. A conservação climática dos biomas brasileiros deixa de ser apenas uma política ambiental para se tornar, por um lado, uma política de segurança nacional - com impactos diretos sobre a segurança hídrica, alimentar, energética e social - e, por outro, um projeto econômico de país, capaz de gerar cadeias de valor sustentadas por produtos da sociobiodiversidade.

Este capítulo destaca que o Brasil possui capacidade científica e tecnológica comprovada para monitoramento e conservação, além de marcos legais avançados para implementação de instrumentos econômicos. A experiência bem-sucedida do PPCDAm demonstra que políticas públicas coordenadas podem reverter rapidamente tendências de degradação, enquanto o conhecimento tradicional de povos indígenas e comu-

nidades locais oferece estratégias de manejo sustentável, que podem ser integradas às políticas nacionais de adaptação climática.

Com suas características peculiares, todos os biomas brasileiros serão impactados pelas mudanças climáticas, ainda que de formas distintas. Nos cenários mais extremos que, a cada dia, se mostram mais próximos da nossa realidade imediata, o colapso iminente dos biomas também implica em impactos nas comunidades humanas que dependem de seus serviços ecossistêmicos, comprometendo o bem-estar das populações.

O combate à crise climática e ambiental exige superação de desafios estruturais que podem ser classificados em três tipos: a fragmentação do conhecimento científico, que deixa biomas inteiros sub-protégidos por falta de dados adequados; a descoordenação institucional, que separa artificialmente as agendas de clima, biodiversidade e desenvolvimento; e a implementação limitada dos instrumentos econômicos já previstos em lei.

Mesmo com o horizonte preocupante, as soluções baseadas em ciência e nos diálogos com os conhecimentos locais e tradicionais estão disponíveis e podem ser aplicadas para gerar respostas rápidas aos desafios do país. Diante disso, repensar os arranjos institucionais brasileiros para que estejam à altura da emergência climática torna-se uma tarefa prioritária, seja para mobilizar recursos que financiem essas soluções, seja para integrar informações e conhecimentos já existentes, que podem beneficiar a governança e a formulação de políticas públicas.

O Brasil vive um paradoxo histórico: é, simultaneamente, um dos países mais biodiversos do planeta e um dos mais ameaçados pela convergência entre mudanças climáticas e degradação ambiental. “Fazer a lição de casa”, atualizando suas políticas climáticas, expandindo áreas protegidas, investindo em restauração e integrando ciências com a gestão pública, requer uma decisão nacional frente às pressões políticas e econômicas que levam à perda de seus ecossistemas.

Apesar dos obstáculos, o país dispõe de caminhos concretos para liderar uma nova agenda, baseada em transparência, justiça climática, soberania ecológica e diálogo de conhecimentos científico e territorial. Mais do que um desafio técnico, o que está em jogo é a capacidade do Brasil de redefinir seu papel no mundo, não como fornecedor de matéria-prima, mas como potência ambiental e climática.

OS BIOMAS BRASILEIROS: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS

A Amazônia é uma floresta tropical densa, que inclui florestas de terra firme, várzeas e igapós, abrigando mais de 10% da biodiversidade do mundo. Além da rica biodiversidade, o bioma têm um papel importante na regulação climática global, armazenando até 64 toneladas de carbono por hectare, acima do solo, em florestas intactas (Longo et al., 2016). Além disso, 10 a 23 bilhões de litros de água evaporada da vegetação amazônica é transportada rumo ao sul do continente (Arraut et al., 2012), o que contribui para a formação de chuva em outras regiões do Brasil, atuando como fonte de água doce em escala continental. Cerca de 27 milhões de pessoas vivem na Amazônia Legal brasileira (IBGE, 2023), das quais cerca de 250 mil são indígenas. O uso do solo inclui o extrativismo vegetal e mineral como bases tradicionais da economia regional, mas, nas últimas décadas, a expansão da pecuária extensiva e da agricultura comercial em áreas desmatadas tornou-se predominante, o que prejudica a provisão dos serviços ecossistêmicos da floresta (Qin et al., 2022). Comunidades indígenas, ribeirinhas e quilombolas dependem do uso sustentável da floresta para sua subsistência.

O Cerrado é caracterizado por uma vegetação herbácea, de grama e arbus- tos, intercalado por árvores de médio porte, apresentando plantas com adaptações ao fogo e à seca. O Cerrado brasileiro, classificado como a savana mais biodiversa do planeta, e um dos dois *hotspots* de biodiversidade localizados no Brasil, abriga mais de 12 mil espécies de plantas, das quais cerca de 40% são endêmicas (Myers et al., 2000). É também a principal região de recarga hídrica do Brasil, alimentando grandes bacias hidrográficas como as dos rios São Francisco, Tocantins-Araguaia, Paraná-Paraguai e Amazonas. No entanto, o bioma enfrenta uma pressão sem precedentes: estima-se que mais de 50% de sua vegetação nativa já tenha sido perdida, principalmente pela expansão agropecuária, sobretudo do agronegócio voltado à soja, milho e pecuária extensiva (Strassburg et al., 2017). Mais de 20 milhões de pessoas vivem em áreas de Cerrado, muitas delas com renda atrelada à frente de expansão agropecuária (IBGE, 2004).

