

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Estado da arte
e fronteiras do
conhecimento

Brasília, 2025



Editora
Ibict

A mudança do clima veio pra ficar. Está no centro da agenda pública. Falhar no seu enfrentamento poderá nos custar anos de desenvolvimento, agravar vulnerabilidades e multiplicar desigualdades. Conhecer os fenômenos em andamento e entender seus múltiplos impactos - na sociedade, na economia e nos ecossistemas - são condições essenciais para gerar políticas públicas efetivas, orientar a atuação do setor privado, combater a desinformação e mobilizar a sociedade para o enorme desafio que temos pela frente.

O agravamento da emergência climática ocorre num contexto em que conflitos políticos, militares e comerciais desafiam o sistema multilateral. A Presidência Brasileira da COP30 fez um chamado à responsabilidade ética dos líderes e à ação coordenada das instituições públicas, privadas e do terceiro setor: é urgente mobilizar capacidades e recursos para reverter a causa do problema – o aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa - e para implementar medidas de adaptação que poderão salvar vidas, minimizar perdas e danos e evitar efeitos desproporcionais sobre as populações vulnerabilizadas.

Parabéns ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e às diversas instituições e pesquisadores que, por meio deste livro, sintetizam o melhor conhecimento científico sobre o tema. Este trabalho complementa e orienta as várias iniciativas que, desde 2023, recolocaram a mudança do clima como agenda nacional estratégica, por meio do Plano Clima e seus planos setoriais de Mitigação e Adaptação, do Plano de Transformação Ecológica e de diversos outros instrumentos de ação pública. E vamos à ação!

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Estado da arte
e fronteiras do
conhecimento

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luís Inácio Lula da Silva
Presidente da República

Geraldo José Rodrigues Alckmin Filho
Vice-Presidente da República

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Barbosa de Oliveira Santos
Ministra da Ciência, Tecnologia e Inovação

Luis Manuel Rebelo Fernandes
Secretário Executivo

Andrea Latgé
Secretária de Políticas e Programas Temáticos

Oswaldo Luiz Leal de Moraes
Diretor para o Clima e Sustentabilidade

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Estado da arte
e fronteiras do
conhecimento



Brasília, 2025



Esta obra é licenciada sob uma licença *Creative Commons* - Atribuição CC BY-NC-ND 4.0, sendo permitida a reprodução parcial ou total, desde que mencionada a fonte, de uso não comercial e sem derivações.

ORGANIZADORES DO LIVRO

Oswaldo Luiz Leal de Moraes
Andrea Latgé

Ima Célia Guimarães Vieira
Luiz Antonio Elias

José Marengo
Luiz Davidovich

CONSELHO EDITORIAL

Gustavo Silva Saldanha
Milton Shintaku
Luana Sales

Franciéle Garcês
Leyde Klébia Rodrigues da Silva
Stella Moreira Dourado

Daniel Strauch
Walisson Oliveira

CONSELHO EDITORIAL COMITÊ EDITORIAL

Tiago Braga
Henrique Denes
Ricardo Pimenta
Carlos André Amaral de Freitas

Alexandre Oliveira
Emanuelle Torino
Milton Shintaku
Cecília Leite Oliveira

Leda Cardoso Sampson Pinto
Marcel Souza
Washington Segundo
Alexandre Faria de Oliveira

EQUIPE TÉCNICA

Design editorial: Samanta Coan

Capa: Felipe Schelb Avila

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M943 Mudanças climáticas no Brasil: estado da arte e fronteiras do conhecimento / Oswaldo Luiz Leal de Moraes; et al. (Org.). – Brasília, DF: Editora Ibict, 2025. 496 p. : il.

Inclui Bibliografia.

ISBN (digital): 978-85-7013-246-8

ISBN (físico): 978-85-7013-244-4

DOI: 10.22477/9788570132468

1. Mudanças climáticas. 2. Clima - Brasil. 3. Crise climática. 4. Biodiversidade - Brasil. I. Moraes, Oswaldo Luiz Leal de, org. II. Título.

CDU 551.583

Bibliotecária Stella Dourado CRB-5/2013

Como citar:

MORAES, Oswaldo Luiz Leal de (Org.). **Mudanças climáticas no Brasil: estado da arte e fronteiras do conhecimento**. Brasília, DF: Editora Ibict, 2025.

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia ou do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

Endereço: **Ibict – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia**

Setor de Autarquias Sul (SAUS), Quadra 05, Lote 06, Bloco H – 5º andar

CEP: 70.070-912 - Brasília, DF.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO **13**

Luciana Santos - Ministra de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação

PREFÁCIO **15**

Organizadores

1. ESTADO DA ARTE DO CONHECIMENTO DA VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL **23**

Jose A. Marengo, Lincoln M. Alves, Sin C. Chou

2. A FLORESTA AMAZÔNICA EM TRANSFORMAÇÃO DEVIDO AO DESMATAMENTO, QUEIMADAS E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS **59**

Luciana V. Gatti, Camilla L. Cunha, Jose A. Marengo,
Ben-Hur Marimon, Beatriz S. Marimon, Julia Arieira, Carlos Nobre

3. BIOMAS CONTINENTAIS E BIODIVERSIDADE FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS **85**

Adalberto L. Val, Ima C.G. Vieira, Mariana M. Vale,
Sérgio Lucena Mendes, Tiago da Mota e Silva

4. DEGRADAÇÃO FLORESTAL NO BRASIL E A CRISE CLIMÁTICA **153**

Liana O. Anderson, Luiz E.O.C. Aragão

5. O PAPEL CENTRAL DA ÁGUA NA RESILIÊNCIA E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS

187

Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, Dirceu Silveira Reis Junior, Eduardo Mario Mendiondo, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins, Francisco de Assis Souza Filho, Pedro Borges Chaffe, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Rosa Maria Formiga Johnsson, Saulo Aires de Souza, Walter Collischonn

6. OCEANO E ZONAS COSTEIRAS

241

Segen Farid Estefen, Moacyr Cunha de Araujo, Regina R Rodrigues, Leticia Cotrim da Cunha, Margareth S Copertino, Beatrice Padovani Ferreira, Flavia Lucena Frédou, Ronaldo Oliveira Cavalli, Carlos Alberto E. Garcia, Carla de Freitas Campos, Alexander Turra, Jose Luiz Moutinho, Win Degrave, Paulo Gadelha, Leandra Regina Gonçalves, Ronaldo Christofolletti, Wania Duleba, Milena Maltese Zuffo, Andrei Polejack

6.1 Clima e oceano

246

Regina R. Rodrigues

6.2 Vulnerabilidade e resiliência costeira e oceânica

252

Moacyr Cunha de Araujo Filho

6.3 Acidificação do oceano

259

Leticia Cotrim da Cunha

6.4 Biodiversidade

265

Margareth S. Copertino

6.5 Recifes de corais

273

Beatrice Padovani Ferreira

6.6 Pesca e aquicultura

280

Flávia Lucena Frédou, Ronaldo Olivera Cavalli

6.7 Observação oceânica e costeira

289

Carlos Alberto Eiras Garcia

6.8 Transição energética

294

Segen Farid Estefen

6.9 Saúde e oceano

301

Carla de Freitas Campos, Wim Degrave, Alexander Turra, José Luiz Moutinho, Paulo Gadelha

6.10 Justiça climática e comunidades costeiras tradicionais

306

Leandra Regina Gonçalves

6.11 Cultura oceânica 313
Ronaldo Christofolletti

6.12 Governança oceânica 319
Wânia Duleba, Milena Maltese Zuffo, Andrei Polejack

6.13 Conclusões 323

7. A CONTRIBUIÇÃO DA CIÊNCIA AGRÍCOLA BRASILEIRA PARA OS DESAFIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 325

Eduardo Delgado Assad, Stoécio Maia, Jurandir Zullo Jr,
Vanessa Pugliero, Eduardo Pavão, João Paulo Silva

8. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SAÚDE 365

Celia R. S. Garcia, Bruno Caramelli, Mariana Veras, Marie-Anne Van Sluys,
Paulo Saldiva, Evangelina Araujo, Mariana Farrel Côrtes, Nazareno Scaccia,
Thaís Guimarães, Silvia Figueiredo Costa, Maria Cassa Mendes-Correa,
Ester Cerdeira Sabino, Giselle Maria Rachid Viana, Carolina Aguiar,
Nathália Nogueira Chamma Siqueira, Izis Monica Carvalho Sucupira

**8.1 Emergências climáticas, poluição e doenças
cardiovasculares: a crise (nem tão) invisível do Século XXI** 368
Bruno Caramelli

8.2 Mudanças climáticas e saúde: uma abordagem urbana 380
Mariana Veras, Marie-Anne Van Sluys, Paulo Saldiva

**8.3 Impacto da crise climática nas infecções bacterianas
e na disseminação da resistência aos antibióticos** 388
Evangelina Araújo, Marina Farrel Côrtes, Nazareno Scaccia,
Thaís Guimarães, Silvia Figueiredo Costa

**8.4 Arbovírus e mudanças climáticas:
desafios contemporâneos** 396
Maria Cassia Mendes-Correa, Ester Cerdeira Sabino

8.5 Malária, mudanças climáticas e perspectivas 402
Giselle Maria Rachid Viana, Carolina Aguiar, Nathália Nogueira
Chamma Siqueira, Izis Mônica Carvalho Sucupira, Celia R. S. Garcia

8.6 Conclusão 414

**9. DESASTRES, IMPACTOS E
VULNERABILIDADES RELACIONADOS
ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL** **417**

Oswaldo L. L. Moraes, Regina Alvalá, Pedro Camarinha,
Ana Paula Cunha, Silvia Saito, Marcelo Seluchi, Rachel Trajber

**10. MUDANÇAS CLIMÁTICAS: IMPACTOS
ECONÔMICOS IDENTIFICADOS E PROJETADOS
NO BRASIL** **475**

Eduardo Amaral Haddad, Andréa Bento Carvalho,
Jaqueline Coelho Visentin

APRESENTAÇÃO

O Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) apresenta, neste livro, a contribuição dos cientistas brasileiros para a Ciência das Mudanças Climáticas. O livro é uma das entregas do MCTI para a COP30. A concepção dessa obra é mais do que coletar as informações daquilo que sabemos. Também é apontar quais os desafios que estão colocados na fronteira do conhecimento. O livro é ambicioso. A tarefa não é simples. Mas, por outro lado, é necessária.

O MCTI possui Unidades de Pesquisas (UPs) vinculadas as quais possuem, em suas missões institucionais, áreas de conhecimento intimamente vinculadas com a temática do livro. Mas, por outro lado, há outras áreas de conhecimento nas quais a expertise está fora destas unidades. Por isso o livro contém contribuição de pesquisadores intra e extramuros do Ministério.

A diversidade dos capítulos reflete uma visão holística de como essa questão deve ser abordada. A agenda climática não pode ser, apenas, a agenda dos gases de efeito de estufa. O planeta é um só e outras agendas globais devem andar em paralelo. Não podemos esquecer da agenda da biodiversidade e as suas COPs específicas e muito menos Conferência das Nações Unidas sobre os Oceanos. Não podemos deixar de lado a agenda de desastres e o Marco de Sendai. Por isso o livro é, também, ambicioso.

O livro é colocado como um marco na qual a pesquisa empírica deve encontrar os processos de tomada de decisão. O pesquisador tende a se concentrar demais na sua área e pode parecer distante do processo de formulação de políticas. Mas esses dois campos estão interligados e seus resultados se influenciam imensamente. A interação dinâmica entre ciência e política pública é alimentada pela necessidade urgente de abordar questões complexas que as sociedades contemporâneas enfrentam. E as mudanças climáticas, talvez, seja a mais premente.

A Ciência, Tecnologia e Inovação é importante para as políticas públicas porque impulsiona o crescimento econômico e o desenvolvimento nacional, fornece elementos baseados em evidências para a resolução eficaz de problemas e fomenta a inovação em diversos setores. A integra-

ção da CTI permite que os governos criem políticas mais robustas, promovendo ecossistemas colaborativos, aproveitando dados e ferramentas digitais para uma melhor tomada de decisões e garantindo que os serviços públicos sejam inovadores, eficientes e inclusivos.

Nesse contexto, uma política articulada e integrada com os diversos atores do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação com os formuladores de políticas públicas é indispensável para que possamos avançar para uma sociedade mais justa, inclusiva e sustentável.

Essa é a visão com que o MCTI vem conduzindo e pautando a sua atuação. Fornecer fundamentos baseados na Ciência para a formulação de Políticas Públicas e é, exatamente, nesse sentido que esse livro se enquadra.

Luciana Santos

Ministra de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação

PREFÁCIO

Vivemos um tempo em que transformações tecnológicas aceleradas, tensões geopolíticas e a emergência climática se entrelaçam, redesenhando a economia mundial e redefinindo as relações entre nações. A fragmentação das cadeias globais de valor, a corrida por tecnologias estratégicas e a transição energética colocam novos desafios e também novas oportunidades. O Brasil, com sua biodiversidade, seu potencial científico e sua matriz energética majoritariamente renovável, não pode ser mero espectador: deve se posicionar como ator estratégico neste cenário de mudanças profundas. A diversidade dos capítulos, neste livro, reflete uma visão holística de como essa questão deve ser abordada.

Não resta dúvidas de que o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e a Convenção Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (UNFCCC) vêm produzindo informações e administrando negociações que gerem ações que possam levar à sustentabilidade do planeta. Mas a agenda climática não pode ser, apenas, a agenda dos gases de efeito de estufa. O planeta é um só e outras agendas globais devem andar em paralelo. Não podemos esquecer da agenda da biodiversidade e as suas COPs específicas e muito menos Conferência das Nações Unidas sobre os Oceanos. Não podemos deixar de lado a agenda de desastres e o Marco de Sendai. Por isso o livro é ambicioso.

É impossível não considerar, como mostrado no livro, que projeções climáticas, estimam que a temperatura média anual, no Brasil, possa aumentar entre 2,5 e 4,5°C até 2100 na maior parte do país. Áreas como o semiárido nordestino e o sul da Amazônia podem sofrer secas prolongadas e severas, afetando a produção agrícola, os recursos hídricos e a saúde pública. Também é alarmante que a Ciência esteja nos dando evidências recentes de uma estreita ligação entre condições climáticas extremas e as emissões atmosféricas de carbono da Amazônia, indicando que a floresta pode estar em transição de seu papel histórico de absorvedora de CO₂ para uma preocupante fonte de emissões de carbono* devido à degradação e mudanças climáticas.

A modelagem de nicho ecológico mostra que até 43% das espécies de plantas na Amazônia podem perder pelo menos 30% de sua área de

distribuição até 2070. Das aproximadamente 8.000 espécies avaliadas na Amazônia, incluindo milhares de espécies de plantas e centenas de espécies de vertebrados (principalmente mamíferos e aves) e invertebrados (abelhas), 26% podem estar ameaçadas de extinção devido às mudanças climáticas se cenários pessimistas para as emissões de gases de efeito estufa forem aplicados. Em um cenário em que as metas do Acordo de Paris sejam alcançadas, esse número pode chegar a apenas 14%. Na Mata Atlântica, das aproximadamente 1.300 espécies avaliadas, incluindo coleções de diversas espécies de plantas e centenas de vertebrados (mamíferos, anfíbios e aves) e invertebrados (especialmente mariposas), 31% estão em risco de extinção devido às mudanças climáticas se cenários pessimistas para as emissões de gases de efeito estufa também forem aplicados.

A região costeira e marinha brasileira abriga uma diversidade de habitats, incluindo lagoas, baías, enseadas, deltas de rios, bancos de lama, manguezais, bancos de areia, recifes de corais, bancos de ervas marinhas e áreas de ressurgência. Esses ecossistemas enfrentam ameaças significativas devido às mudanças climáticas, que já estão alterando a riqueza de espécies e a estrutura das comunidades em áreas-chave, incluindo costas rochosas, praias, baías e lagoas costeiras, manguezais, bancos de macroalgas e bancos de ervas marinhas. Os manguezais e os recifes de corais brasileiros são especialmente vulneráveis. Apesar de cobrirem apenas 0,1% do fundo do mar, os recifes de corais abrigam de 25% a 30% de todas as espécies marinhas conhecidas e 65% dos peixes, tornando sua biodiversidade comparável à das florestas tropicais. Esses recifes sustentam comunidades humanas, fornecendo alimentos por meio da pesca, apoiando o turismo, oferecendo compostos farmacêuticos e protegendo as costas da erosão. Esse papel crítico ressalta por que os repetidos alertas científicos sobre o branqueamento e a mortalidade dos corais, que afetam mais de 26 espécies, se intensificaram nas últimas duas décadas.

Estima-se que, na Amazônia, a extensão das florestas degradadas é maior do que a área total desmatada. Cerca de 14% das florestas amazônicas degradadas são subsequentemente desmatadas, sugerindo que esses são processos parcialmente independentes. Por outro lado, o Brasil possui o maior potencial de restauração de florestas tropicais do mundo por meio da regeneração natural. As florestas secundárias são distintas das florestas primárias em termos de estágio evolutivo, composição de espécies, estrutura e funcionalidade, e apresentam uma taxa líquida de

absorção de carbono de 11 a 20 vezes maior que a das florestas primárias. Ou seja, o livro aponta que podemos adotar políticas para gerenciar a degradação florestal e investir em estratégias para regenerar nossas florestas. Isso é essencial para mitigar a crise climática.