OS BIOMAS BRASILEIROS: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS

A Mata Atlântica é um bioma predominantemente influenciado pelo clima tropical úmido, graças à proximidade do Oceano Atlântico. A combinação de relevo acidentado e cobertura florestal gera ambientes localmente mais frescos e com elevados índices de chuva. Ela engloba vários tipos de formações florestais e ecossistemas associados, como manguezais, restingas e campos de altitude. Classificada como *hotspot* global de biodiversidade, abriga cerca de 20 mil espécies de plantas vasculares e mais de 2 mil espécies de vertebrados, com alto grau de endemismo (Myers et al., 2000). O bioma abrange cerca de 65% da população brasileira (Resende et al., 2024), compreendendo diferentes usos do solo, desde o agrícola ao urbano-industrial, somando-se ainda diversos povos e comunidades tradicionais, como indígenas (Guarani, Tupiniquim, Pataxó, dentre outros), quilombolas, caiçaras e ribeirinhos. A Mata Atlântica fornece serviços ambientais essenciais para milhões de pessoas, especialmente na manutenção de solos férteis, conservação da água, polinização da agricultura, estabilização climática, dentre outros. Porém, é um bioma altamente impactado e fragmentado, estimando-se uma cobertura total de vegetação nativa na ordem de 28% (MapBiomas, 2023) — apenas cerca da metade de floresta madura — dispersa em pequenos fragmentos florestais em propriedades privadas e remanescentes maiores em Unidades de Conservação.

A Caatinga é caracterizada por um clima semiárido, quente e seco, com chuvas escassas e irregulares e altas temperaturas médias anuais. Devido à forte insolação, a evapotranspiração da vegetação excede a precipitação sobre o bioma, tornando a região propícia à desertificação, principalmente em áreas degradadas. A vegetação predominante é composta por arbustos, árvores de pequeno porte com raízes profundas, suculentas variadas e ervas anuais que aproveitam a curta estação chuvosa — todas adaptadas ao solo pedregoso e à baixa umidade. Embora menos exuberante que os demais biomas, a Caatinga é, ainda assim, um dos biomas semiáridos mais biodiversos do mundo, com fauna e flora única, sendo que cerca de 33% da flora e 15% da fauna são endêmicas, isto é, exclusivas da Caatinga (Silva, Leal & Tabarelli, 2017). Sua vegetação assegura a proteção de solo contra erosão e atua para manter a fertilidade através da ciclagem de nutrientes, mesmo em condições semi áridas, além de influenciar o regime de chuvas locais, evitando a completa desertificação. Cerca de 30 milhões de pessoas vivem no semiárido, incluindo sertanejos, povos indígenas (Pankararú, Xukuru, dentre outros) e comunidades quilombolas (IBGE, 2017). Grande parte de sua população rural enfrenta condições de vulnerabilidade e depende da criação extensiva de caprinos e ovinos, além da agricultura de subsistência e do extrativismo.

OS BIOMAS BRASILEIROS: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS

O Pantanal é um ambiente de confluência de biomas vizinhos, combinando espécies da Amazônia, do Cerrado e do Chaco boliviano/paraguaio. Com verão quente e chuvoso e inverno seco e ameno, o bioma é caracterizado por extensas inundações sazonais, sendo que até 80% da planície pantaneira é alagada no pico das chuvas (Alho & Silva, 2012). Nas áreas permanentemente alagadas, há abundância de plantas aquáticas, enquanto, próximo aos rios, há matas de galerias densas, com árvores de grande porte, e gramíneas e arbustos nos campos não inundáveis, mais elevados (Alho & Silva, 2012). Essas características contribuem para uma alta biodiversidade aquática e de aves, além de mamíferos e répteis, todos adaptados ao ciclo de cheias (Junk, Bayley & Sparks, 1989). Suas várzeas alagáveis regulam o ciclo hidrológico regional, evitando enchentes nos períodos de cheia, e mantendo a vazão dos rios nos períodos de estiagem (Lázaro & Oliveira Jr., 2020). Além disso, a vegetação aquática pantaneira promove purificação da água, removendo sedimentos e poluentes, além de assegurar habitat e rotas migratórias para diversas espécies (de Groot, Brander & Max Finlayson, 2018). Cerca de 3 milhões de pessoas vivem em áreas definidas como Pantanal, muitas vivendo em assentamentos rurais, fazendas e pequenas comunidades tradicionais. A principal atividade econômica realizada no bioma é a pecuária extensiva de gado. Todavia, nos últimos anos, houve uma redução crítica de massa de água e mudança na hidrologia do bioma devido à perda significativa de vegetação e aumento de incêndios (Mapbiomas, 2024).

O Pampa se constitui de campos nativos, formados principalmente por gramíneas e outras herbáceas, moldadas por um clima temperado, sem estação seca, com verões quentes e invernos frios. O clima favorece a formação de uma vegetação perene, mas também com alta vulnerabilidade a extremos, como secas ou ondas de frio muito intensas (Zheng et al., 2024). Apesar do aspecto homogêneo, o Pampa apresenta endemismos de plantas, aves e pequenos animais, formando uma reserva de recursos genéticos de espécies adaptadas ao clima temperado (Rolim & Overbeck, 2025). Ocupando apenas 2% do território nacional, o bioma é altamente utilizado para agropecuária e, nas últimas décadas, extensas áreas foram convertidas em lavouras (soja, arroz, trigo, milho). Essa intensa ocupação faz do Pampa um dos biomas menos protegidos do país, com apenas 3% do território sob proteção de parques, reservas e áreas de proteção ambiental (APA) (Santos, 2023).

REFERÊNCIAS

- Albagli, S., Rocha, L. 2021. Ciência cidadã no Brasil: um estudo exploratório. In M. M. Borges & E. S. Casado (Orgs.), *Sob a lente da ciência aberta: olhares de Portugal, Espanha e Brasil* (pp. 489–511). ISBN 978-989-26-2022-0.
- Aldana-Mejía, J. A., et al. 2025. Bioactive metabolites of Brazilian red propolis: Cytotoxic, antiplasmodial, and antimicrobial properties. *Fitoterapia*, Volume 181, 106351. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.106351>
- Alho, C. J. R., Silva, J. S. V. 2012. Effects of severe floods and droughts on wildlife of the Pantanal wetland (Brazil)—A review. *Animals*, 2(4), 591–610. <https://doi.org/10.3390/ani2040591>
- Alves-Ferreira, G., Heming, N. M., Talora, D., Keitt, T. H., Solé, M., & Zamudio, K. R. 2025. Climate change is projected to shrink phylogenetic endemism of Neotropical frogs. *Nature Communications*, 16(1), 3713. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59036-2>
- Arraut, J.M; Nobre, C.; Barbosa, H.M.J; Obregon, g.; Marengo, J. 2012. Aerial rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its relation to Amazonia and to Subtropical rainfall in South America. *J. Climate*, 25, 543–556.
- Artaxo, P., 2020. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados* 34, 53-66. 10.1590/s0103-4014.2020.34100.005
- Bergamin, R.S., Bastazini, V.A.G., Esquivel-Muelbert, A., Bordin, K.M., Klipel, J., Debastiani, V. J., Vibrans, A.C., Loyola, R., Müller, S.C. 2024. Elevational shifts in tree community composition in the Brazilian Atlantic Forest related to climate change. *Journal of Vegetation Science* 35, e13289. 10.1111/jvs.13289
- Beuchle, R., Grecchi, R.C., Shimabukuro, Y.E., Seliger, R., Eva, H.D., Sano, E., Achard, F. 2015. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography* 58, 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>
- Boit, A., Sakschewski, B., Boysen, L., Cano-Crespo, A., Clement, J., Garcia-Alaniz, N., Kok, K., Kolb, M., Langerwisch, F., Rammig, A., Sachse, R., vanEupen, M., vonBloh, W., Zemp, D.C., Thonicke, K. 2016. Large-scale impact of climate change vs. land-use change on future biome shifts in Latin America. *Global Change Biology* 22, 3689-3701. 10.1111/gcb.13355
- Braga, A., Laurini, M. 2024. Spatial heterogeneity in climate change effects across Brazilian biomes. *Scientific Reports* 14, 16414. 10.1038/s41598-024-67244-x
- Brancalion, P.H.S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F.S.M., AlmeydaZambrano, A.M., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J.L., Strass-

- burg, B.B.N., Wilson, S., Chazdon, R.L. 2019. Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances* 5, eaav3223. 10.1126/sciadv.aav3223
- Braz-Mota, S., Val, A.L. 2024. Fish mortality in the Amazonian drought of 2023: the role of experimental biology in our response to climate change. *J. Exp. Biol.* 227, jeb247255. 10.1242/jeb.247255
- Campos, D., Braz-Mota, S., Val, A.L., Almeida-Val, V.M.F. 2019. Predicting thermal sensitivity of three Amazon fishes exposed to climate change scenarios. *Ecological Indicators* 101, 533-540. 10.1016/j.ecolind.2019.01.051
- Castellanos, E., 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., 2022. Central and South America. In: Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S. , Mintenbeck, K., Alegria, A. , Craig, M. , Langsdorf, S. , Löschke, S. , Möller, V. , Okem, A., Rama B. (eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689–1816. 10.1017/9781009325844.014
- Castro, M. P. 2023. Áreas protegidas do Cerrado: vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa). Universidade Federal de Viçosa.
- Cavazos, T., Bettolli, M. L., Campbell, D., Sánchez Rodríguez, R. A., Mycoo, M., Arias, P. A., Rivera, J., Reboita, M. S., Gulizia, C., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Sörensson, A. A., Cerezo-Mota, R., Stephenson, T. S., Ley, D., & Mahon, R. 2024. Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Frontiers in Climate*, 6. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1392033>
- Cerbu, G. A., Swallow, B., Thompson, D. Y. 2011. Locating REDD: A global survey and analysis of REDD readiness and demonstration activities. *Environ. Sci. Pol.*, Volume 14, issue 2, pages 168-180. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.09.007>
- Colman, C. B. *et al.* 2024. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights potential tipping points. *Scientific Reports*, 14, Article 1304.
- Cortinhas Ferreira Neto, L., Diniz, C.G., Maretto, R.V. *et al.* (2024). Uncontrolled Illegal Mining and Garimpo in the Brazilian Amazon. *Nat Commun* 15, 9847. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54220-2>
- Crouzeilles, R., Vale, M.M., Cerqueira, R., Grelle, C.E.V. 2013.. Increasing strict protection through protected areas on Brazilian private lands. *Environmental Conservation* 40, 209-210. 10.1017/S0376892912000367
- Dalzochio, T., Rodrigues, G. Z. P., Petry, I. E., & Silva, L. B. 2016. The use of bio-markers to assess the health of aquatic ecosystems in Brazil: a review. *International Aquatic Research*, 8, 283–298.

de Groot, D.; Brander, L.; Max Finlayson, C. 2018. Wetland ecosystem services. *Wetl. B. I Struct. Funct. Methods*, 13, 323–333.