Espera-se também que as mudanças climáticas afetem as vazões mínimas dos rios, responsáveis pela manutenção do uso da água e dos ecossistemas durante os períodos de seca. Modelos indicam que as vazões mínimas diminuem na maior parte do Brasil, com flutuações de mais de 50% no sul da Amazônia e em partes do Nordeste. A intermitência (rios completamente secos) pode aumentar na região Nordeste. Além disso, os períodos de escassez hídrica (até dois meses) tendem a aumentar quando a vazão disponível do rio for menor do que a atualmente utilizada como referência para o planejamento do uso da água. Ressalta-se que extremos hidroclimáticos podem afetar não apenas a recarga das águas subterrâneas, mas também a qualidade das águas subterrâneas. Alterações na recarga podem afetar a capacidade de armazenamento dos aquíferos e a disponibilidade de águas subterrâneas. O potencial declínio na disponibilidade de águas superficiais em algumas regiões devido às mudanças climáticas também pode aumentar a pressão sobre as águas subterrâneas, o que afetará significativamente as reservas utilizáveis em condições de sobreexploração e condições alteradas de recarga.

Nossos cientistas mostram que a perda de terras aráveis é o principal fator de perdas em áreas rurais. As regiões semiáridas do Nordeste se tornarão mais secas, enquanto a parte oriental da Amazônia brasileira se tornará um biótopo semelhante a uma savana. A mandioca poderá desaparecer das regiões semiáridas do Nordeste. A produção de milho na região do Agreste, no Nordeste, também deverá ser severamente afetada. Algumas plantas com sementes adaptadas ao clima tropical poderão migrar para o sul do Brasil ou para altitudes mais elevadas para compensar o aumento das temperaturas. Essa migração poderá levar à competição entre áreas e à migração de mão de obra das áreas rurais para regiões mais favoráveis. Outros fatores esperados como parte do estresse sobre os sistemas agrícolas incluem a redução do fluxo de água e do potencial de irrigação, o aumento da incidência de pragas e doenças, mudanças nos biomas e o declínio da biodiversidade animal e vegetal.

As interações entre mudanças climáticas e saúde pública são profundamente discutidas no livro. Mostra-se como o impacto na saúde cardiovascular é exacerbado por eventos extremos, como ondas de calor e

frio, que causam desidratação, hipercoagulabilidade e problemas cardiovasculares, particularmente em populações vulneráveis. O texto contribui ao mostrar como a urbanização desordenada tornou o ambiente urbano um fator agravante da crise climática e sanitária. A impermeabilidade do solo, a perda de espaços verdes e a concentração de atividades em regiões centrais criam ilhas de calor, alteram os padrões de precipitação e favorecem o aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Na área de doenças infecciosas, os efeitos das mudanças climáticas são igualmente devastadores. O impacto das mudanças climáticas nas doenças bacterianas de veiculação hídrica está sendo analisado e requer ação coordenada em todos os setores. A falta de saneamento adequado, o aumento das inundações e a disseminação de roedores estão colocando comunidades inteiras em risco. O capítulo também analisa arbovírus, como a dengue, cuja disseminação está diretamente ligada ao aumento da temperatura global, à urbanização descontrolada e à pobreza. A disseminação do *Aedes aegypti*, facilitada pela piora das condições climáticas e ambientais, representa um grande desafio para a saúde pública. A Amazônia, mais uma vez, demonstra ser o epicentro da vulnerabilidade devido ao desmatamento, aos fluxos migratórios e à fragilidade dos sistemas de saúde. É evidente que, embora a mortalidade esteja diminuindo, a malária está se tornando mais comum, especialmente na Amazônia brasileira. A transmissão é fortemente influenciada por fatores como desmatamento, variabilidade climática e mobilidade humana. As cidades estão se tornando áreas de alto risco e exigem políticas que integrem ética, sustentabilidade e saúde pública ao planejamento urbano.

Entre 1991 e 2020, 23.923 desastres causaram 2.297 mortes, afetaram mais de 77 milhões de pessoas e tiveram um impacto econômico de mais de R\$ 300 bilhões. Em particular, os desastres relacionados a eventos extremos de chuva, que representam cerca de 33% do total, são responsáveis por 93% do total de mortes e 66% das pessoas afetadas. Esses dados mostram o alto potencial de morte e destruição desses eventos, especialmente quando afetam áreas urbanas caracterizadas por múltiplas dimensões de vulnerabilidade, como infraestrutura frágil e inadequada, ocupação irregular de encostas e planícies de inundação, em grande parte devido à falta de planejamento espacial, e caracterizadas por significativa desigualdade social. Desastres de origem geológica, especialmente deslizamentos de terra, são um excelente exemplo: são muito mais raros do que outros tipos de desastres, mas estão entre os mais mortais, espe-

cialmente quando ocorrem em áreas densamente povoadas em encostas vulneráveis ou próximas a elas. Portanto, os fatores determinantes para a ocorrência e magnitude dos desastres só se tornam claros por meio de uma análise em nível local da combinação de riscos naturais e vulnerabilidades sociais e estruturais. Assim, o capítulo que olha os desastres reforça a visão holística do MCTI.

Finalmente, e como gran-finale, o livro discute que, até o final do século, as perdas de PIB devido aos impactos climáticos na agricultura podem ficar entre 0,4% e 1,8% ao ano, dependendo do cenário de emissões. Impactos indiretos, transmitidos por meio de cadeias produtivas e vínculos intersetoriais, tendem a amplificar as perdas diretas, aumentando a urgência de medidas de adaptação com uma abordagem sistêmica. Os autores do capítulo de Economia enfatizam que os impactos das mudanças climáticas não são neutros: afetam desproporcionalmente as regiões mais pobres, marginalizadas e historicamente vulneráveis. A economia deve, portanto, contribuir para uma abordagem de justiça climática, analisando os impactos distributivos das políticas climáticas, levando em consideração variáveis como renda, etnia, gênero, localização geográfica e acesso a bens públicos. O desenvolvimento de instrumentos compensatórios, como transferências condicionais, fundos de adaptação e mecanismos de segurança voltados para populações vulneráveis, deve ser implementado. Políticas que abordem a economia informal e as cadeias produtivas locais, frequentemente negligenciadas nos modelos tradicionais, são essenciais para a resiliência das comunidades.

O livro também representa um momento crítico no qual a pesquisa empírica deve encontrar os processos de tomada de decisão. O pesquisador tende a se concentrar demais na sua área e pode parecer distante do processo de formulação de políticas. Mas esses dois campos estão interligados e seus resultados se influenciam imensamente.

A ciência prospera com base na curiosidade, na experimentação e na validação, buscando descobrir verdades replicáveis e generalizáveis. Por outro lado, as políticas públicas incorporam as regras, regulamentações e estratégias elaboradas por governos e organizações para enfrentar os desafios sociais, promover o progresso e alocar recursos. Enquanto a ciência busca objetividade e verdades universais, as políticas públicas são moldadas por uma miríade de fatores, incluindo ideologias políticas, opinião pública, considerações econômicas e princípios éticos.

Em diversos países, sociedades científicas desempenham papel essencial na mediação entre os avanços da ciência e a formulação de políticas públicas. No Brasil, a Academia Brasileira de Ciências e a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência têm defendido a utilização de evidências científicas nas decisões governamentais, além de publicar estudos e documentos propositivos sobre temas estratégicos para o desenvolvimento sustentável do país. Destacam-se, em especial, as contribuições sobre mudanças climáticas e biodiversidade, elaboradas por renomados pesquisadores.

As Conferências Nacionais de Ciência, Tecnologia e Inovação, a mais recente realizada em julho de 2025, mobilizaram amplos setores da sociedade em torno de debates e propostas para a construção de um projeto integrado de desenvolvimento, com foco social, econômico e ambiental. Esse conjunto de propostas evidencia, pela sua abrangência e profundidade, o grande desafio de transformá-las efetivamente em políticas públicas.

A interação dinâmica entre ciência e política pública é, portanto, indispensável para enfrentar as questões complexas que marcam as sociedades contemporâneas. Entre elas, as mudanças climáticas se apresentam como a mais urgente.

Traduzir descobertas científicas em políticas acionáveis não é simples. Os formuladores de políticas devem navegar em um cenário complexo caracterizado pela incerteza, interesses conflitantes e julgamentos baseados em valores, exigindo que eles equilibrem evidências científicas com outras considerações, como viabilidade, custo-efetividade e valores sociais.

A relação entre ciência e políticas públicas é complexa e por isso deva ser tão debatida nas e entre as comunidades envolvidas. Essa relação dinâmica e simbiótica representa uma intersecção crítica onde a pesquisa encontra os processos de tomada de decisão para moldar o desenvolvimento social, enfrentar desafios complexos e promover o progresso. Ciência e políticas públicas estão intrinsecamente ligadas, influenciando-se e informando-se mutuamente de diversas maneiras para criar uma relação sinérgica que impulsiona a inovação, promove o desenvolvimento sustentável e melhora o bem-estar de indivíduos e comunidades. Em outras palavras, talvez a ambição desse livro seja exatamente essa. Trazer a discussão de como usar o conhecimento que nossos cientistas estão

produzindo para gerar as políticas públicas que o Brasil e o nosso Planeta tanto necessitam.

Compreendemos que políticas públicas devem ter o conhecimento científico e a inovação no centro de sua formulação, fundamentais para a construção de um Brasil soberano e resiliente. Sabemos que a soberania não se limita à defesa territorial: envolve a capacidade de o país responder a crises globais — em especial às mudanças climáticas — a partir de soluções próprias. Portanto, investir em ciência, tecnologia e inovação significa fortalecer a autonomia nacional, reduzir a dependência externa e criar condições para que o Brasil lidere processos de transformação produtiva e social orientadas pela sustentabilidade.

Nesse contexto, uma política articulada e integrada com os diversos atores do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI, quer no plano Federal, Estadual ou municipal, é indispensável para que possamos avançar na reindustrialização verde e no desenvolvimento social. Em todo o mundo, cabe ao Estado assumir papel decisivo na indução de parcerias, no compartilhamento de riscos e benefícios da inovação e na formulação de estratégias de longo prazo que conciliem crescimento econômico, preservação dos ecossistemas e bem-estar coletivo. Colocar o SNCTI a serviço da transição ecológica é assegurar que o Brasil esteja preparado para enfrentar desafios globais com soluções enraizadas em seu próprio território.

A ciência, além de vetor de soberania e inovação, é também instrumento de justiça social. Permite formular políticas que enfrentem desigualdades, ampliem o acesso à educação de qualidade, fortaleçam o sistema de saúde, assegurem a segurança alimentar e promovam a inclusão. Sem ciência, o país permanece preso a estruturas produtivas atrasadas, porém com políticas efetivas e de longo prazo, abre-se a possibilidade de gerar empregos verdes, democratizar o acesso a bens e serviços e melhorar a vida da população. A COP30, a ser realizada no Brasil, representa um marco dessa visão: é a oportunidade histórica de reafirmarmos, diante do mundo, que o conhecimento científico, a inovação sustentável e a justiça social devem caminhar juntos na construção de um futuro comum, capaz de unir desenvolvimento e responsabilidade climática.

Em última instância, talvez seja essa a ambição deste livro: mostrar como transformar o conhecimento produzido por nossos cientistas em políticas públicas que o Brasil e o Planeta urgentemente necessitam.

1. ESTADO DA ARTE DO CONHECIMENTO DA VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Jose A. Marengo¹, Lincoln M. Alves², Sin C. Chou²

INTRODUÇÃO

De acordo com o observatório europeu Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>), o ano de 2024 foi o mais quente já registrado, sendo o primeiro a ultrapassar 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), chegando a 1,6°C. Esse limite de 1,5°C é considerado pelos cientistas como o teto necessário para impedir as piores consequências do aquecimento global, como o desaparecimento de países insulares. Esse limite é também o valor limite pactuado no Acordo de Paris, em 2015. A marca não significa, no entanto, que o planeta já rompeu definitivamente a barreira de 1,5°C e as metas do Acordo de Paris. Para considerar que o limite foi definitivamente violado, seriam necessários vários anos com os termômetros acima desse patamar. Cada um dos últimos 10 anos, de 2015 a 2024, está dentro dos 10 anos mais quentes já registrados. As altas temperaturas globais, juntamente com os níveis recordes globais de vapor de água na atmosfera em 2024, desencadearam a ocorrência de ondas de calor sem precedentes, secas, incêndios, e chuvas intensas, causando significativos impactos e miséria a milhões de pessoas.

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

2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos, SP.
Autor correspondente: jose.marengo@cemaden.gov.br

Na América Latina e no Caribe, 2024 foi o ano mais quente já registrado, com $+0,95^{\circ}\text{C}$ acima do normal registrado no período 1991-2020. No Brasil, segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), 2024 foi o ano mais quente desde 1961, com $+0,79^{\circ}\text{C}$ acima do normal entre 1991 e 2020. Segundo a WMO (WMO 2025), o ano de 2024 foi o mais quente já registado em muitas partes da América do Sul. Entre as cidades que apresentaram os maiores registros de temperatura máxima em 2024, destacam-se os municípios de Goiás (GO), com $44,5^{\circ}\text{C}$, no dia 6 de outubro; Cuiabá (MT), com $44,1^{\circ}\text{C}$, também no dia 6 de outubro; Indiaporã (SP), com $43,3^{\circ}\text{C}$, em 8 de outubro; Aragarças (GO), com $43,3^{\circ}\text{C}$, em 3 outubro; e Rio de Janeiro (Bairro Guaratiba), com $43,2^{\circ}\text{C}$, no dia 28 de novembro

A maior parte do Brasil está sob o efeito do regime de monção, coerente com as variações de chuva geralmente mais abundantes no período de primavera e verão e mais escassas no outono e inverno. De modo geral, a precipitação no noroeste do Brasil permanece intensa durante todo o ano. Já no Brasil Central, a variação sazonal de precipitação é influenciada pela migração sazonal do sistema de alta pressão do Atlântico Sul. Ao sul do Equador, o inverno é a estação seca na faixa tropical ($0-25^{\circ}\text{S}$), com exceção de regiões costeiras junto ao Atlântico, particularmente na costa do Nordeste. Na maior parte do Sul do Brasil, onde há disponibilidade de vapor de água durante todo o ano, condições dinâmicas na atmosfera favorecem máximos relativos de precipitação no outono, inverno e primavera em diferentes regiões. O Sul do Brasil é uma região de transição entre os regimes de monção de verão e de regime de inverno em latitudes médias, tendo sua precipitação bem distribuída ao longo do ano (Grimm e Tedeschi 2009).

O ciclo sazonal das chuvas no Brasil é afetado pelas variações interanuais, que podem interferir provocando, por exemplo, a ocorrência de seca durante a estação chuvosa, ou mesmo uma estação chuvosa abundante. Uma importante fonte de variabilidade interanual são os eventos El Niño e La Niña e o Oceano Atlântico tropical e sul. Na região Norte do país, verifica-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca. Na região Nordeste, a estação chuvosa restringe-se a poucos meses caracterizando um clima semiárido. As regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas. A região Sul do Brasil, devido à sua localização latitudinal, sofre mais influência dos sistemas de latitudes médias, onde

os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano. Com relação às temperaturas, no Brasil, observam-se nas regiões Norte e Nordeste temperaturas elevadas, com pouca variabilidade durante o ano, típicas do clima tropical. Nas médias latitudes, a variação da temperatura no decorrer do ano é mais evidente, com a predominância de baixas temperaturas no período de inverno, quando ocorre maior penetração de massas de ar frio de altas latitudes (Brasil 2020).

Variabilidades nos padrões de circulação de grande escala e escala regional que determinam o Brasil podem afetar o clima regional, gerando situação de chuvas intensas, secas, ondas de calor ou frio. Estas mudanças na circulação podem deflagrar episódios de chuvas intensa e inundações, ou deficiência de chuvas que podem levar a secas, e que em algumas regiões podem aumentar o risco de incêndios florestais. Secas afetam todo o Brasil, tais como 2010-2023 no Sul do Brasil, 2012-2028 no Nordeste, 2019-2023 no centro oeste (Pantanal), 2005, 2010, 2015-16 e 2023-2024 na região Norte (Amazonia). Inundações y deslizamentos de terra são os desastres que mais matam pessoas e juntos com as secas estes desastres são induzidos por eventos extremos de chuva, que são consequência da variabilidade natural de clima e devido ao efeito humano associado ao aquecimento global.

O ano de 2024 foi o mais quente já registrado, sendo o primeiro a ultrapassar 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), chegando a 1,6°C. Esse limite de 1,5°C é considerado pelos cientistas como o teto necessário para impedir as piores consequências do aquecimento global, como o desaparecimento de países insulares. Esse limite é também o valor limite pactuado no Acordo de Paris, em 2015. A marca não significa, no entanto, que o planeta já rompeu definitivamente a barreira de 1,5°C e as metas do Acordo. Para considerar que o limite foi definitivamente violado, seriam necessários vários anos com os termômetros acima desse patamar. Cada um dos últimos 10 anos, de 2015 a 2024, está dentro dos 10 anos mais quentes já registrados. As altas temperaturas globais, juntamente com os níveis recordes globais de vapor de água na atmosfera em 2024, desencadearam a ocorrência de ondas de calor sem precedentes, secas, incêndios, e chuvas intensas, causando significativos impactos e miséria a milhões de pessoas.

Neste capítulo apresentamos uma revisão sobre o estado da arte sobre estudos de clima e variabilidade de clima, com ênfase em extremos do tempo e clima e desastres deflagrados por estes extremos no Brasil.

Também apresentamos uma evolução sobre modelagem de clima no Brasil e geração de cenários de mudanças de clima, apresentando também uma revisão sobre impactos setoriais de mudança de clima.