Doblas, J., Reis, M. S., Belluzzo, A. P., Quadros, C. B., Moraes, D. R. V., Almeida, C. A., Maurano, L. E. P., Carvalho, A. F. A., Sant'Anna, S. J. S., & Shimabukuro, Y. E. (2022). DETER-R: An Operational Near-Real Time Tropical Forest Disturbance Warning System Based on Sentinel-1 Time Series Analysis. *Remote Sensing*, 14(15), 3658. <https://doi.org/10.3390/rs14153658>

Elith, J., Leathwick, J.R. 2009. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology. Evolution and Systematics* 40, 677-697. 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159

Embrapa. 2010, 24 de junho. Secador solar é tema de palestra para estudantes e produtores do setor madeireiro. Embrapa. Recuperado de <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18127207/secador-solar--e-tema-de-palestra-para-estudantes-e-produtores-do-setor-madeireiro>.

Embrapa. 2023, 20 de março. Soja com genoma editado para tolerância à seca é aprovada pela CTNBio. Embrapa. Recuperado de <https://www.embrapa.br/.../soja-com-genoma-editado-para-tolerancia-a-seca-e-aprovada-pela-ctnbio>

Encalada, A.C., Val, A.L., Athayde, S., Espinoza, J.C., Macedo, M., Marmontel, M., Miranda, G., Piedade, M.T.F., Silva, T.M., Arieira, J. 2024. Conserving the Amazon's freshwater ecosystems' health and connectivity, Policy Brief. SDSN-UN, Washington, DC, 24.

Esquivel-Muelbert, A., Baker, T.R., Dexter, K.G., Lewis, S.L., Brien, R.J.W., Felddpausch, 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., Bonal, D., Davila Cardozo, N., Erwin, T., Fauset, S., Héault, B., Laurance, S., Poorter, L., Qie, L., Stahl, C., Sullivan, M.J.P., ter Steege, H., Vos, V.A., Zuidema, P.A., Almeida, E., Almeida de Oliveira, E., Andrade, A., Vieira, S.A., Aragão, L., Araujo-Murakami, A., Arets, E., Aymard C, G.A., Baraloto, C., Camargo, P.B., Barroso, J.G., Bongers, F., Boot, R., Camargo, J.L., Castro, W., Chama Moscoso, V., Comiskey, J., Cornejo Valverde, F., Lola da Costa, A.C., del Aguilu Pasquel, J., Di Fiore, A., Fernanda Duque, L., Elias, F., Engel, J., Flores Llampazo, G., Galbraith, D., Herrera Fernández, R., Honorio Coronado, E., Hubau, W., Jimenez-Rojas, E., Lima, A.J.N., Umetsu, R.K., Laurance, W., Lopez-Gonzalez, G., Lovejoy, T., Aurelio Melo Cruz, O., Morandi, P.S., Neill, D., Núñez Vargas, P., Pallqui Camacho, N.C., Parada Gutierrez, A., Pardo, G., Peacock, J., Peña-Claros, M., Peñuela-Mora, M.C., Petronelli, P., Pickavance, G.C., Pitman, N., Prieto, A., Quesada, C., Ramírez-Angulo, H., Réjou-Méchain, M., Restrepo Correa, Z., Roopsind, A., Rudas, A., Salomão, R., Silva, N., Silva Espejo, J., Singh, J., Stropp, J., Terborgh, J., Thomas, R., Toledo, M., Torres-Lezama, A., Valenzuela Gamarra, L., van de Meer, P.J., van der Heijden, G., van der Hout, P., Vasquez Martinez, R., Vela, C., Vieira, I.C.G., Phillips, O.L. 2019. Compositional response

of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology* 25, 39-56. <https://doi.org/10.1111/gcb.14413>

Gatti, L.V., Basso, L.S., Miller, J.B., Gloor, M., Domingues, L.G., Cassol, H.L.G., Tejada, G., Aragão, L.E.O.C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A.H., Corrêa, S.M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C.S.C., Crispim, S.P., Neves, R.A.L. 2021. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595, 388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

Freitas, A. 2025, 27 de julho. Em ano de COP, Congresso tem 44 projetos que mexem em políticas ambientais. UOL Notícias. Recuperado de <https://noticias.uol.com.br/politica/ultimas-noticias/2025/07/27/em-ano-de-cop-congresso-tem-44-projetos-que-afrouxam-politicas-ambientais.htm>

Giannini, T. C., Siqueira, M. F., Acosta, A. L., Barreto, F. C. C., Saraiva, A. M., & Alves-dos-Santos, I. 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia*, 63(3), 651-655. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602012000300017>

Guizar-Coutiño, A., Jones, J. P. G., Balmford, A., Carmenta, R., Coomes, D. A. 2022. A global evaluation of the effectiveness of voluntary REDD+ projects at reducing deforestation and degradation in the moist tropics. *Conservation Biology*, 36(6), Article e13970. <https://doi.org/10.1111/cobi.13970>

Halla, M. (Org.). 2020. Governança territorial indígena na América Latina. Forest Trends. Repositório ACERVA Digital da Socioambiental. Recuperado de <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/c2l00003.pdf>

Harris, M.B., Tomas, W., Mourão, G., Silva, C.J., Guimarães, E.T., Sonoda, F., Fachim, E. 2005. Safeguarding the Pantanal wetlands: Threats and conservation initiatives. *Conservation Biology* 19, 714-720.