CLIMA A EXTREMOS CLIMÁTICOS NO BRASIL E OS SEUS IMPACTOS

O Brasil é um país continental. Alguns estudos se referem a um evento como “extremo” se ele não tiver precedentes; outros se referem a eventos que ocorrem várias vezes ao ano como eventos extremos moderados. A raridade de um evento com magnitude fixa também pode mudar sob mudanças climáticas induzidas pelo homem, tornando eventos sem precedentes até agora bastante prováveis sob as condições atuais, mas únicos no registro observacional - e, portanto, frequentemente considerados como “surpresas” (Seneviratne et al. 2021).

Extremos climáticos afetam diretamente os sistemas humanos e naturais no Brasil, na América do Sul e no mundo. Um extremo meteorológico, como uma chuva intensa, não é um desastre. Nesse caso, o desastre são os impactos causados pela chuva sobre uma população vulnerável e morando em áreas expostas a esse fenômeno extremo. Precipitações abundantes levam a inundações, enxurradas e deslizamentos de terra, e as secas aumentam o risco de incêndios florestais e também impactos na agricultura e hidrologia. A América do Sul tem experimentado nas últimas décadas enxurradas, inundações (como em Rio Grande do Sul em Maio 2024-Marengo et al 2024a, 2025a Reboita et al 2024), deslizamentos de terra como aconteceu em Petrópolis e Recife em 2022 e em São Sebastião em 2023-Marengo et al 2022, 2024b, Alcântara et al 2023), períodos de secas como a Seca do Nordeste de 2012-2018, no Sudeste do Brasil em 2013-15, na Amazônia e Pantanal em 2020 e em 2023, 2024-Marengo et al 2017, Alvalá et al 2017, Marengo et al 2021, 2024, 2022, et al 2024), ondas de calor (Marengo et al 2025b) e incêndios florestais que afetam os biomas Amazônia e Pantanal, Nordeste do Brasil (WMO 2024, 2025).

Entre 1948 e 2023, cerca de 11 milhões de pessoas foram afetadas por eventos hidro meteorológicos no país, destacando a necessidade de ações preventivas. Os desastres climáticos destacaram a importância dos sistemas de alerta precoce como uma forma eficaz de minimizar fatalidades, juntamente com uma melhoria na percepção de risco de desastre pela população e tomadores de decisão, para informar o que as pessoas

precisam fazer quando um alerta de risco de desastre é emitido. Embora o clima extremo possa ser bem previsto, cada país precisa implementar, testar e melhorar continuamente os sistemas de alerta precoce para garantir a segurança das pessoas e aumentar a resiliência da população.

Chuvas abundantes e extremas

Extremos de precipitação deflagram inundações, enchentes, enxurradas deslizamentos de terra. Eventos compostos extremos de seca-calor amplificam a seca e os seus impactos e aumentam o risco de incêndios florestais. É importante de distinguir que uma previsão de chuva abundante representa um alerta meteorológico, e que a previsão de alerta de risco de desastre representa o impacto de uma chuva intensa em áreas vulneráveis e expostas afetando diretamente a população morando nessas áreas. Os relatórios AR5 e AR6 do IPCC (IPCC 2013, 2021, 2022) mostram que a frequência e a intensidade de eventos de chuvas intensas provavelmente aumentaram em escala global na maioria das regiões terrestres com boa cobertura observacional. O volume e intensidade da precipitação aumentou em escala continental e no Sul do Brasil nos últimos 50-60 anos, (Figura 1) e a variabilidade natural de clima associada a El Niño, La Niña e o aquecimento do Atlântico tropical norte e sul), assim como a influência humana, em particular as emissões de gases de efeito estufa, é o principal impulsionador de este aumento (IPCC 2021, Dunn et al 2024).

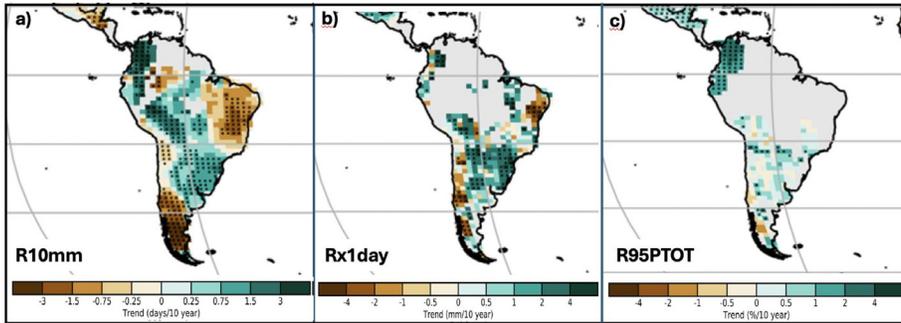


Figura 1: Tendências lineares em séries anuais de índices extremos de precipitação para a América do Sul: (a) R10mm (dias/década); (b) R95pTOT (%/década) e (c) Rx1day (mm/década) durante 1950–2018). As tendências foram calculadas apenas para caixas de grade com dados suficientes (pelo menos 66% dos anos com dados e o último ano da série sendo 2009 ou posterior). Tendências significativas são indicadas com pontilhado. Todos os painéis usam um período de referência de 1961 a 1990, com mapas apresentados em uma grade de longitude-latitude de 1,875° x 1,25°. Adaptado de Dunn et al. 2020.

Para o Brasil a avaliação de extremos e os seus impactos tem sido discutida na literatura publicada entre eles os relatórios do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC 2013, 2014, 2016), e os resultados da Quarta Comunicação Nacional do Brasil a UNFCC (Brasil 2020), e no Plano Nacional de Adaptação (Brasil 2016) e o Relatório de Clima e Desastres do CEMADEN para 2024 (CEMADEN 2025). Os relatórios AR5 e AR6 do IPCC (IPCC 2013, 2021, 2022), no WMO State of Climate for Latin America and the Caribbean desde 2019 (WMO 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025) e o Relatório Especial do IPCC sobre Extremos SREX (IPCC, 2012) discutem sobre extremos no passado e projeções para mudanças em extremos de chuva intensa para o Brasil. Desde o IPCC AR5 (IPCC, 2013), houve novos desenvolvimentos importantes e avanços de conhecimento sobre mudanças em extremos climáticos e de tempo em relação à influência humana em eventos extremos individuais que levam a desastres hidro-geo-meteorológicos.

Na América do Sul, as tendências observadas indicam um aumento na intensidade e frequência de extremos de chuva na sua porção Sudeste do seu território. No Brasil, alguns desses eventos de chuvas intensas foram considerados “incomuns e sem precedentes” em 2023 e 2024. Em fevereiro de 2023, chuvas intensas e deslizamentos de terra mataram 65 pessoas em São Sebastião/São Paulo, e 683 mm foram acumulados em

15 horas, o maior volume de chuva observado na história brasileira em intervalos tão curtos. Em maio de 2024, chuvas intensas de mais de 200 mm/24 horas no vale do Rio Taquari desencadearam enchentes que afetaram a cidade de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, no que é considerado o pior desastre climático do Brasil, deixou 184 mortes e quase 7 bilhões de dólares em perdas econômicas (Marengo et al. 2024a, WMO 2025). Desastres como inundações, enchentes repentinas e deslizamentos de terra, por causa de episódios de chuvas extremas, desencadeiam desastres que matam centenas de pessoas todos os anos no Brasil e na América do Sul.

No Brasil, desastres climáticos aumentam 460% em desde 1991 a 2023. Nos 32 anos analisados pela Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (2025), foram registrados 64.280 desastres climáticos em 5.117 municípios brasileiros (quase 92% do total). Metade dos desastres computados são secas; inundações, enxurradas e enchentes representam 27% e tempestades, 19%. Mais de 219 milhões de pessoas foram afetadas, incluindo mortos, desalojados, desabrigados e enfermos, sendo 78 milhões somente nos últimos quatro anos. Os prejuízos econômicos também aumentaram ao longo das décadas somaram R\$ 547,2 bilhões entre 1995 (primeiro ano desses dados) e 2023. O prejuízo anual médio desde 2020 é de R\$ 47 bilhões por ano, mais que o dobro da média anual da década anterior, de R\$ 22 bilhões anuais. A Tabela 1 mostra uma lista de extremos de precipitação associados aos sistemas acima que geraram extremos de precipitação e desencadearam desastres que causaram fatalidades na região.

Tabela 1: Exemplos de extremos de precipitação de 2022 a 2024 e desastres hidro-geo-meteorológicos subsequentes no Brasil. As informações incluem local, data, valores da precipitação extrema e evento hidrológico, se houver, e referência (Fonte: CEMADEN 2024)

DATA E LUGAR	CHUVAS EXTREMAS E IMPACTOS	REFERÊNCIA
Petrópolis/Rio de Janeiro, fevereiro 15 2022	258 mm/3 horas, fevereiro climatologia 200mm, deslizamentos de terra e enxurradas, 231 mortes	Alcantara <i>et al</i> (2023)
Recife/Pernambuco, Maio 25-20 2022	551 mm/5 dias, climatologia: 411 mm, deslizamentos de terra e enxurradas, 130 mortes	Marengo <i>et al</i> (2023)
Gravatá, Maquiné/Rio Grande do Sul, junho 16 2023	300 mm/24 horas, 11 mortes, 18 desaparecidos devido a inundações.	Floodlist (2023)
São Sebastião/São Paulo, Brasil Fevereiro 18-19 2023	683 mm/15 horas, climatologia: 120 mm, deslizamentos de terra deixaram 65 mortes	Marengo <i>et al</i> (2024b)
Vale do Taquari/Rio Grande do Sul, setembro 3-5 2023	100 mm/24 horas, aumento da cota do rio Taquari em 12 m, setembro 6-7, inundações deixaram 48 mortes	WMO (2024), Alvala <i>et al</i> (2024)
Rio de Janeiro/Rio de Janeiro, fevereiro 21-22 2024	42.8 mm/1 hora, deslizamentos de terra fora da capital, incluindo bairros Barra do Pirai, Japeri, Mendes e Nova Iguaçu, 8 mortes	Floodlist (2024a)
Mimoso do Sul/Espírito Santos, Brasil, março 22-23 2024	Acumulados de chuva variam entre 300 e 600 mm/48 horas, 20 mortes devido a inundações e enxurradas. Perdas da ordem de US 200 milhões na produção de café n	INMET (www.inmet.gov.br)
Vale do Taquari e Porto Alegre Metropolitan Region/Rio Grande do Sul, maio 1-5 2024	A inundação em Porto Alegre foi deflagrada pelas chuvas intensas na bacia do Lago Guaíba, com acumulados que ultrapassaram os 500 mm/5 horas, gerando níveis do lago de 5,35 m em maio 5, maior que a inundação de 1941. 183 mortes	Marengo <i>et al</i> (2024a, 2025b), Reboita <i>et al</i> (2024), Floodlist (2024b)

Segundo a Tabela 1, em 2023, a precipitação acumulada de 683 mm em 15 horas durante os eventos de deslizamento de terra e inundação repentina de São Sebastião, estado de São Paulo, entre 18 e 19 de fevereiro de 2023, matou 65 pessoas (Marengo et al., 2024). As chuvas de 22 e 23 de março tiveram impacto de grande magnitude no Sudeste, com 4 mortes em Petrópolis, 20 em Mimoso do Sul e 183 mortes no Rio Grande do Sul em maio 2024. Chuvas intensas afetaram o estado do Rio de Janeiro no sudeste do Brasil e o estado da Bahia no nordeste do Brasil, causando inundações com vítimas e danos. Inundações ao longo do rio Acre na região oeste da Amazônia causaram danos generalizados e deslocamento em comunidades ribeirinhas no Peru, Brasil e Bolívia em fevereiro de 2024, onde os níveis do rio Acre aumentaram em 6-7 m no espaço de alguns dias. Na Bolívia, em Cobija, os níveis do Rio Acre atingiram 15,83 m. Chuvas fortes afetaram os estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro, causando inundações e desencadeando deslizamentos de terra, causando a morte 27 pessoas (INMET).

Em uma semana de chuva o Rio Grande do Sul viu grande parte de suas cidades e a própria capital invadidas pela água. Imóveis destruídos, mortos, desaparecidos e dezenas de milhares de desabrigados. A tempestade fez com que os rios tributários do Lago Guaíba (rios Taquari, Caí, Pardo, Jacuí, Sinos e Gravataí) transbordassem, levando a níveis recordes de 5,35 m em 5 de maio, mais altos do que a enchente anterior em 1941, contribuindo para inundações em áreas vulneráveis da Região Metropolitana de Porto Alegre e municípios próximos. As chuvas começaram na madrugada do dia 26 de abril, com vários dias de chuva ininterrupta e acúmulo diário acima de 200 mm entre os dias 29 de abril e 3 de maio, retornando no dia 11 de maio (Marengo et al 2024a, 2025 a) (Figura 2). O ENSO foi considerado importante para explicar a variabilidade nas chuvas observadas, e a frente fria que trouxe chuvas permaneceu estacionária no sul do Brasil, uma vez que não pôde se mover para o centro do Brasil devido a um bloqueio atmosférico. Essa foi a catástrofe climática mais extensa e uma das mais devastadoras da história recente do Brasil. O custo estimado da limpeza é de 3,7 bilhões de dólares (Debone et al., 2024), e o impacto econômico desse desastre foi de cerca de 16 bilhões de dólares (1,8% do PIB do estado, em 2024).

A população que vive em áreas vulneráveis e expostas foi avisada e evacuada a tempo. No entanto, o número de fatalidades ainda foi alto. Há necessidade de implementar ações preventivas com a população mais

vulnerável e atividades de educação ambiental para a sociedade. É necessário aumentar a percepção do risco de desastres pela população e pelas autoridades públicas. É necessário melhorar os sistemas de previsão do tempo e alerta sobre o risco de desastres causados por extremos climáticos e, assim, salvar vidas e proteger populações em áreas de risco. O ponto principal deste caso é o aumento do risco de extremos e vulnerabilidade, bem como a gestão territorial insuficiente ou deficiente, o planejamento urbano e os problemas de governança remanescentes nos níveis federal, estadual e local. O Brasil é um exemplo dessa combinação complexa.

A Figura 2 mostra alguns impactos das chuvas extremas e inundações no estado de Rio Grande do Sul de Maio 2024.

a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



Figura 2: Fotos gerais da enchente em Porto Alegre, 5/5/2024. Foto: Gustavo Mansur/Palácio Piratini. Fonte: <https://bit.ly/4mLYZJt>.

Deficiência hídrica e seca

As grandes secas são os desastres naturais mais custosos, superando outros desastres naturais, tais como, inundações, furacões, terremotos e tsunamis. A Figura 3 mostra a evolução temporal da seca no país, com as barras azuis indicando períodos mais úmidos, enquanto as barras vermelhas apontam condições de seca. No Brasil, a partir da década de 1990, as condições de seca se tornaram mais frequentes e severas, culminando em um período mais crítico nos últimos anos. A seca mais intensa aparece em 2024.

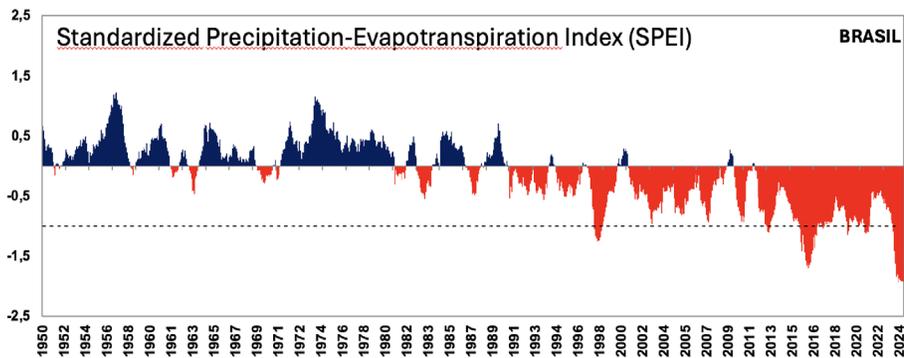


Figura 3: Evolução temporal de secas no Brasil, indicado pelo SPEI (Standard Precipitation Evapotranspiration Index). Fonte: CEMADEN.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) vivenciou uma das maiores secas da sua história. A combinação de baixos índices pluviométricos durante o verão 2014 e 2015 e um grande crescimento da demanda de água, assim como a ausência de um planejamento minimamente adequado para o gerenciamento dos recursos hídricos (e sem contar a parcela de culpa que pode ser atribuída à ausência de consciência coletiva dos consumidores brasileiros para o uso racional da água), tem gerado o que chamamos de “crise hídrica”, uma crise já anunciada, pois enfrentamos situação semelhante durante a “crise do apagão” durante a seca de 2001-2002. Os baixos totais acumulados de chuva sobre a região da Cantareira, ao nordeste da RMSP afetaram significativamente a disponibilidade hídrica dos reservatórios do Sistema Cantareira, localizado na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. O Cantareira é o principal sistema de abastecimento de São Paulo, fornecendo água a 6 milhões de habitantes na região metropolitana. O sistema também é responsável pelo abastecimento de uma população de 5 milhões de pessoas nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Como consequência grave, a população vem sofrendo com o abastecimento de água em grande parte da RMSP e em diversas cidades do estado de São Paulo, sendo o racionamento de água parte da realidade atual do paulistano (Marengo e Alves 2014).

Segundo o CEMADEN, o Brasil enfrentou em 2024 a maior seca dos últimos 70 anos, em extensão e intensidade. Em setembro, 4.748 cidades do Brasil – mais de 80% do total de municípios do país – enfrentavam algum grau de seca, sendo que 1.349 encontravam-se em níveis severos e extremos.