Heinrichs-Caldas, W. et al. 2024. Environmental Nucleic Acids: A Toolkit for Monitoring Diversity, Conservation, and Environmental/Population Health. In: de Souza, S.S., Braz-Mota, S., Val, A.L. (eds) *The Future of Amazonian Aquatic Biota*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66822-7_13

Hirota, M., Holmgren, M., van Nes, E. H., & Scheffer, M. 2011. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, 334(6053), 232-235. <https://doi.org/10.1126/science.1210657>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Mapa de Biomas do Brasil – Primeira aproximação. Disponível em <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. População residente e características gerais — Censo Demográfico. Disponível em: <https://censo.ibge.gov.br/>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. Censo demográfico 2022: resultados. IBGE. <https://www.ibge.gov.br/censos/censo-demografico-2022>

IPCC. 2021. Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, ..., B. Zhou (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 University Press, Cambridge, 2391. 10.1017/9781009157896.

IPCC. 2022. Summary for Policymakers. In: Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S. , Mintenbeck, K., Alegria, A. , Craig, M. , Langsdorf, S. , Löschke, S. , Möller, V. , Okem, A., Rama B. (eds.). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33. 10.1017/9781009325844.001.

Jakovac C.C., Nascimento, N., Gallegos, S.C., Celentano, D., Vieira D.L.M., Fernandes, C.C., Brienza Junior, S., & Pellicciotti, A.S. 2024. Strategies for implementing and scaling up forest restoration in the Amazon, Policy Brief. Science Panel for the Amazon, United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Available from <https://www.theamazonwewant.org/spot-reports/>. doi: 10.55161/donQ675.

Jenkins, C.N., Alves, M.A.S., Uezu. A., Vale, M.M. 2015. Patterns of Vertebrate Diversity and Protection in Brazil. PLoS ONE 10, e0145064. 10.1371/journal.pone.0145064

Jokura, T. 2023, junho. Novas ferramentas para rastrear produtos florestais. Revista Pesquisa FAPESP. Recuperado de <https://revistapesquisa.fapesp.br/novas-ferramentas-para-rastrear-produtos-florestais/>

Junk, W. J., Bayley, P. B., Sparks, R. E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In D. P. Dodge (Ed.), Proceedings of the International Large River Symposium. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 106, 110–127.

Kill, J. 2020, 28 de agosto. REDD: The pitfalls of market-compliant forest conservation. Heinrich-Böll-Stiftung. Recuperado de <https://www.boell.de/en/2020/08/28/redd-pitfalls-market-compliant-forest-conservation>

Kintisch, E. 2007. Improved monitoring of rainforests helps pierce haze of deforestation. Science, 316(5824), pp.536-537.

Lázaro, W. L., Oliveira-Júnior, E. S. 2020. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal wa-

ter regime. *Acta Limnologica Brasiliensis*, 32, e104. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>

Longo, M., Keller, M., dos-Santos, M. N., Leitold, V., Pinagé, E. R., Baccini, A., Morton, D. C., Frolking, S. 2016. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(11), 1639-1660. <https://doi.org/10.1002/2016GB005465>

Lovejoy, T.E., Nobre, C.A., 2018. Amazon Tipping Point. *Science Advances* 4, eaat2340. 10.1126/sciadv.aat2340

Lucas, K.R.G., Caldarelli, C.E., Ventura, M.U., 2023. Agriculture and biodiversity damage: A prospective evaluation of the impact of Brazilian agriculture on its ecoregions through life cycle assessment methodology. *Science of the Total Environment* 899, 165762. 10.1016/j.scitotenv.2023.165762

Malecha, A., Vale, M.M., Manes, S., 2023. Increasing Brazilian protected areas network is vital in a changing climate. *Biological Conservation* 288, 110360. 10.1016/j.biocon.2023.110360

Malecha, A., Mendes, C.B., Melo, Y., Manes, S., Vale.M.M. 2024. O Papel das Unidades de Conservação e do Reflorestamento na Redução do Risco de Enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. In: Peixoto, S.L., Vale, M.M., Mesquita, C.A.B., Mendes, C.B. (Org.). *A Floresta da Janela*. Rio de Janeiro: Lumen Juris, p. 305-317. 0.17655/lumens.9788551932216.12

Malecha, A., Manes, S., Vale, M.M. 2025. Climate change and biodiversity in Brazil: What we know, what we don't, and Paris Agreement's risk reduction potential. *Perspectives in Ecology and Conservation*, XXX. 10.1016/j.pecon.2025.03.004

Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M.G., Field, C.B., Knowlton, N., 2020. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transaction of the Royal Society B Biological Sciences B* 375, 20190104. 10.1098/rstb.2019.0104

Manes, S., Costello, M.J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.A., Jenkins, R., Khan, T.M., Kiessling, W., Krause, C., Maharaj, S.S., Midgley, G.F., Price, J., Talukdar, G. Vale, M.M. 2021. Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation* 257, 109070. 10.1016/j.biocon.2021.109070

Manes, S., Vale, M.M. 2022. Achieving the Paris agreement would substantially reduce climate change risks to biodiversity in central and South America. *Regional Environmental Change* 22, 60. 10.1007/s10113-022-01904-4

Manes, S., Vale, M.M., Malecha, A., & Pires, A.P. 2022. Nature-based solutions promote climate change adaptation safeguarding ecosystem services. *Ecosystem Service*, 55, 101439. 10.1016/j.ecoser.2022.101439

Manes, S., Gama-Maia, D., Vaz, S., Pires, A. P., Tardin, R. H., Maricato, G., Bezer-
ra, D.S., Vale, M. M. 2023. Nature as a solution for shoreline protection against
coastal risks associated with ongoing sea-level rise. *Ocean & Coastal Management* 235, 106487. 10.1016/j.ocecoaman.2023.106487

MapBiomass. 2023. Coleções Anuais de Uso e Cobertura da Terra no Brasil. Pro-
jeto MapBiomass, <https://mapbiomas.org>.

MapBiomass. 2024, 12 de novembro. Redução de superfície de água no Pan-
tanl favorece incêndios. MapBiomass. Recuperado de <https://brasil.mapbiomas.org/2024/11/12/reducao-de-superficie-de-agua-no-pantanl-favorece-incendios/>

MapBiomass. 2025. Desmatamento caiu em todos os biomas brasileiros
em 2024. MapBiomass Brasil. Recuperado de <https://brasil.mapbiomas.org/2025/05/15/mapbiomas-desmatamento-caiu-em-todos-os-biomass-brasileiros-em-2024/>

Martins, G., Mendes, C.B., Malecha, A., Lyra, G.B., Dias, A.T.C., Vale, M.M. 2024.
O Papel das Unidades de Conservação e do Reflorestamento na Atenuação das
Ilhas de Calor na Cidade do Rio de Janeiro. In: Peixoto, S.L., Vale, M.M., Mesquita,
C.A.B., Mendes, C.B. (Org.). A Floresta da Janela. Rio de Janeiro: Lumen Juris,
p. 319-335. 10.17655/lumens.9788551932216.13

Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Leal, K.R.D., Broedel, E., Seluchi, M.E.,
Michelin, C.M., Baião, C.F.P., Angulo, E.C., Almeida, E.K., Kasmierczak, M.L.,
Mateus, N.P.A., Silva, R.C., Bender, F. 2021. Extreme Drought in the Brazilian Pan-
tanl in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers Water* 3,
639204. 10.3389/frwa.2021.639204

Marengo, J.A., Jimenez, J.C., Espinoza, J.C., Cunha, A.P., Aragão, L.E.O.C.
2022. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern
Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports* 12, 457. 10.1038/
s41598-021-04241-4

Martinelli, L. A., Filoso, S. 2021. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and
drier. *Regional Environmental Change*, 21, 101.

Mataveli, G., Jones, M.W., Carmenta, R., Sanchez, A., Dutra, D.J., Chaves, M.,
Oliveira, G., Anderson, L.O., Aragão, L.E. 2024. Deforestation falls but rise of wil-
dfires continues degrading Brazilian Amazon forests. *Global change biology* 30,
e17202. 10.1111/gcb.17202

Milhorance, C., Sabourin, E., Chechi, L. 2018. Adaptação às mudanças climá-
ticas e integração de políticas públicas no semiárido pernambucano. Armix/
Odisseia INCT, Brasília, DF, 39 pages.

Ministério da Economia (Brasil). 2024. Brazil's second nationally determined
contribution (NDC): National determination to contribute and transform. UN-
FCCC. Recuperado de https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Se-

cond%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf

Moura, M. R., do Nascimento, F. A. O., Paolucci, L. N., Silva, D. P., & Santos, B. A. 2023. Pervasive impacts of climate change on the woodiness and ecological generalism of dry forest plant assemblages. *Journal of Ecology*, 111(8), 1762–1776. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14139>

Muniz, A. C., Lemos-Filho, J. P. de, Lovato, M. B. 2024. Non-adaptedness and vulnerability to climate change threaten *Plathymenia* trees (Fabaceae) from the Cerrado and Atlantic Forest. *Scientific Reports*, 14, Article 25611. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75664-y>

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858. 10.1038/35002501

NASA. 2025. Vital signs: Global temperature. NASA. Recuperado em 7 de agosto de 2025, de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121>

Nepstad, D. et al. 2014. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* 344, 1118-112. DOI:10.1126/science.1248525

Nobre, C.A., Borma, L.D.S. 2009. 'Tipping points' for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28-36. 10.1016/j.cosust.2009.07.003

Nobre, C., Sampaio, G., Borma, L., Castilla-Rubio, J., Silva, J., Cardoso, M. 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 10759-10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>

Observatório do Clima. 2025, 24 de julho. Análise técnica defende veto integral do PL 2159: "inconstitucional e incompatível com o interesse público". Observatório do Clima. Recuperado de <https://www.oc.eco.br/analise-tecnica-defende-veto-integral-do-pl-2159-inconstitucional-e-incompativel-com-o-interesse-publico/>

Overbeck, G.E., Müller, S.C., Fidelis, A., Pfadenhauer, J., Pillar, V.D., Blanco, C.C., Boldrini, I.I., Both, R., Forneck, E.D. 2007. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 9, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.07.005>

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2013. Base científica das mudanças climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – Sumário Executivo. Rio de Janeiro: PBMC. ISBN: 978-85-285-0208-4.