Na Bacia Amazônica a seca severa está relacionada, em parte, com o impacto do El Niño, um padrão climático que esteve presente no segundo semestre de 2023 e no primeiro semestre de 2024 (Espinoza et al 2024, Marengo et al., 2024b; Toreti et al., 2024). No estado brasileiro do Amazonas, até o final de setembro de 2024, das 745 mil pessoas afetadas pela seca, cerca de 330 mil, incluindo aproximadamente 115 mil crianças e adolescentes, que vivem em 2.200 aldeias indígenas e comunidades ribeirinhas, ficaram isoladas ou em risco de isolamento, com graves impactos na saúde, nutrição, acesso à água, proteção e educação. O nível do rio Negro em Manaus registrou 12,11 m em 10 de outubro (Figura 4), sendo esse o nível mais baixo já observado desde o início das medições, em 1902. A figura 5 mostra alguns impactos da seca na região Amazônica.

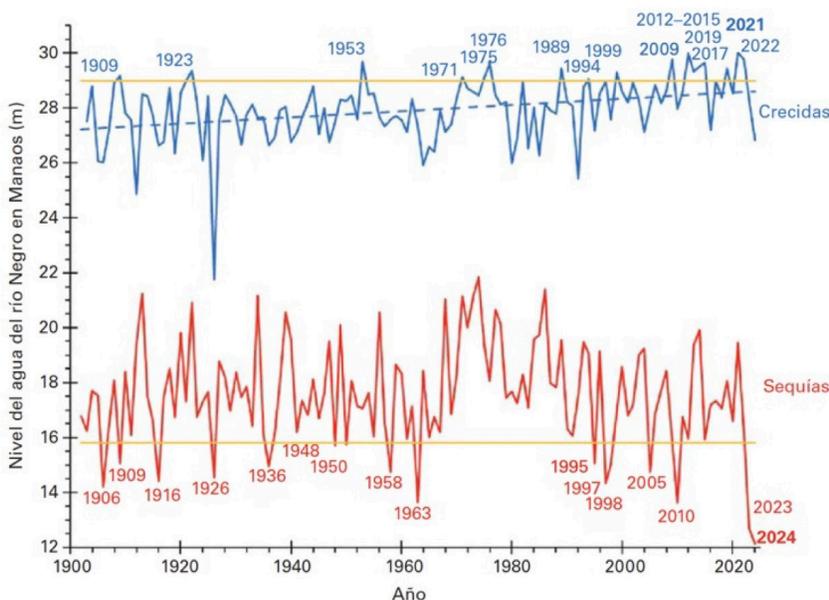


Figura 4: Níveis máximos (linhas azuis) e mínimos (linhas vermelhas) do rio Negro no Porto de Manaus, 1902 a novembro de 2024. Os números azuis e vermelhos indicam anos de enchentes e secas recordes, respectivamente. As linhas laranjas representam os limiares mais alto (29,0 m) e mais baixo (15,8 m) para definir cheias e secas, respectivamente. Os valores estão em metros. Fonte: J. Schongart, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil. (Marengo et al 2024).



Figura 5: a) Ribeirinhos carregam galões de água enquanto atravessam bancos de areia do rio Madeira, comunidade de Paraizinho, Humaitá/Amazonas. Foto: Bruno Kelly/Reuters; b) Além dos graves prejuízos ambientais, a seca também traz perdas significativas para a população e economia local. Foto: Jacqueline Lisboa/WWF-Brasil; c) Imagem da seca em Tabatinga, na região do Alto Solimões/AM. Foto: Defesa Civil; d) Bacia do rio Amazonas enfrenta cenário de grande seca em 2024. Foto: Divulgação/SGB.

O rio Paraguai, em Assunção (Paraguai) atingiu cotas mínimas recordes em setembro, com os níveis de água esgotados pela grave seca rio acima no Brasil, o que dificultou a navegação ao longo da hidrovia Paraná-Paraguai. Em situação crítica, o rio Paraguai atingiu, no dia 8 outubro, o menor nível histórico, com 62 cm, de acordo com o IMASUL. A situação recorde superou o ano de 1964, sendo o pior índice desde o início do monitoramento, em 1900. Em 2024, o rio Paraná, usado como via de transporte fluvial para escoar aproximadamente 80% dos grãos e oleaginosas da Argentina para exportação, esteve no segundo nível mais baixo para esse período do ano desde 1970, atrás apenas de um grande declínio observado em 2021, devido à grande seca a montante no Brasil. Como resultado, grandes navios de grãos que carregam soja e milho nos princi-

países portos fluviais da Argentina, ao redor de Rosário, transportaram menos carga devido à redução do calado. Ainda em 2024, foram registrados os menores níveis do rio Paraguai, desde 1981. Figura 6 mostra impactos da seca no Pantanal de 2024.

a)



b)



c)



d)



Figura 6: a) Margem do rio Paraguai, principal rio do Pantanal, que mostra seca histórica e apresentou nível baixo no MS. Foto: Marcia Foletto; b) Trecho seco do rio Miranda, no distrito de Águas de Miranda, em Bonito/MS, 30/3/2024. Foto: Gustavo Figueroa/SOS Pantanal; c) Brigadistas do Prevfogo combatem incêndio dentro de uma fazenda na região de Miranda/MS. Foto: Lalo de Almeida, 8/3/24 / Folhapress; d) Corpo de Bombeiros em ação no combate a incêndios na região de Abobral, em 2024. Foto: Divulgação/CBMMS.

MODELAGEM CLIMÁTICA

O clima da Terra está sempre mudando ao longo do tempo, desde horas até séculos. A modelagem numérica essencial para aprimorar o conhecimento a respeito dos componentes do sistema climático (atmosfera, superfície terrestre, oceano, gelo marinho etc.), bem como para elencar os possíveis impactos da mudança do clima em diversos setores importantes de um país (como, por exemplo, os de recursos hídricos, energético, agricultura etc.). O resultado dessa modelagem é um dos principais componentes nos estudos de vulnerabilidade climática e de elaboração de medidas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas atuais e por vir, servindo como base para análises de risco e vulnerabilidade, e para, assim, propor políticas de estado para adaptação e mitigação. Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para investigar a resposta do sistema climático a várias forçantes, como as concentrações de gelo marinho, mudança de uso do solo, temperatura da superfície do mar, entre outras. Nesse sentido, eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura global média pode aumentar no século XXI, mas também de como essas mudanças podem afetar o clima no mundo todo (Flato et al., 2013).

Para uma melhor compreensão de como as mudanças climáticas ocorrem em nível regional, é fundamental o acesso a informações mais detalhadas a respeito da região de estudo, como topografia, bacias hidrográficas e linhas costeiras. Com isso, torna-se importante o aumento da resolução espacial dos modelos climáticos globais (MCGs), que, em geral, têm baixa resolução espacial (da ordem de uma a duas centenas de quilômetros) devido ao alto custo computacional necessário para realizar simulações em escala global, e/ou utilizar técnicas de regionalização (conhecidas como *downscaling*) para traduzir as informações fornecidas pelos MCGs em uma escala espacial mais refinada (Ambrizzi et al., 2019; Chou et al., 2014; Flato et al., 2013; Marengo et al., 2012).

Uma previsão de tempo, que é para um prazo de alguns dias (até cerca de 10 dias), fornece-se informações como temperatura e chuva para uma determinada data e até horário do dia. Por outro lado, em uma previsão climática, que é para um prazo de meses a frente, não há mais aquele nível de precisão, fornece-se informações sobre anomalias de temperatura e de chuva para alguns meses a frente. Na previsão climática não se informa data, nem horário, mas se pode informar o regime cli-

mático, as estatísticas como médias, anomalias, extremos do período de meses a frente. A previsão climática é possível pela presença de forçantes (ou condicionantes) que podem conduzir o sistema climático a um estado específico. Anomalias da temperatura da superfície do mar nas regiões equatoriais são típicas forçantes climáticas que levam a anomalias em determinadas regiões do planeta (Shukla, 1983). As condições de umidade do solo, erupções vulcânicas de grande porte, anomalias na estratosfera são exemplos de forçantes na escala climática.

Modelos para previsão de tempo são mais simplificados que Modelos climáticos. Para iniciar uma previsão climática é necessário um modelo global, pois fenômenos meteorológicos podem dar a volta no planeta no prazo de meses. Este modelo global deve possuir oceano acoplado para prever as mudanças na circulação oceânica e, principalmente, mudanças nas anomalias de temperatura da superfície do mar. Para modelar o clima de décadas a frente, é necessário supor, por exemplo, mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa e mudanças no uso da terra, e o modelo passa a incluir processos de vegetação dinâmica, o ciclo de carbono e processos biogeoquímicos e passa da categoria de modelo acoplado para a categoria de modelo do sistema terrestre (Earth System Model).

Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para investigar a resposta do sistema climático a várias mudanças, como mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa, mudanças nas concentrações de cobertura gelo, mudanças no uso da terra, ou mudanças nas circulações oceânicas (Flato et al., 2013). Nesse sentido, eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura do ar global média pode aumentar no século XXI, mas principalmente de como se modificará o padrão climático das diversas variáveis como chuva, umidade, ventos, radiação solar e terrestre, evaporação em diversas regiões da terra.

Uma outra categoria de modelo são os modelos regionais. Esses modelos têm o papel de fornecer um “zoom” sobre uma região específica do modelo global. Os modelos regionais, por operar em uma área menor, utilizam grades de tamanhos menores (cerca de dezenas de quilômetros) que as dos modelos globais (centenas de quilômetros), representando um custo computacional menor do que aumentar a resolução do modelo global. Essa é conhecida como técnica de redução de escala dinâmica, ou regionalização (“dynamical downscaling”). A menor grade do modelo regional permite detalhar melhor a topografia, capturando melhor os va-

les e os picos das montanhas, a linha costeira, a cobertura vegetal ou uso da terra etc. A menor grade do modelo regional permite capturar melhor gradientes horizontais intensos e, portanto, capturar melhor os eventos extremos. Esse detalhamento tornam os resultados do modelo regionais mais adequados para estudo de impacto a nível local das mudanças climáticas globais

Evolução da modelagem climática no Brasil

No Brasil, a modelagem numérica de clima teve início com as atividades operacionais do CPTEC/INPE, em 1995. Inicialmente, os modelos eram utilizados apenas para a realização de previsões numéricas de tempo (dias) e de clima sazonal (estações do ano) (Cavalcanti et al., 2002; Marengo et al., 2003, 2012). Porém, com o advento tecnológico e potentes supercomputadores, foi possível realizar projeções climáticas para a América do Sul. As primeiras projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul foram realizadas a partir de modelos climáticos regionais (Ambrizzi et al., 2007; Marengo; Ambrizzi, 2006; Marengo et al., 2009). Esses primeiros estudos foram baseados nos resultados dos modelos regionais RegCM3 (Giorgi; Mearns, 1999; PAL et al., 2007), HadRMP3 (Jones et al., 2004) e Eta-CCS para o período de 2070-2100, com uma alta resolução horizontal (50 km) e forçados pelo modelo global atmosférico HadAM3P, do Met Office Hadley Centre (UKMO) do Reino Unido, a partir dos cenários de emissões de GEE (A2 e B2).

Nas últimas décadas, tanto os MCGs quanto os modelos climáticos regionais (MCRs) têm tido grandes avanços na representação dos componentes do sistema climático, principalmente devido à melhor representação dos processos físicos e fenômenos a eles associados e as suas interações (Marengo et al., 2012). Os MCGs são executados usando resolução horizontal da ordem de uma a duas centenas de quilômetros. A melhoria na resolução e nas parametrizações físicas dos modelos tem permitido uma representação mais detalhada das características da paisagem, como cordilheiras, lagos, tipos de vegetação e características do solo, levando a uma melhor caracterização do ciclo hidrológico e dos eventos extremos associados, bem como a uma representação mais realista do clima regional/local em comparação aos modelos com resoluções mais baixas (100 km – 200 km) (Ambrizzi et al., 2019; Chou et al., 2014; Flato et al., 2013; Naumann et al., 2018).

Para obter maior detalhamento das previsões de tempo e clima sazonal, considerando a heterogeneidade da cobertura vegetal, a presença de cadeia topográficas complexas na América do Sul, foi instalado o modelo regional Eta (Mesinger et al. 1988) proveniente da versão operacional do NCEP (Black, 1994). O modelo entrou em operação no CPTEC/INPE em 1996 (Chou, 1996) gerando previsões inicialmente na resolução de 40 km e horizonte de 60 horas. Hoje este modelo, com modificações nos processos dinâmicos e físicos (Mesinger et al. 2012), produz previsões de tempo para até 11 dias, na resolução de 8 km sobre toda América do Sul, e até 3 dias na resolução de 1 km cobrindo região entre Rio de Janeiro e São Paulo. Outros dois modelos regionais entraram em operação no CPTEC/INPE, o modelo BRAMS e o WRF, o primeiro com foco na previsão da qualidade do ar, e o segundo por ser usado em várias instituições e universidades visto que possui uma interface amigável para uso. Outros centros também adquiriam modelos regionais como o MBAR e o COSMO no INMET e o COSMO na Marinha. Entretanto, modelo global operacional somente foi executado no INPE.

A extensão do prazo da previsão do modelo regional Eta para meses a frente teve início com os trabalhos de Chou et al., 2000 e Chou et al, 2002. A versão climática sazonal do Modelo Eta tornou-se operacional em 2001 (Chou et al. 2002), na resolução de 40 km, horizonte de 4 meses a frente, utilizando as previsões do MCGA CPTEC/INPE para alimentar o modelo regional nas bordas laterais. Pilotto et al. (2012), mostrou que o uso de CGCM do CPTEC/INPE como condições de contorno proporcionariam melhores previsões do que o uso de MCGA do CPTEC/INPE.

Porém, com a demanda governamental em dispor de projeções de mais alta resolução espacial para América do Sul, as primeiras projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul foram realizadas a partir de modelos climáticos regionais (Ambrizzi et al., 2007; Marengo; Ambrizzi, 2006; Marengo et al., 2009). Esses primeiros estudos foram baseados nos resultados dos modelos regionais RegCM3 (Giorgi; Mearns, 1999; PAL et al., 2007), HadRMP3 (JONES et al., 2004) e Eta-CCS para o período de 2070-2100, na resolução horizontal de 50 km e forçados pelo modelo global atmosférico HadAM3P, do Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido. Estes modelos regionais geraram projeções de mudanças climáticas a partir dos cenários de emissões de Gas Efeito Estufa (GEE), A2 e B2, utilizados pelo CMIP3 e apoiaram o AR4 do IPCC.

Modelagem para projeções de clima futuro

Na temática das mudanças climáticas na política internacional, está em debate desde meados da década de 1990 a discussão sobre o estabelecimento de metas para limitar o aquecimento global em um limiar de temperatura predefinido em relação aos níveis pré-industriais (WBGU, 1995). Em 2015, o Acordo de Paris resultou num acordo formalização de uma série de acordos, como o de limitar a um máximo de 1.5 °C e assim fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças tais como inundações caso as mudanças de temperatura sejam maiores a 2°C, quando comparado ao aquecimento global de 1,5°C.

A exemplo dos referidos estudos, no Brasil as projeções climáticas produzidas pelo modelo regional Eta-Cptec (Chou et al., 2014a; Chou et al., 2014b), alinhado aos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (CMIP5), foram adequadas aos GWLs 1,5°C, 2°C e 4°C a fim de subsidiar os estudos de medidas de vulnerabilidade climática e adaptação relacionados às seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental do País no âmbito da Quarta Comunicação Nacional do Brasil (4CN) à UNFCCC (Brasil 2020).

Para estudos das mudanças climáticas, em maioria, os modelos globais iniciam a execução no período pré-industrial, cerca de 1850, e terminam a execução no final do século XXI, 2099. Para cobrir este horizonte longo, é necessário o uso de supercomputadores e utilizar caixas de grades em torno de poucas centenas de quilômetros. Diferente do horizontal climático sazonal, para estudos de mudanças climáticas, o modelo climático é executado para os horizontes de décadas e séculos a frente, seguindo os cenários de mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa, e simulando as mudanças das anomalias de temperatura da superfície do mar. Portanto, modelos para estudos de mudanças climáticas possuem complexidade adicional, são necessários refinar processos físicos como aqueles de um modelo de gelo marinho, um modelo de crescimento e morte de florestas, modelos de ciclos de carbono, nitrogênio e enxofre pelo menos etc. Os processos físicos como formação de nuvens e chuva, transferência radiativa, interações oceano-atmosfera, turbulência atmosférica etc. são processos comuns em modelos para previsão de tempo ou para simular mudanças climáticas.

O esforço da modelagem das mudanças climáticas devido às mudanças nas concentrações dos GEE iniciou no Brasil com os cenários de

emissão da família do SRES: A2, A1, A1B, B2 que foram utilizados produzidos pelo CMIP3 e utilizados no AR4. Isso foi parte do projeto PRIOBIO do GEF/MMA que gerou os primeiros cenários de mudanças climáticas do Brasil em 2007. Foi utilizado as saídas do modelo HadAM3 organizados no projeto CREAS (Marengo et al 2009). Os cenários do SRES, se baseiam em estórias construídas na linha do tempo, em que há diferentes desenvolvimentos socioeconômicos, em mundos mais globalizados ou regionalizados. O A2 é o cenário mais pessimista em termos de emissão, tratado como “business-as-usual” (BAU). Em seguida, foram construídos os cenários RCP (Representative Concentration Pathways) e utilizados pelos modelos do CMIP5 que geraram resultados para o AR5. Os cenários RCP é inverso, são fornecidos níveis de forçante radiativo no final do século, isto é, são fornecidos níveis de mudança no balanço radiativo devido à inserção de mais GEE na atmosfera. Modelos do tipo socioeconômicos (Integrated Assessment Model) constroem a trajetória do aumento dos gases de forma a atingir um nível de emissão dos GEE que corresponda a forçante radiativa prescrita para o final do século 21. As forçantes radiativas adotadas foram: 2.6, 4.5, 6.0, e 8.5 Wm⁻², que geraram cenários denominados RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 (Nakicenovic et al., 2000).