Pereira, R. D., Brazílio, L. de P., Trejo-Rangel, M. A., Santos, M. D., Silva, L. M. B., Souza, L. F., Barbosa, A. C. S., Oliveira, M. R., Santos, R., Sato, D. P., & Iwama, A.

- Y. (2023). Traditional and local communities as key actors to identify climate-related disaster impacts: A citizen science approach in Southeast Brazilian coastal areas. *Frontiers in Climate*, 5. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1243008>
- Pimentel, J.S., Bulhões, R.S., Rodrigues, P.C. 2024. Bayesian spatio-temporal modeling of the Brazilian fire spots between 2011 and 2022. *Scientific Reports* 14, 21616. 10.1038/s41598-024-70082-6
- Pinho, P. F., Anjos, L. J. S., Rodrigues-Filho, S., Santos, D. V., & Toledo, P. M. 2020. Projections of Brazilian biomes resilience and socio-environmental risks to climate change. *Sustainability in Debate*, 11(3), 225–241. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33918>
- Pivello, V.R. 2011. The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present. *Fire Ecology* 7, 24-39. 10.4996/fireecology.0701024
- Pörtner, H.O. 2010. Oxygen- and capacity-limitation of thermal tolerance: a matrix integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems. *J. exp. Biol.* 213, 881-893. <https://doi.org/10.1242/jeb.037523>
- Pouteau, R., Birnbaum, P. 2016. Island biodiversity hotspots are getting hotter: vulnerability and shifts in species richness in New Caledonia. *Biological Conservation*, 204, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.020>
- Prizibisczki, C. 2020, 30 de setembro. Brasil precisa comprar imagens privadas de satélite? Entenda a polêmica. ((o))eco.
- Qin, Y., Xiao, X., & Fearnside, P. M. 2022. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 13, 5145. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32169-0>
- Qin, Y., Xiao, X., Liu, F., de Sa e Silva, F., Shimabukuro, Y., Arai, E., & Fearnside, P. M. (2023). Forest conservation in Indigenous territories and protected areas in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 6(3), 295–305. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01018-z>
- Rauen, A. T. & Paiva, V. P. 2020. Buying to develop: The experience of Brazil and China in using public procurement to drive innovation. *International Journal on Management of Innovation & Technology*, 17, 2050021
- Resende, A. F., et al. 2024. How to enhance Atlantic Forest protection? Dealing with restoration plantings that use a small, biased, and homogeneous set of tree species. *Journal of Environmental Management*, 372, 118732. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.118732>
- Rezende, C.L., Scarano, F.R., Assad, E.D., Joly, C.A., Metzger, J.P., Strassburg, B.B.N., Tabarelli, M., Fonseca, G.A., Mittermeier, R.A. 2018. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation* 16, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>

- Ribeiro, M.C., Metzger, J.P., Martensen, A.C., Ponzoni, F.J., Hirota, M.M. 2009. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation* 142, 1141-1153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>
- Ribeiro, M.C., Martensen, A.C., Metzger, J.P., Tabarelli, M., Scarano, F., Fortin, M.-J. 2011. The Brazilian Atlantic Forest: A Shrinking Biodiversity Hotspot, in: F.E. Zachos, J.C. Habel (Eds.), *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 405-434. 10.1007/978-3-642-20992-5_21
- Roberti, D. R., Mergen, A., Gotuzzo, R. A., Veeck, G. P., Bremm, T., Marin, L., de Quadros, F. L. F., & Jacques, R. J. S. 2024. Sustainability in natural grassland in the Brazilian Pampa biome: Livestock production with CO₂ absorption. *Sustainability*, 16(9), 3672. <https://doi.org/10.3390/su16093672>
- Roesch, L.F.W., Vieira, F.C.B., Pereira, V.A., Schünemann, A.L., Teixeira, I.F., Senna, A.J.T., Stefenon, V.M. 2009. The Brazilian Pampa: A Fragile Biome. *Diversity* 1, 182-198. 10.3390/d1020182
- Rolim, R. G., Müller, S. C., Overbeck, G. E. 2025, 9 de janeiro. Plantas características de campos conservados: um parâmetro para subsidiar a conservação do bioma Pampa. *Bio Diverso*, 4(1), artigo eletrônico 4e4, 1-20. Disponível em <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/140760>.
- Rorato, A. C., Escada, M. I. S., Camara, G., Picoli, M. C. A., Verstegen, J. A. 2022. Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon Indigenous Lands. *Environmental Science and Policy*, 129, 19-36. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.005>
- Santos, E.A., Fortini, R.M., Cardoso, L.C.B., Zanuncio, J.C. 2023. Climate change in Brazilian agriculture: vulnerability and adaptation assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 20, s13762-13022-04730-13767. 10.1007/s13762-022-04730-7
- Santos, J. V. 2023, 7 de dezembro. Patinho feio da conservação no Brasil, Pampa perde área equivalente a cinco cidades de Porto Alegre. Entrevista especial com Eduardo Vélez Martin. IHU — Instituto Humanitas Unisinos. Disponível em <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/159-entrevistas/634990-patinho-feio-da-conservacao-no-brasil-pampa-perde-area-equivalente-a-cinco-cidades-de-porto-alegre-entrevista-especial-com-eduardo-velez-martin>
- Silva, J. M. C., Leal, I. R., & Tabarelli, M. (Eds.). 2017. *Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America (1^a ed.)*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3>
- Silva Junior, C.H.L., Pessôa, A.C.M., Carvalho, N.S., Reis, J.B.C., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C. 2021. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020

is the greatest of the decade. *Nature Ecology & Evolution* 5, 144-145. 10.1038/s41559-020-01368-x