Os cenários utilizados pelos modelos do CMIP6 combinaram o conceito das forçantes radiativas com a construção da narrativa de mundos em que a mitigação é mais, ou menos, desafiadora, e de mundos em que a adaptação é mais, ou menos, desafiadora. São 5 cenários denominados SSP (Shared Socio-economic Pathways) (O’Neil et al., 2014). Destes cenários, o SSP1 é o cenário em que o mundo cresce com igualdade e com foco na sustentabilidade e utiliza como forçantes radiativas e 1.9 e 2.6Wm⁻². O SSP2 é o cenário moderado para os desafios de adaptação e de mitigação e vem acompanhado da forçante 4.5 Wm⁻². O SSP3 representa um mundo fragmentado com rivalidades regionais. O SSP4 representa mundo ainda com mais desigualdes. O SSP5 é o cenário do mundo do combustível fóssil e de crescimento econômico a todo custo e, portanto, de forçante radiativa 8.5Wm⁻². Esses cenários se denominam, portanto, SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-6.0, SSP4-7.0 e SSP5-8.5 (O’Neil et al., 2014).

As mudanças climáticas configuram um fenômeno global de origem predominantemente antrópica, cujos efeitos já são observados em diferentes sistemas físicos e socioeconômicos. A compreensão dessa dinâmica tem sido consolidada por meio dos Relatórios de Avaliação do

Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima do IPCC, que sintetizam o estado da arte da ciência climática e orientam a formulação de políticas públicas em escala global, regional e nacional. A seguir abordaremos os avanços científicos dos seus relatórios de avaliação com ênfase nos resultados relevantes para o Brasil.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do (IPCC 2013) representou uma consolidação da evidência observacional do aquecimento global, afirmando com confiança extremamente alta que “o aquecimento do sistema climático é inequívoco” e atribuindo com alta confiança mais da metade do aumento da temperatura global média à influência humana, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa (GHGs). O AR5 também avançou na quantificação do forçamento radiativo dos diferentes agentes climáticos, com especial atenção ao CO₂, CH₄ e aos aerossóis.

Com relação à projeção climática, o AR5 utilizou os Cenários Representativos de Concentração (RCPs), que indicavam aumentos médios de temperatura de até 4,8 °C até 2100 no pior cenário (RCP8.5). Os modelos climáticos globais (GCMs) do CMIP5, ainda que robustos para escalas continentais, apresentavam limitações para capturar características regionais, especialmente em regiões tropicais como a América do Sul.

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) ampliou e refinou significativamente essa base. No volume do Grupo de Trabalho I (WGI-IPCC 2021) a estimativa do aumento da temperatura global desde o período pré-industrial foi atualizada para 1,2 °C, e a atribuição do aquecimento às atividades humanas passou a ser considerada como inequívoca. Um grau de certeza ainda maior do que no AR5. O AR6 incorporou os novos Cenários de Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que oferecem uma estrutura integrada entre evolução socioeconômica, emissões e políticas climáticas.

A utilização do conjunto de modelos CMIP6, com melhor representação de processos atmosféricos, oceânicos e terrestres, permitiu avanços na regionalização das projeções e no entendimento de eventos extremos. Além disso, o AR6 introduziu uma abordagem mais sofisticada de avaliação, com três linhas complementares de evidência: simulações de modelos, dados observacionais e compreensão física dos processos.

Um dos avanços mais relevantes do AR6 foi a consolidação de diagnósticos regionais mais detalhados, sistematizados no Atlas Interativo (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) e nos capítulos regionais. Para o Brasil, o relatório apontou com alta confiança o aumento da frequência e intensi-

dade de extremos de temperatura, a tendência de redução de precipitação no Nordeste e centro-sul do Brasil e o aumento do risco de seca agrícola e ecológica, particularmente na transição entre a Amazônia e o Cerrado.

Impactos da mudança climática no Brasil

O Brasil tem demonstrado que é especialmente vulnerável às mudanças climáticas por suas características físicas (extensa área tropical, alta variabilidade climática natural), ecológicas (grande biodiversidade e biomas como a Amazônia, o Cerrado e o Semiárido) e sociais (grandes desigualdades regionais e populacionais). Com base nos cenários SSPs do AR6, estima-se que, até 2100 (Figura 7):

- A temperatura média anual pode aumentar entre 2,5 e 4,5 °C na maior parte do território nacional sob o cenário SSP5-8.5.
- Áreas como o Semiárido nordestino e o sul da Amazônia podem sofrer secas prolongadas e severas, com impactos na produção agrícola, recursos hídricos e saúde pública.
- Eventos extremos compostos, como ondas de calor simultâneas à seca, tendem a se intensificar, exigindo estratégias integradas de adaptação.
- Além disso, observações recentes apontam para o enfraquecimento do regime de monções na América do Sul, atrasos no início da estação chuvosa no Cerrado e intensificação de extremos secos na bacia do rio Paraná.

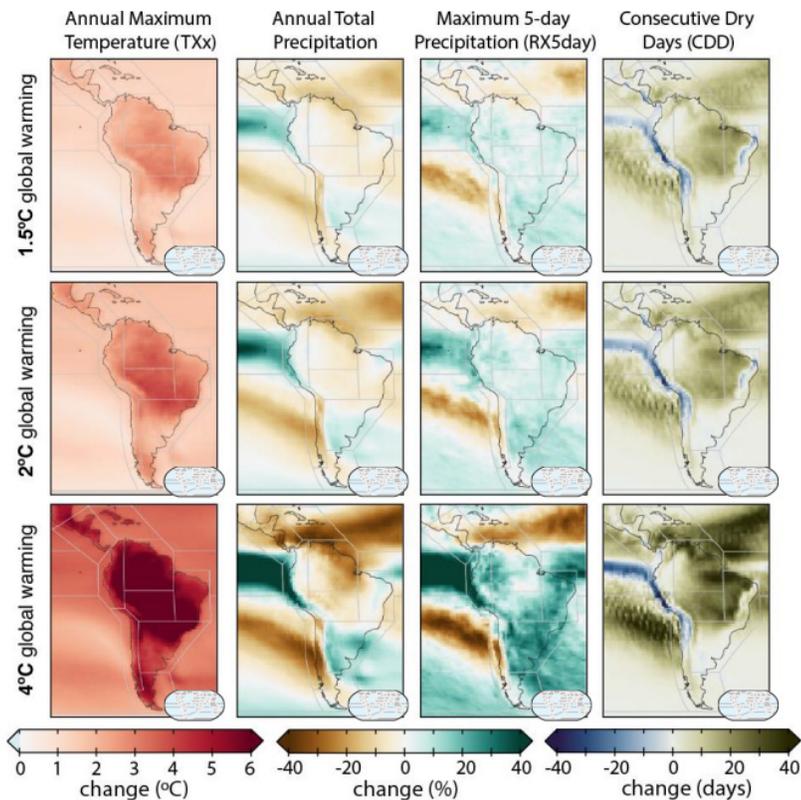


Figura 7: Mudanças projetadas na temperatura máxima anual (TXx), precipitação total anual, precipitação máxima em 5 dias (RX5day) e número anual de dias secos consecutivos (CDD) sob aquecimentos globais de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C (nas linhas), em relação ao período de 1850–1900. Os resultados são baseados em simulações do conjunto multi-modelo CMIP6 (32 modelos climáticos globais), utilizando o cenário SSP5-8.5 para calcular os níveis de aquecimento. Fonte: Atlas Interativo do IPCC. Disponível em <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DERIVADAS DE MODELOS REGIONAIS PARA O BRASIL

Os impactos das mudanças climáticas sobre os diversos setores socioeconômicos são geralmente de escala local que geralmente requer informações climáticas mais detalhadas. A redução de escala ('downscaling' ou regionalização) das projeções dos modelos globais para escala local, isto é, passar das grades dos modelos globais de cerca de 100 a

200km para o tamanho de 20km, 5km ou 1km é realizada a partir de um modelo dinâmico regional, ou a partir de modelos estatísticos ou modelos de aprendizado de máquinas. A combinação de *downscaling* dinâmico adicionado a correção de viés, podem gerar os melhores resultados (Tavares et al., 2022).

As projeções de mudanças climáticas a partir do modelo regional Eta foram geradas nas resoluções de 20 km, utilizando as saídas dos modelos globais BESM, CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 (Chou et al. 2014b) e nas resoluções de 5km, utilizando as saídas dos modelos HadGEM2-ES (Lyra et al. 2017) e BESM (Sondermann et al., 2023), para o Sudeste e 5km Eta-HadGEM2-ES para o Sul do Brasil (Ferreira et al., 2023; Tavares e Chou, 2022). Para considerar a incerteza das emissões dos gases de efeito estufa, dois níveis de concentração foram utilizados em Chou et al. (2014b): RCP4.5 emissões moderada, e RCP8.5, emissão intensa. Dessa forma, conjunto resulta por 8 possibilidades de projeções futuras do clima.

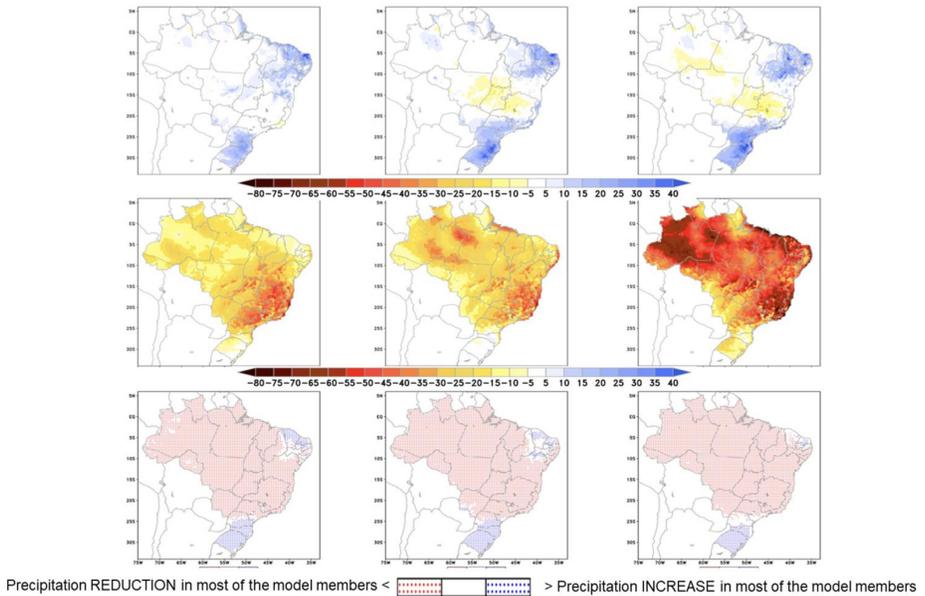


Figura 8: Projeções de mudanças de precipitação em 3 períodos futuros: 2011-2040 (esquerda), 2041-2070 (centro), e 2071-2100 (direita). Limites superior (1a fileira) e inferior (2a fileira) das mudanças. Sinal da mudança da maioria dos membros. Entre os 8 membros, o sinal da maioria é indicado, sendo vermelho indicando redução, azul, a maioria dos membros indica aumento.

A Figura 8 mostra as projeções das mudanças de precipitação para os 3 períodos climáticos futuros, gerado a partir de 8 membros das projeções (4 modelos globais e 2 cenários de emissão). A amplitude das mudanças resultantes a partir do 8 projeções climáticas, ou 8 membros, é indicada pelos limites superiores e inferiores das mudanças. Essa amplitude reflete em parte a incerteza das projeções. No Nordeste, por exemplo, as projeções indicam desde redução das chuvas até aumento das chuvas nos 3 períodos futuros, sendo que o sinal predominante é de aumento das chuvas, principalmente na parte norte do Nordeste brasileiro. Na parte central do país, as projeções indicam desde forte redução das chuvas, até pequena redução ou pequeno aumento das chuvas, sendo que o sinal predominante é de redução das chuvas em grande parte do Norte, Centro-Oeste e Sudeste do país. Por outro lado, no Sul, as projeções indicam desde pouca redução das chuvas até forte aumento das chuvas, sendo que o sinal predominante é de aumento das chuvas.

Uma outra forma de apresentar as projeções de mudanças climáticas é baseado nos limites de aquecimento adotados pelo Acordo de Paris. Tavares et al. (2023) mostraram que com 1.5°C de aquecimento médio global, o padrão de mudanças na precipitação no país é de redução das chuvas desde o Sudeste até o Norte, e aumento de chuvas na parte norte do Nordeste e forte aumento das chuvas no Sul.

Em relação aos extremos climáticos no país, as projeções em alta resolução indicam aumento das chuvas intensas no Sul (Chou et al. 2014b; Reboita et al. 2022), por outro lado aumento do período de estiagem na Amazonia (Brito et al. 2023; Reboita et al. 2022) e Nordeste (Chou et al. 2014b).

O uso de resoluções ainda mais altas, cerca de 4 a 5 km, permite capturar fenômenos com dependência da fisiografia local como montanhas, usos e/ou mudanças no uso da terra. As projeções para as regiões metropolitanas no Sudeste na resolução de 5km, mostram mudanças ainda mais intensas de redução da chuva anual e intensificação dos extremos (Lyra et al. 2018). A resolução espacial geralmente empregada pelos modelos globais não permite distinguir as manchas urbanas, áreas de cultivo, regiões serranas ou pequenas bacias hidrográficas. Além da fisiografia, o maior detalhamento permite que as equações dos modelos climáticos reproduzam eventos mais extremos. No trabalho de Tavares e Chou (2022), mostrou-se que as intensas chuvas combinadas aos ventos intensos provenientes de frentes frias que atingem o Vale do Itajaí podem

ter a frequência aumentada nos meses de inverno no futuro. No trabalho de Ferreira et al. (2023), mostrou-se a tendência do aumento das condições atmosféricas favoráveis a formação de tornado em especial sobre

Na construção das projeções de mudanças climáticas, os cenários em geral supõem o aumento global dos gases de efeito estufa. Por outro lado, além deste efeito global, ocorrem mudanças locais de uso da terra, que combinados aos efeitos globais podem resultar em impactos distintos. Esses cenários de mudanças no uso da terra são de caractere local e requerem uso de modelos de resoluções espaciais mais altas do que aquelas providas pelos modelos globais.

Brito et al. (2022) mostraram que as projeções de mudanças climáticas globais e em adição à substituição da floresta Amazônica por pastagem resultam em impactos ainda mais intensos quando comparados aos impactos das projeções sem a inclusão do desmatamento. Com os efeitos locais, os períodos de estiagem se prologam ainda mais e o total anual da chuva se reduz ainda mais. Impactos do crescimento do padrão de desmatamento na Amazônia no período de 1983 a 1988 foram capturados na resolução de 1 km por Pilotto et al (2023). O crescimento do desmatamento foi incluído ano a ano e a partir da inclusão de roteamento de rios, foram comparados os efeitos do El Nino e La Nina e do desmatamento sobre a vazão do rio Ji-Paraná. Percebeu-se que o desmatamento causou redução adicional na vazão do rio no período de estiagem.

Por outro lado, considerando ações positivas, Lopes (2023) incluiu áreas de reflorestamento da Mata Atlântica supondo mudanças no uso da terra, em seguida simulou o clima futuro no Sudeste em cenários RCP8.5 e avaliou os efeitos de longo prazo no planejamento dos recursos hídricos nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Doce. A inclusão das manchas de reflorestamento causou a redução das temperaturas em até 2°C. O aumento da área de Mata Atlântica também diminuiu a amplitude dos extremos de vazão, proporcionando melhores índices de sustentabilidade.

Estudos para abordar problemas locais apresentam demandam computacional maior, mas são mais adequados para questões específicas locais que se deseja responder.

CONCLUSÕES

O Brasil tem regiões mais suscetíveis a catástrofes climáticas relacionadas a chuvas do que outras. As principais são a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e a Serra Geral, na extensão que compreende o Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. É uma área cujo terreno é bem conhecido, em que temos uma concentração de escorregamentos e fluxos de detritos e inundações. Com a crise climática e aumento dos índices pluviométricos, a tendência é que áreas suscetíveis a deslizamentos e inundações tenham eventos de magnitudes ainda maiores. Qualquer município dentro dessas serras vai continuar tendo movimentos como deslizamentos. Isso faz parte da natureza daquele compartimento geológico. Cenários futuros de extremos de chuva podem agravar ainda mais a ameaça e aumentar o risco de desastres em áreas vulneráveis e expostas.

A ciência do clima no Brasil tem evoluído significativamente, com o fortalecimento da capacidade institucional de modelagem, observação e análise de impactos. Iniciativas como o Portal de Projeções Climáticas (<http://pclima.inpe.br/>), a Plataforma AdaptaBrasil MCTI (<https://adapta-brasil.mcti.gov.br/>), o projeto CORDEX-CORE, a Rede Clima e o uso de modelos regionais de alta resolução têm contribuído para um diagnóstico mais refinado dos riscos climáticos. No entanto, persistem desafios científicos e técnicos, tais como:

- Redução de incertezas regionais: A variabilidade climática interanual e decadal no Atlântico Tropical e Pacífico influencia fortemente o regime de chuvas no Brasil, mas sua interação com o aquecimento global ainda não é plenamente compreendida.
- Integração de múltiplas fontes de dados: A combinação de modelos climáticos, reanálises, séries observadas e inteligência artificial é essencial para melhorar a previsibilidade e a regionalização.
- Análise de eventos compostos: A identificação e previsão de eventos simultâneos (como calor + seca) requerem abordagens estatísticas e físicas que estão em desenvolvimento.

Além disso, as capacidades de atribuição de eventos extremos ao aquecimento global antropico, metodologia científica que avalia em que medida um evento se tornou mais provável ou intenso devido à mudança

climática, têm ganhado espaço no Brasil, mas carecem de investimento contínuo em pesquisas relevantes.

As implicações científicas dos relatórios do IPCC e os trabalhos da Rede Clima, CEMADEN e INPE do MCTI e universidades estaduais e federais, têm motivado avanços institucionais no Brasil, incluindo a atualização da NDC (Contribuição Nacionalmente Determinada), a formulação de estratégias nacionais de adaptação e o compromisso com o federalismo climático e avaliação do risco de desastres no presente e futuro. No entanto, a aplicação da ciência climática na formulação de políticas públicas ainda encontra barreiras: Dificuldade na tradução de cenários climáticos para impactos setoriais; falta de integração entre escalas de decisão (federal, estadual, municipal); baixa capacidade técnica local para interpretar e usar a informação climática e de risco de desastres.

Importante destacar que a ciência apresentada deve ser considerada não apenas como alerta, mas como ferramenta estratégica de planejamento. A incorporação dos cenários climáticos nas políticas de ordenamento territorial, segurança hídrica, em frentamento a desastres e transição energética pode reduzir significativamente os riscos sociais e econômicos nas diversas regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS

Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (2025) 2024: O Ano Mais Quente da História, Brasil em Transformação: O IMPACTO DA CRISE CLIMÁTICA, Caderno Técnico 1, São Paulo, 21 pp.

Alcântara E., Marengo, J. Mantovani, J., Londe, L.R., San, L. Y., Park, E., Lin, Y. N. Wang, J., Mendes, T., Cunha, A. P., Pampuch, L., Seluchi, M. E., Simões, S., Cuartas, L. A., Gonçaves, D., Massi, K., Alvalá, R. C. S., Moraes, O. L., Souza Filho, C., Mendes, R., and Nobre, C.A. (2023) Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1–19, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1-2023>.

Alvalá RCS, Ribeiro DF, Marengo JÁ, Seluchi ME, Gonçalves DM, da Silva LA, Cuartas Pineda LA, Saito S, (2024) Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 110 (2024) 104645, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104645>

Alvalá RC *et al* (2017) Drought monitoring in the Brazilian semiarid region, in press, *Anais da Academia Brasileira de Ciências do Brasil*. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>

Bazzanella, A.C., Dereczynski, C., Luiz-Silva, W. *et al*. Performance of CMIP6 models over South America. *Clim Dyn* 62, 1501–1516 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06979-1>

Brasil 2016. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Sumário Executivo, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2016, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, 16 pp.

Brasil 2020. Quarta Comunicação Nacional do Brasil a UNFCCC, Sumário Executivo, Brasil 20-20, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, 33 p.

Brêda, J.P.L. Filho; De Paiva, R.C.D.; Chou, S.C.; Collischonn, W. Assessing extreme precipitation from a regional climate model in different spatial-temporal scales: A hydrological perspective in South America. *International Journal of Climatology*, 42, 1 - 15, 2022.

Brito, A. L., Veiga, J. A. P., Correia, F. S., Michiles, A. A., Capistrano, V. B., Chou, S. C., Lyra, A., & Medeiros, G. (2023). Impacts of increasing greenhouse gas concentrations and deforestation on extreme rainfall events in the Amazon basin: A multi-model ensemble-based study. *International Journal of Climatology*, 1–24. <https://doi.org/10.1002/joc.8158>

Cavalcanti, I. F. A. ; Marengo, J. ; Satyamurty, P. ; Nobre, C. N. ; Trosnikov, I. ; Bonatti, J. P. ; Manzi, A. O. ; Tarasova, T. ; Pezzi, L. P. ; Dalmeida, C. . Global Climatological features in a Simulation Using the CPTEC/COLA AGCM. *Journal of Climate*, v. 15, n.21, p. 2965-2988, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2965:GCFIAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2965:GCFIAS>2.0.CO;2)

CEMADEN (2025) Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2024, CEMADEN, São Jose dos Campos, SP, 2025, 37 pp, disponível em <https://inctmc2.cemaden.gov.br/>

Chou, Sin Chan, Justi da Silva, M. G. A. Objective evaluation of Eta Model precipitation forecasts over South America. *Climanálise (São José dos Campos)*, v.14, 1999 ISSN 0103-0019

Chou, Sin Chan. Modelo Regional Eta. *Climanálise (São José dos Campos)*, Cachoeira Paulista, SP, v. 1, p. 27- 29,, 1996, <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>

Chou, S. C.; Nunes, A. M. B.; Cavalcanti, I. F. A., 2000. Extended range forecasts over South America using the regional Eta model. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. D8, p. 10147-10160

Chou, S. C.; Tanajura, C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A., 2002. Validation of the Coupled Eta/SSiB Model over South America. *Journal of Geophysical Research*, Estados Unidos, v. 107, n. D20, pp. LBA 56-1, doi: 10.1029/2000JD000270

Chou SC, Marengo JA, Lyra A, Sueiro G, Pesquero J, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas D, Gomes JL, Bustamante J, Tavares P (2012) Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. Vol. 38 n. 3-4, 635-653. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8

Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P. and Marengo, J. (2014a) Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438-454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039.

Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G. and Marengo, J. (2014b) Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043

Chou, S.C., de Arruda Lyra, A., Gomes, J.L., Rodriguez, D.A, Martins, M., Resende, N., Tavares, P., Dereczynski, C.P., Pilotto, I., Martins, A.M., Carvalho, L.F.A., Onofre, J.L.L., Major, I., Penhor, M., Santana, A.. 2020b. Downscaling projections of climate change in Sao Tome and Principe Islands, Africa. *Clim Dyn* (2020). 54:4021–4042 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05212-7>

Dereczynski, C., Chou, S.C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., Chagas, D., Gomes, J.L., Rodrigues, D.C., Skansi, M.M.. Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*. p. 100273, 2020. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100273

Debone, D.; Tavella, R. A.; Colombo, A. L.; Gales, A. C.; da Silva Júnior, F. M. R.; Miraglia, S. G. E. K. Is It Time to Build an Ark? The Reality of Climate Change in One of the Worst Climate Tragedies in Brazil. *Preprints 2024*, 2024061702. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1702.v1>

Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., et al. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>

Dunn, R. J. H., Herold, N., Alexander, L. V., Donat, M. G., Allan, R., Bador, M., et al. (2024). Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices—An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003279. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>

Espinoza, J., Marengo, J. A., Schongart, J., & Jimenez, J. C. (2022). The New Historical Flood of 2021 in the Amazon River Compared to Major Floods of the 21st Century: Atmospheric Features in the Context of the Intensification of Floods. *Weather and Climate Extremes*, 35, Article ID: 100406. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>

Espinoza, J., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., et al. (2024). The New Record of Drought and Warmth in the Amazon in 2023 Related to Regional and Global Climatic Features. *Scientific Reports*, 14, Article No. 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>

Ferreira, N. C. R., Tavares, P. S., Medeiros, G. S., Ferreira, L. N., Borges, P., Chou, S. C., & Rodrigues, M. L. (2023). Projeções de tempo severo e impactos em torres de linhas de transmissão em Santa Catarina, Brasil, sob cenários futuros de mudanças climáticas globais. *Derbyana*, 44. <https://doi.org/10.14295/derb.v44.808>

Floodlist (2023) <https://floodlist.com/america/floods-tarija-bolivia-february-2022>

Floodlist (2024b) <https://floodlist.com/america/argentina-flood-buenos-aires-march-2024>

Floodlist (2024c) <https://floodlist.com/america/brazil-floods-rio-de-janeiro-february-2024>

Gorenstein, I.; Prado, L.F.; Bianchini, P.R.; Wainer, I.; Griffiths, M.L.; Pausata, F.S.R.; Yokoyama, E. 2022. A fully calibrated and updated mid-Holocene climate reconstruction for Eastern South America. *Quaternary Science Reviews*, 292: 107646. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107646>

Grimm A, Tedeschi R, (2009) ENSO and Extreme Rainfall Events in South America, *J of Climate*, 22, 1589–1609, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Reitzel, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergo-*

vernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3056. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>, 2022

IPCC 2012: Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 3-21.

Lopes, L.G. Sustentabilidade hídrica sob cenários de mudanças climáticas, restauração florestal e de demanda de água em sistemas hídricos no Sudeste brasileiro. Tese de Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C.P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., Giarolla, A. 2018. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol* 132, 663–682 (2018). <https://doi.org/10.1007/S00704-017-2110-0>

Marchi, A. C. de, Melo, M. L. D. de, Lyra, A. de A., Kubota, P. Y. , Chou, S. C., & Rosas, P. (2022). Simulações climáticas do Holoceno Médio para o Brasil utilizando o modelo regional paleoclimático Eta. *Derbyana*, 43, e775. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.775>

Marengo, J. A.; Alves, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. *Geosp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 19, n. 3, p. 485-494, mês. 2016. ISSN 2179-0892.

Marengo JA, Torres RR, Alves LM (2017) Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theor Appl Climatol* 20:1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Marengo JA, Alves LM, Alvalá RCS *et al* (2018) Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *An Acad Bras Cienc*. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

Marengo JA, Cunha AP, Nobre CA, Ribeiro Neto G, Magalhaes AR, Torres RR, Sampaio G, Alexandre F., Alves LM, Cuartas LA, Leal K, Alvalá RCS, (2020) Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C, *Natural Hazards* (2020) 103:2589–2611, <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>

Marengo JA, Cunha AP, Cuartas LA, Deusdará Leal KR, Broedel E, Seluchi ME, Michelin CM, De Praga, Baião CF, Chuchón Ângulo E, Almeida EK, Kazmierczak ML, Mateus NPA, Silva RC and Bender F (2021) Extreme Drought in the Brazilian

Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Front. Water* 3:639204. doi: 10.3389/frwa.2021.639204

Marengo, J. A., Alcantara, E., Cunha, A. P., Seluchi, M. E., Nobre, C.A., Dolif, G., Goncalves, D., Assis Dias, M., Cuartas, L. A., Bender, F., Ramos, A. M., Mantovani, J. R., Alvalá, R.C.S., and Moraes, O.L. (2023) Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness, *Weather and Climate Extremes*, 39, 100545, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>

Marengo, J., Dolif, G., Cuartas, A., Camarinha, P., Gonçalves, D., Luiz, R., Silva, L., Alvala, R., Seluchi, M., Moraes, O., Soares, W., Nobre, C. (2024 a) O Maior Desastre Climático do Brasil: Chuvas e Inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados* (online). v.38, p.203 - 228, 2024.

Marengo, J., Cunha, A., P., Espinoza, J. C., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J.C., Costa, M. C., Ribeiro, J. M., Wongchuig, S., Zhao, S., (2024b) The Drought of Amazonia in 2023-2024. *American Journal of Climate Change*. v.13, p.567 - 597, 2024.

Marengo, J.A., Alcantara, E., Moraes, O. L., Martinez, R., Seluchi, M., Alvala, R., Dolif, G., Goncalves D (2025 a) Early warning services for disaster risk reduction in Brazil: The experience of CEMADEN during the floods of Rio Grande do Sul of May 2024, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 126, August 2025, 105645, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105645>

Marengo JA, Costa MC, Cunha AP, Espinoza J-C, Jimenez JC, Libonati R, Miranda V, Trigo IF, Sierra JP, Geirinhas JL, Ramos AM, Skansi M, Molina-Carpio J and Salinas R (2025b) Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Front. Clim.* 7:1529082. doi: 10.3389/fclim.2025.1529082

Marques, V.S.; Dereczynski, C.P. Weather Forecasting in Brazil: A Concise Historical Review. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 44, p. 1-14, 2021. doi:10.11137/1982-3908_2021_44_45358

Melo, M.L.D.; Marengo, J.A. 2007. The influence of changes in orbital parameters over South American climate using the CPTEC AGCM: simulation of climate during the mid-Holocene. *The Holocene*, 18(4): 501-516. <https://doi.org/10.1177/0959683608089205>

Mesinger F, Chou SC, Gomes JL, Jovic D, Bastos P, Bustamante JF, Lazic L, Lyra AA, Morelli S, Ristic I, Veljovic K. (2012) An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Vol 116 (3), 63-79. DOI: 10.1007/s00703-012-0182-z

Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenham J, Gaffin S, Gregory K, Gruebler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M,

Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z (2000) Special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, New York.

Nobre, P., and Coauthors, 2013: Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *J. Climate*, 26, 6716–6732, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>.

O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, *et al.* A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim. Change* (2014) 122(3):387–400. doi: 10.1007/s10584-013-0905-2

Pesquero, J.F., Chou, S.C., Nobre, C.A., Marengo, J.A., 2010: Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol 99, 1-2, p.75-93. DOI: 10.1007/s00704-009-0123-z

Pilotto ID, Chou SC, Nobre P. Seasonal climate hindcasts with Eta model nested in CPTEC coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol.110, no. 3, pp. 437-456. 2012. DOI:10.1007/s00704-012-0633-y.

Pilotto, I.L., Rodriguez, D.A., Chou, S.C., Garofolo, L., Gomes, J.L. Impacts of the land use and land-cover changes on local hydroclimate in southwestern Amazon. *Clim Dyn* 61, 5597–5612 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06872-x>

Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H. *et al.* South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58, 459–485 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>

Reboita, M.S.; Mattos, E.V.; Capucin, B.C.; Souza, D.O.d.; Ferreira, G.W.d.S. A Multi-Scale Analysis of the Extreme Precipitation in Southern Brazil in April/May 2024. *Atmosphere* 2024, 15, 1123. <https://doi.org/10.3390/atmos15091123>

Seluchi, M. E., Chou, S. C. Evaluation of two eta Model versions for weather forecast over South America. *Geofísica Internacional*. Mexico, v.40, p.219 - 237, 2001

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate (Chapter 11)*. In: IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., *et al.*, pp. 1513-1766 Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 10.1017/9781009157896.013.

Sondermann, M.; Chou, S.C.; Tavares, P.; Lyra, A.; Marengo, J.A.; Souza, C.R. d.G. Projections of Changes in Atmospheric Conditions Leading to Storm

Surges along the Coast of Santos, Brazil. *Climate* 2023, 11, 176. <https://doi.org/10.3390/cli11090176>

Tavares, P.S., Chou, S.C. Passagens de frentes frias extremas no Vale do Itajaí no clima futuro. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. 2022. Rio de Janeiro, RJ.

Tavares, P.S., Acosta, R., Nobre, P., Resende, N.C., Chou, S.C., Lyra, A.A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. *Reg Environ Change* 23(1), 40 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02042-1>

Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Acquafresca, L., Barbosa, P., de Jager, A., Ficchi, A., Fioravanti, G., Grimaldi, S., Hraast Essenfelder, A., Magni, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Salamon, P., Santos Nunes, S., Volpi, D. (2024) Drought in the Amazon and the La Plata basins - December 2024, *GDO Analytical Report*, JRC140741, doi:10.2760/9524487, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024 European Union, 2024,. 30 pp.

Veiga SF, Nobre P, Giarolla E, Capistrano V, Baptista J et al (2019) The Brazilian Earth System Model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation. *Geosci Model Dev* 12:1613–1642. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1613-2019>

World Meteorological Organization (WMO) (2020) State of Climate for Latin America and Caribbean 2019. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2021) State of Climate for Latin America and Caribbean 2020. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2022) State of Climate for Latin America and Caribbean 2021. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2023) State of Climate for Latin America and Caribbean 2022. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2024) State of Climate for Latin America and Caribbean 2023. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2025) State of Climate for Latin America and Caribbean 2024. WMO, Geneva, Switzerland.

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

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

INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

Autora correspondente: luciana.gatti@inpe.br

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

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

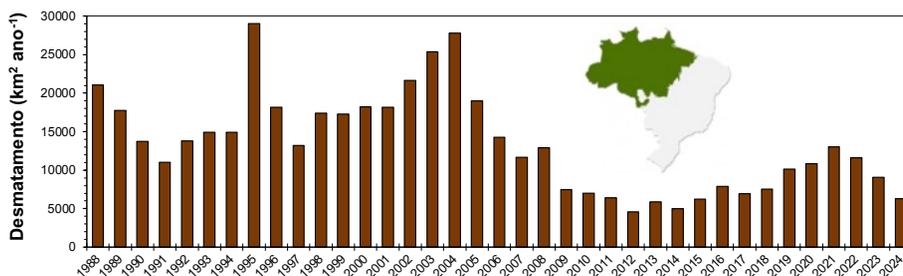


Figura 1: Taxa de desmatamento histórica pelo PRODES, para o bioma Amazônia.