Soterroni, A. C., Império, M., Scarabello, M. C., Seddon, N., Obersteiner, M., Rochedo, P. R. R., Schaeffer, R., Andrade, P. R., Ramos, F. M., Azevedo, T. R., Ometto, J. P. H. B., Havlík, P., & Alencar, A. A. C. 2023. Nature-based solutions are critical for putting Brazil on track towards net-zero emissions by 2050. *Global Change Biology*, 29(24), 7085-7101. <https://doi.org/10.1111/gcb.16984>

Souza, M.T.V., Sales-Shimomoto, V., Silva, G.S., Val, A.L. 2023. Microplastics and the Amazon: From the rivers to the estuary. *Quimica Nova* 46, 655-667. 10.21577/0100-4042.20230066

Souza, S. S., Braz-Mota, S., Val, A. L. 2025. Introduction. In *The future of Amazonian aquatic biota*, 590 pp., Cham, Switzerland, Springer.

Strassburg, B.B.N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A.E., Oliveira Filho, F.J.B., Scaramuzza, C.A.d.M., Scarano, F.R., Soares-Filho, B., Balmford, A., 2017. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0099. 10.1038/s41559-017-0099

Strassburg, B.B.N., Iribarrem, A., Beyer, H.L., Cordeiro, C.L., Crouzeilles, R., Jakovac, C.C., Braga Junqueira, A., Lacerda, E., Latawiec, A.E., Balmford, A., Brooks, T.M., Butchart, S.H.M., Chazdon, R.L., Erb, K.-H., Brancalion, P., Buchanan, G., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P.F., Kapos, V., Leclère, D., Miles, L., Obersteiner, M., Plutzar, C., de M. Scaramuzza, C.A., Scarano, F.R., Visconti, P., 2020. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature* 586, 724-729. 10.1038/s41586-020-2784-9

Swift, B. 2024, 14 de outubro. Why biodiversity credits cannot work (commentary). Mongabay. Recuperado de <https://news.mongabay.com/2024/10/why-biodiversity-credits-cannot-work-commentary/>

Urban, M.C. 2024. Climate change extinctions. *Science* 386, 1123-1128. 10.1126/science.adp4461

Vale, M.M., Souza, T.V., Alves, M.A.S., Crouzeilles, R. 2018. Planning protected areas network that are relevant today and under future climate change is possible: the case of Atlantic Forest endemic birds. *PeerJ* 6, e4689. 10.7717/peerj.4689

Vale, M.M., Vieira, M.V., Grelle, C.E.V., Manes, S., Pires, A.P., Tardin, R.H., Weber, M.M., Menezes, M.A., O'Connor, L., Thuiller, W., Tourinho, L. 2023. Ecosystem services delivered by Brazilian mammals: spatial and taxonomic patterns and comprehensive list of species. *Perspectives in Ecology and Conservation* 21, 302-310. 10.1016/j.pecon.2023.10.003

Vardon, M.J., Lindenmayer, D.B. 2023. Biodiversity market doublespeak. *Science* 382, 491-491. 10.1126/science.adg6823

- Vieira, I. C. G. 2023. Desafios para o enfrentamento da crise ambiental da Amazônia: região é peça-chave no equilíbrio climático global e na conservação de parte relevante da biodiversidade mundial. Cienc. Cult. vol 75 no. 4. São Paulo Out./Dez. <http://dx.doi.org/10.5935/2317-6660.20230046>
- Vieira, I. C. G., Silva, J. M. C. 2024. Zero deforestation and degradation in the Brazilian Amazon. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(5), 413–416. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.03.004>
- Warren, R., Price, J., Graham, E., Forstenhaeusler, N., VanDerWal, J. 2018. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science* 360, 791-795. [10.1126/science.aar3646](https://doi.org/10.1126/science.aar3646)
- Welch, J. R., & Coimbra Jr., C. E. A. 2021. Indigenous fire ecologies, restoration, and territorial sovereignty in the Brazilian Cerrado: The case of two Xavante reserves. *Land Use Policy*, 104, Article 104055. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104055>
- Wolfe, J.D., Luther, D.A., Jirinec, V., Collings, J., Johnson, E.I., Bierregaard, R.O., Stouffer, P.C., 2025. Climate change aggravates bird mortality in pristine tropical forests. *Science Advances* 11, eadq8086. [10.1126/sciadv.adq8086](https://doi.org/10.1126/sciadv.adq8086)
- WEF - World Economic Forum. 2018. The Global Competitiveness Report 2017–2018: Brazil Competitiveness and Inclusive Growth Lab Report [Suplemento]. World Economic Forum.
- Zheng, W., Askari, K.; Song, C.; Shi, P.; Ge, W.; Shi, S.; Chu, J.; Chen, H.; Wang, F. 2024. Increasing vulnerability of vegetation to Meteorological and Groundwater drought: A case study in Argentina. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 55, 101931. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101931>