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

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

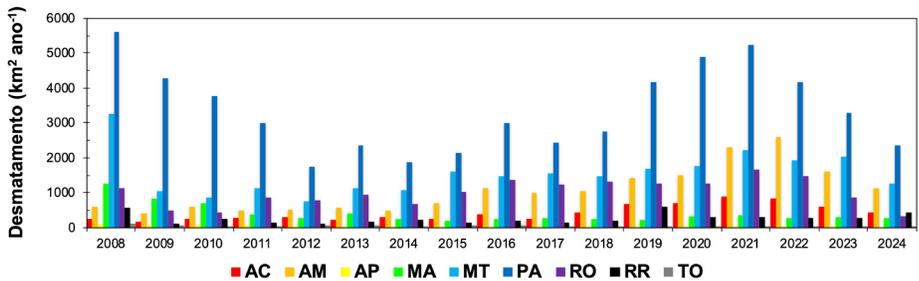


Figura 2: Taxa de desmatamento histórica pelo PRODES por estado do bioma Amazônia.

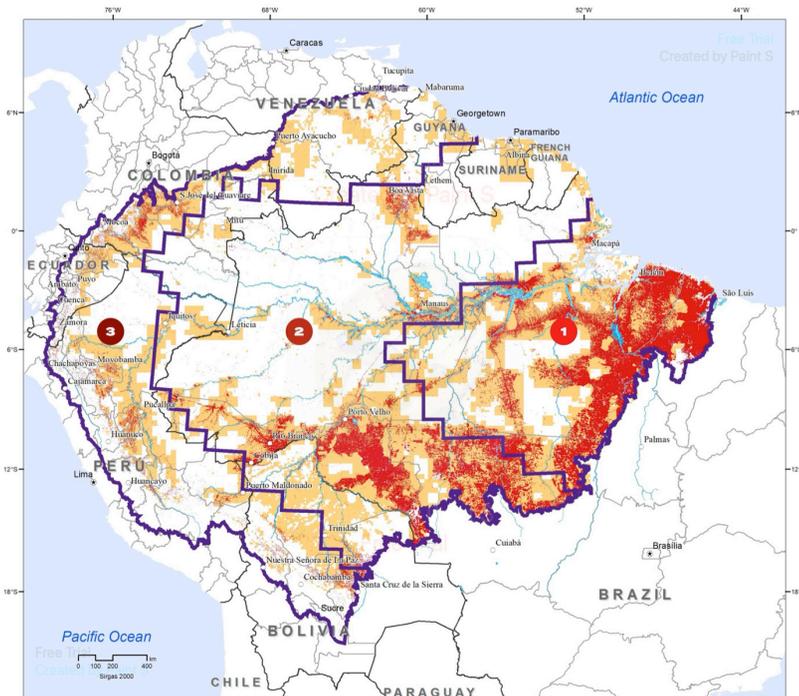


Figura 3: Divisão da Amazonia em três sub-regiões, de acordo com as áreas de influencia relativas as medidas em perfil vertical utilizando aviões de pequeno porte, em quatro localidades na Amazônia no projeto CARBAM^{4,6}. A região 1 concentra a área de influencia dos dois locais de medidas na região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

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

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

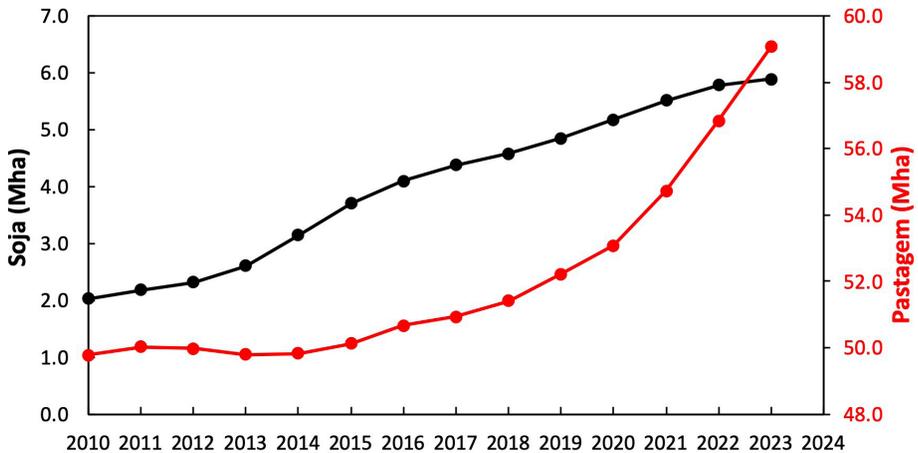


Figura 4: Evolução da área plantada de soja (em preto) e área de pastagem (em vermelho) na Amazonia Brasileira¹¹.

AQUECIMENTO GLOBAL E EXTREMOS AFETANDO O CLIMA AMAZÔNICO

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

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

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

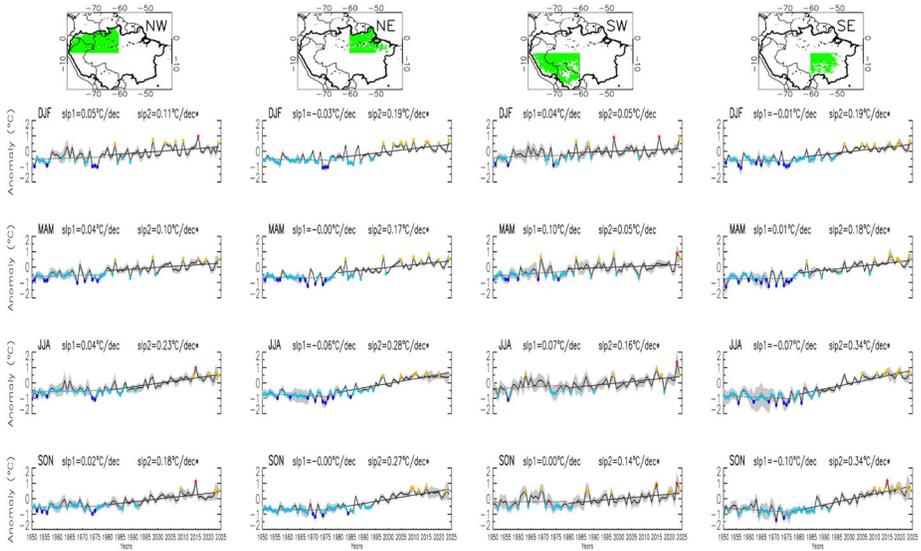


Figura 5: Séries temporais de anomalias sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) de temperatura do ar em diferentes setores das florestas perenes da Amazônia (NO, NE, SO, SE) usando dados fornecidos pela Climate Research Unit CRU Versão 4 (CRUTS4)¹⁷ para o período de referência de 1981-2010. Círculos laranja e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

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

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

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

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

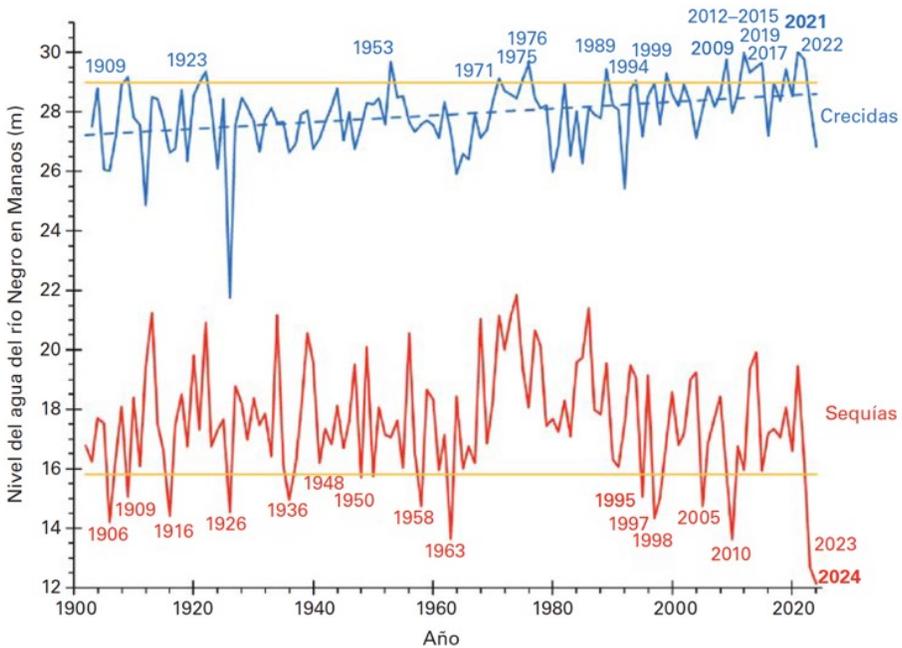


Figura 6: Níveis máximos (linhas azuis) e mínimos (linhas vermelhas) do Rio Negro no Porto de Manaus, de 1902 a novembro de 2024. Os valores em azul e vermelho indicam quando os recordes de cheia e seca foram quebrados, respectivamente. As linhas laranjas representam os limites superior (29,0 m) e inferior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

As ondas de calor mais extremas na Amazônia ocorreram simultaneamente a sinais extremos de seca^{29,33,34}, uma “tempestade perfeita” para a biodiversidade e a conectividade e o funcionamento dos ecossistemas na Amazônia. Eventos compostos de seca e calor aumentam significativamente a incidência de incêndios na Amazônia, conforme relatado em 2005, 2010, 2015 e 2023. Isso leva a um feedback positivo entre incêndios e secas^{26,35}. O aumento da frequência de eventos compostos de seca e ondas de calor também aumenta os riscos de a floresta amazônica se aproximar de limiares térmicos críticos, além dos quais a maquinaria fotossintética dessas árvores começa a falhar, seguido por danos irreversíveis e, conseqüentemente, perda de folhas³⁶⁻³⁸. Áreas que raramente vivenciaram ondas de calor na década de 1980, como a Amazônia e o nor-

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

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

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

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

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

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

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

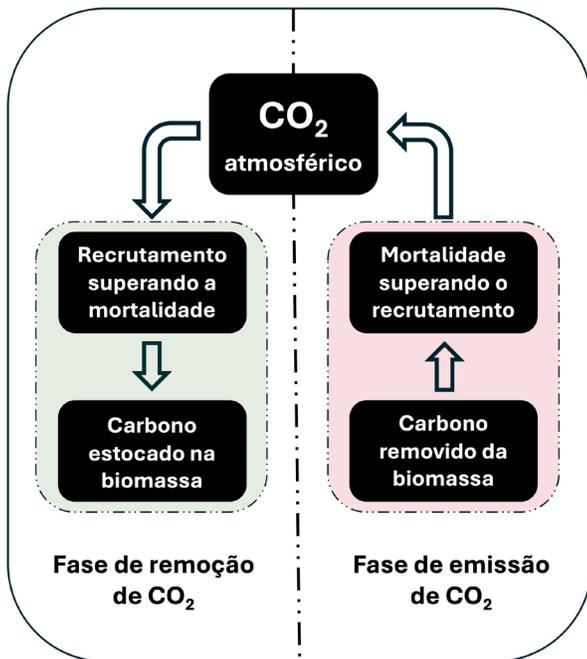


Figura 7: Troca de CO₂ entre atmosfera e vegetação em diferentes fases do ciclo do carbono. Em verde, à esquerda, o fluxo de carbono na fase de remoção de CO₂ da atmosfera pela floresta e em vermelho, à direita, o fluxo de carbono na fase de emissões. Em anos climáticos muito secos e quentes na Amazônia,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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Síntese e implicações

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

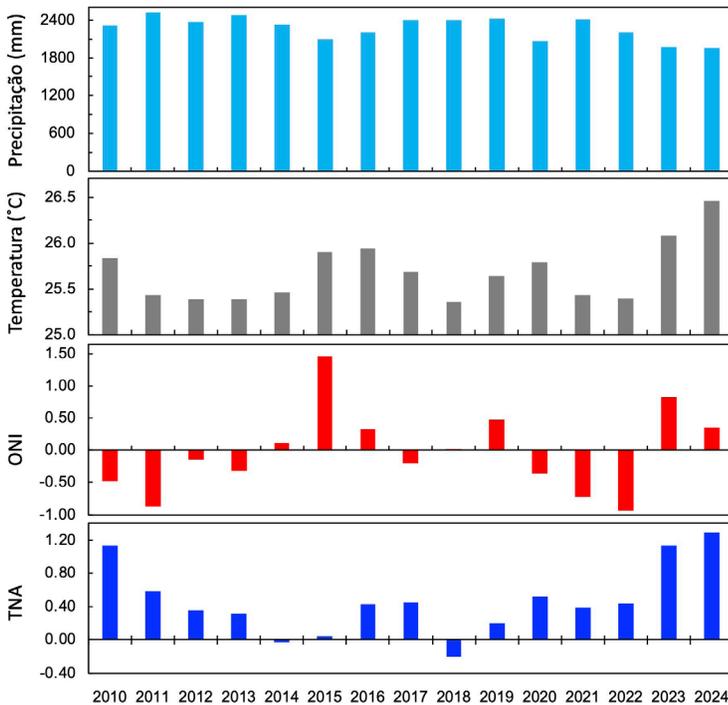


Figura 8: Precipitação acumulada para a Amazonia (GPCP⁶⁸), Temperatura média 2 m da superfície para a Amazônia (ERA569), Oceanic Niño Index⁷⁰ (ONI) e a Anomalia de temperatura do Oceano Atlântico Norte (TNA) na faixa 23.5N - 5.5N, 57.5W - 15.0W, relativo ao período 1971-2000^{69,71}.

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

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

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

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

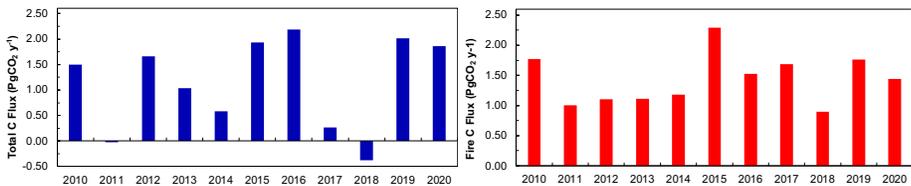


Figura 9: Balanço anual de carbono da Amazonia (barras azuis) e emissões anuais de carbono provenientes de queima de biomassa (barras vermelhas).

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

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

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

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

REFERÊNCIAS

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

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

17. Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. & Lister, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* 7, 109 (2020).
18. Gloor, M. *et al.* Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1729–1733 (2013).
19. Gloor, M. *et al.* Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. *Global Biogeochem. Cycles* 29, 1384–1399 (2015).
20. Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T. & Hyndman, D. W. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100755 (2020).
21. Barichivich, J. *et al.* Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Sci. Adv.* 4, (2018).
22. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050 (2016).
23. Marengo, J. A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* (2018). doi:10.3389/feart.2018.00228
24. Espinoza, J.-C., Marengo, J. A., Schongart, J. & Jimenez, J. C. The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather Clim. Extrem.* 35, 100406 (2022).
25. Paca, V. H. da M., Espinoza-Dávalos, G., Moreira, D. & Comair, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* 12, 1244 (2020).
26. Espinoza, J.-C. *et al.* The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Sci. Rep.* 14, 8107 (2024).
27. WMO. State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2024. (2025).
28. Lorenz, R., Jaeger, E. B. & Seneviratne, S. I. Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophys. Res. Lett.* 37, (2010).
29. Marengo, J. A. *et al.* Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Front. Clim.* 7, (2025).
30. Ratier, R. Água a 38 °C, peixe podre e jacar. morto: Cientistas mostram colapso no AM. (2023). Available at: <https://www.uol.com.br/ecoa/colunas/rodrigo-ratier/2023/10/17/agua-a-38-oc-peixe-p%0D%0Aodre-e-jacare-morto-cientistas-mostram-colapso-no-am.htm>. (Accessed: 19th November 2023)

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

47. Metcalfe, D. B. *et al.* Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytol.* 187, 608–621 (2010).
48. Huaraca Huasco, W. *et al.* Fine root dynamics across pantropical rainforest ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 27, 3657–3680 (2021).
49. Meir, P., Metcalfe, D. ., Costa, A. C. . & Fisher, R. . The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1849–1855 (2008).
50. McFarlane, K. J. *et al.* Experimental warming and drying increase older carbon contributions to soil respiration in lowland tropical forests. *Nat. Commun.* 15, 7084 (2024).
51. Nepstad, D. C. *et al.* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669 (1994).
52. Brando, P. M. *et al.* Drought effects on litterfall, wood production and below-ground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 1839–1848 (2008).
53. Meir, P., Mencuccini, M. & Dewar, R. C. Drought-related tree mortality: addressing the gaps in understanding and prediction. *New Phytol.* 207, 28–33 (2015).
54. Cordeiro, A. L. *et al.* Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interact.* 1, 3–16 (2020).
55. Malhi, Y. *et al.* The Global Ecosystems Monitoring network: Monitoring ecosystem productivity and carbon cycling across the tropics. *Biol. Conserv.* 253, 108889 (2021).
56. MALHI, Y. *et al.* Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 15, 1255–1274 (2009).
57. MALHI, Y. *et al.* The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 12, 1107–1138 (2006).
58. Gatti, L. V *et al.* Cross Chapter 1: The Amazon Carbon Budget. in Amazon Assessment Report 2021 (UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2021). doi:10.55161/VNBV7494
59. Friedlingstein, P. *et al.* Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data* 14, 4811–4900 (2022).
60. Phillips, O. L. & Brienen, R. J. W. Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance Manag.* 12, 1 (2017).

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

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, conseqüentemente, d) mudanças nos ecossistemas e na biodiversidade, como os que já são observados nos biomas brasileiros.

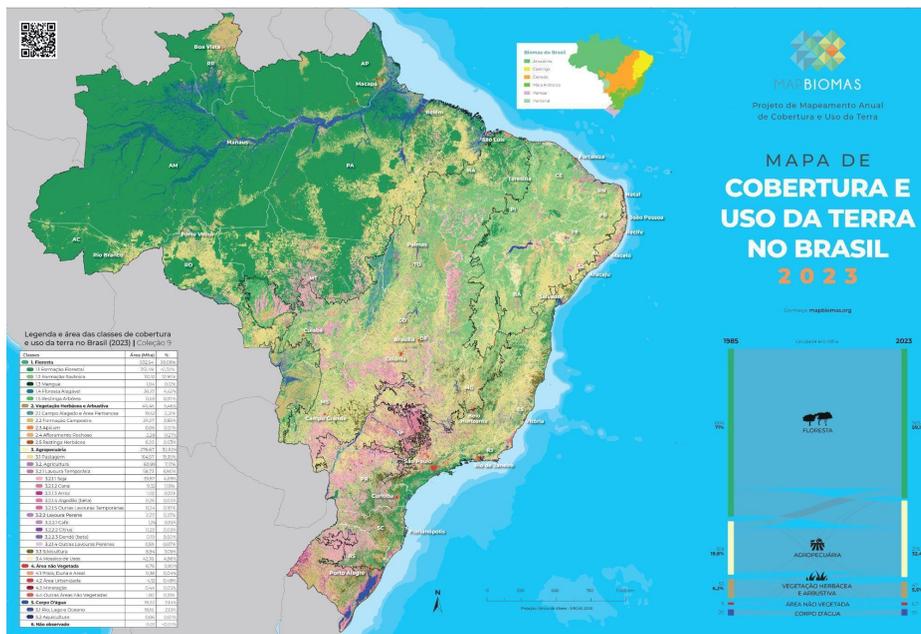


Figura 1: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil, por bioma (2023). À direita, a mudança no uso da terra, com uma redução de florestas de cerca de 71% em 1985 para 59,1% em 2023. A agricultura é responsável pela principal mudança no uso da terra na série histórica. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura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

Frequentemente, mudanças climáticas interagem com outras pressões, como desmatamento, queimadas, sobrexploração, 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 (MapBiomass, 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).

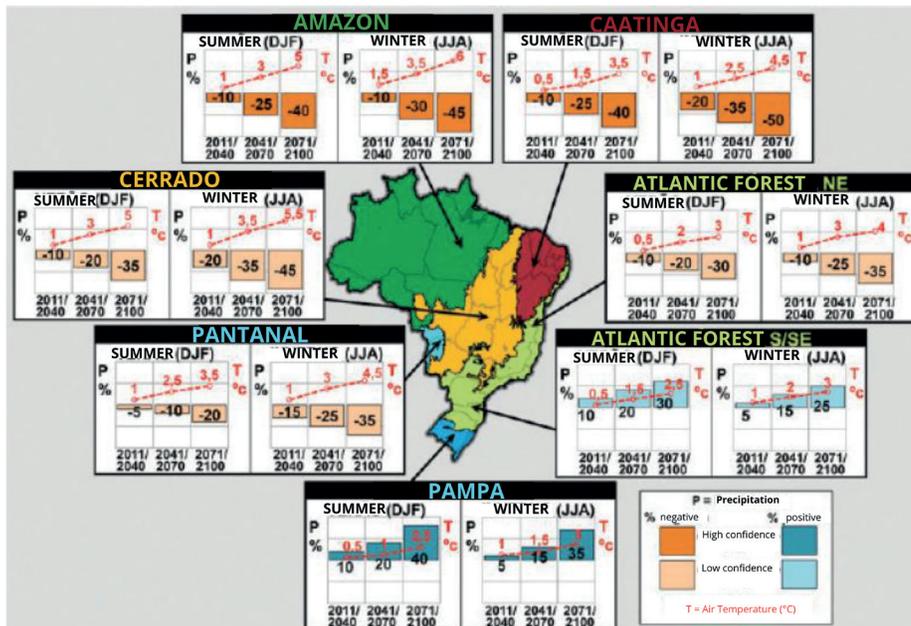


Figura 2: Projeções regionalizadas de clima nos biomas brasileiros da Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa para os períodos de início

(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 previsíveis 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).

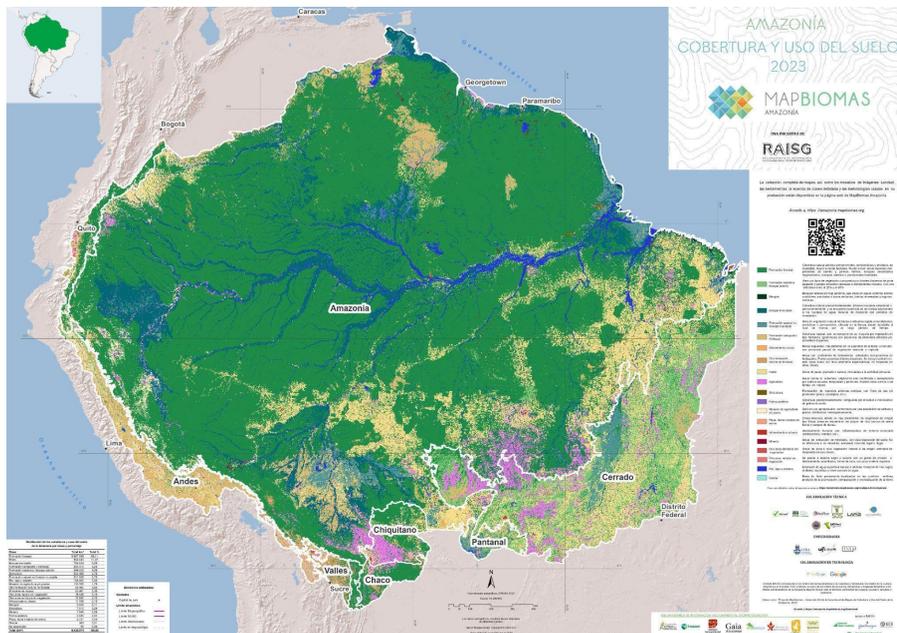


Figura 3: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Pan-Amazônia (2023) mostra a transição de uma ampla faixa, de Rondônia, passando pelo sul do Amazonas até o Pará, para pastagens. Conhecida como "Arco do Desmatamento", essa região demonstra resiliência reduzida dos ecossistemas à emergência climática. (Fonte: 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 MapBiomass (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.

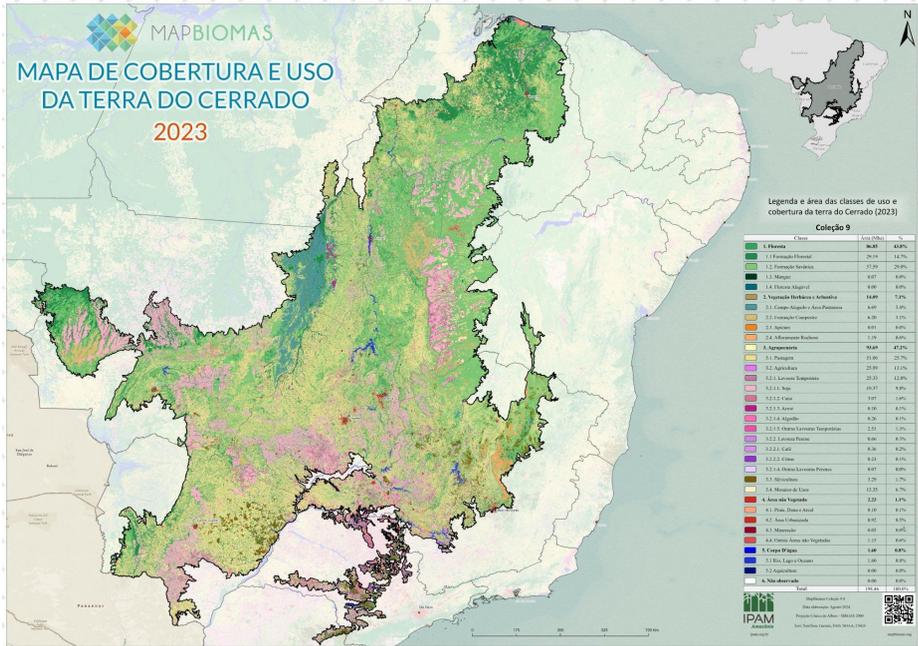


Figura 4: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Cerrado. A agricultura representa 47,2% do uso da terra no bioma. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023).

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).

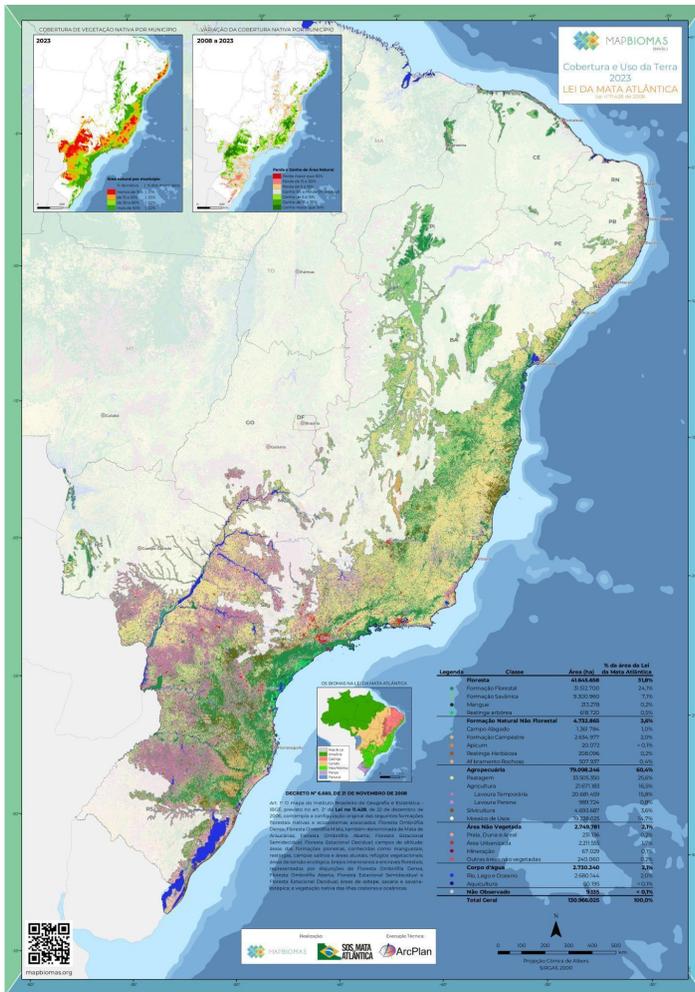


Figura 5: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Mata Atlântica. Apenas 31,8% do território corresponde a áreas de vegetação nativa. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023).

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°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.

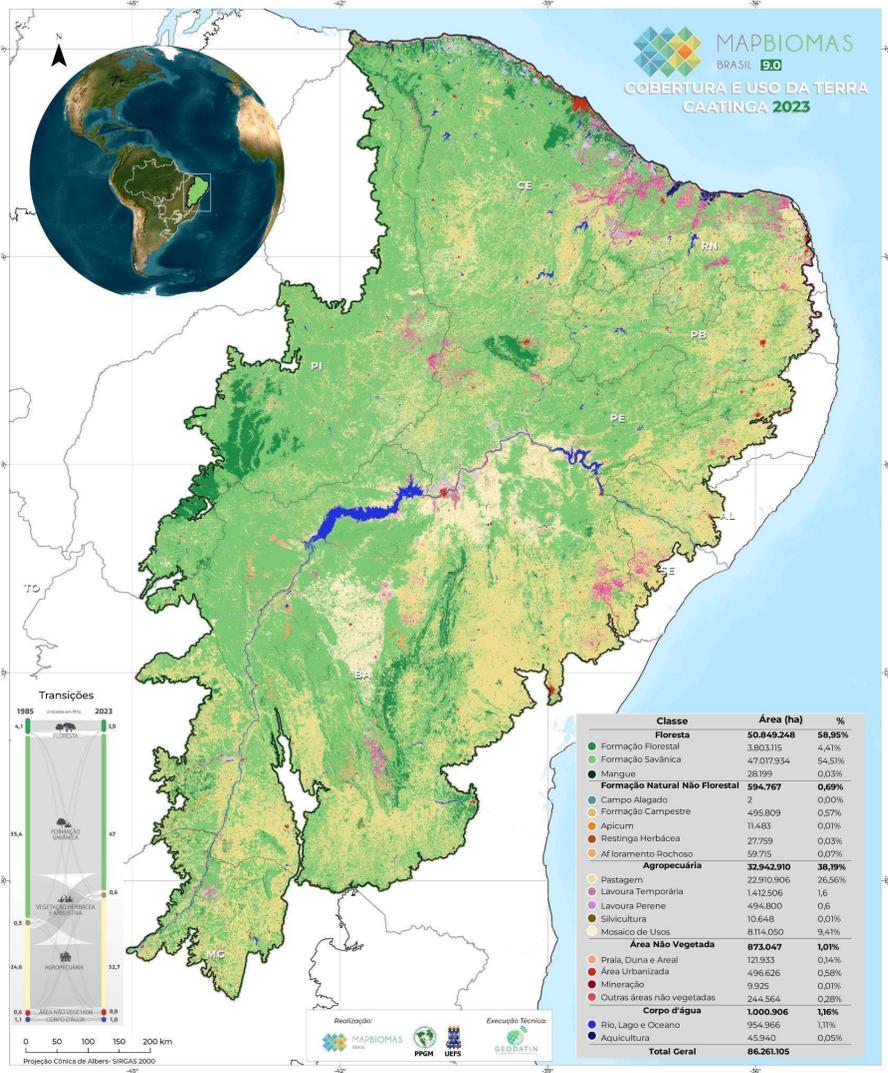


Figura 6: Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Caatinga. Entre 1985 e 2023, áreas florestais, formações savânicas e vegetação arbustiva deram lugar à expansão da agricultura, que correspondeu a 32,7% do uso da terra em 2023. (Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9. 2023)

Espécies vegetais e animais adaptadas ao clima seco, como a aroeira (*Myracrodruon 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.

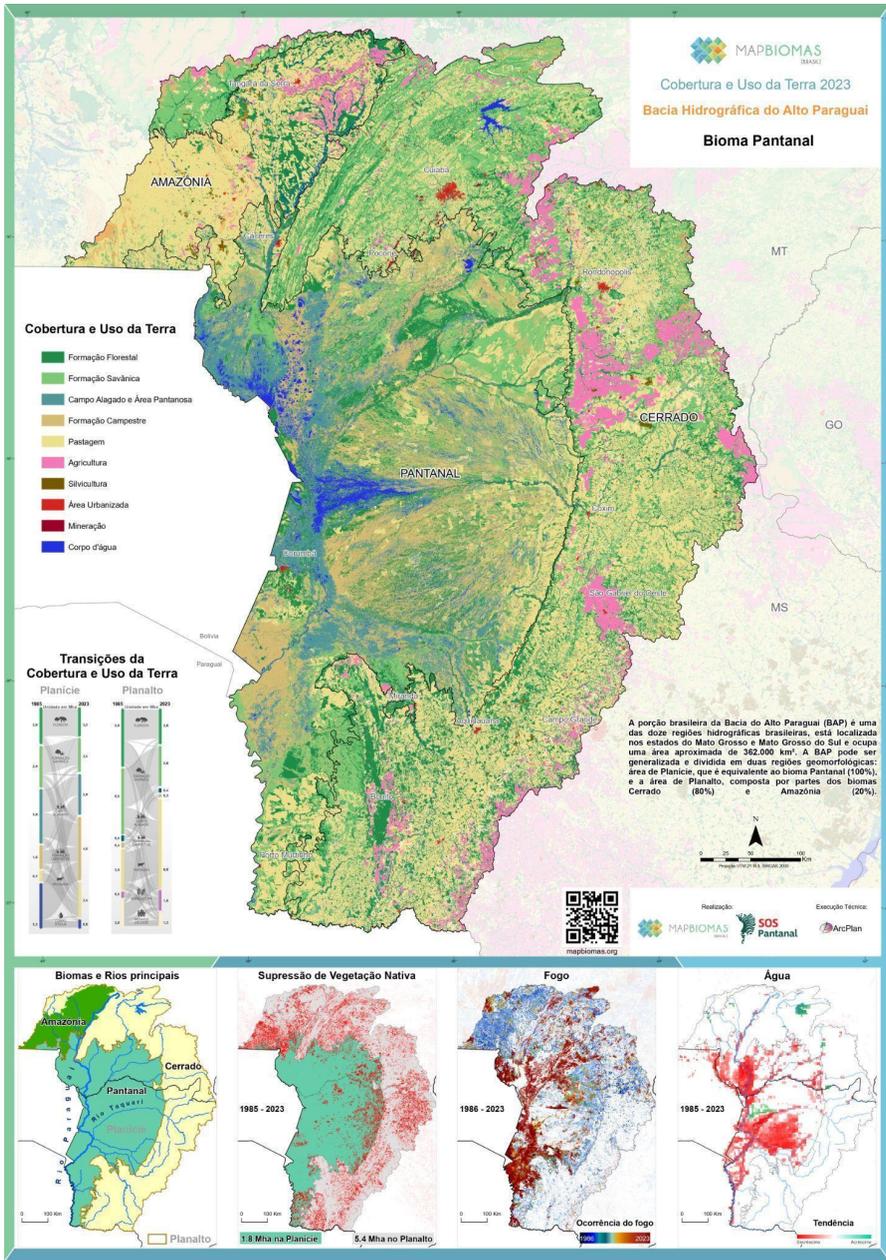


Figura 7: Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Pantanal (2023), com destaque para o aumento da incidência de fogo e para a perda de superfície de água no bioma entre 1985 e 2023. Fonte: Mapbiomas (2023). Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9.

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).

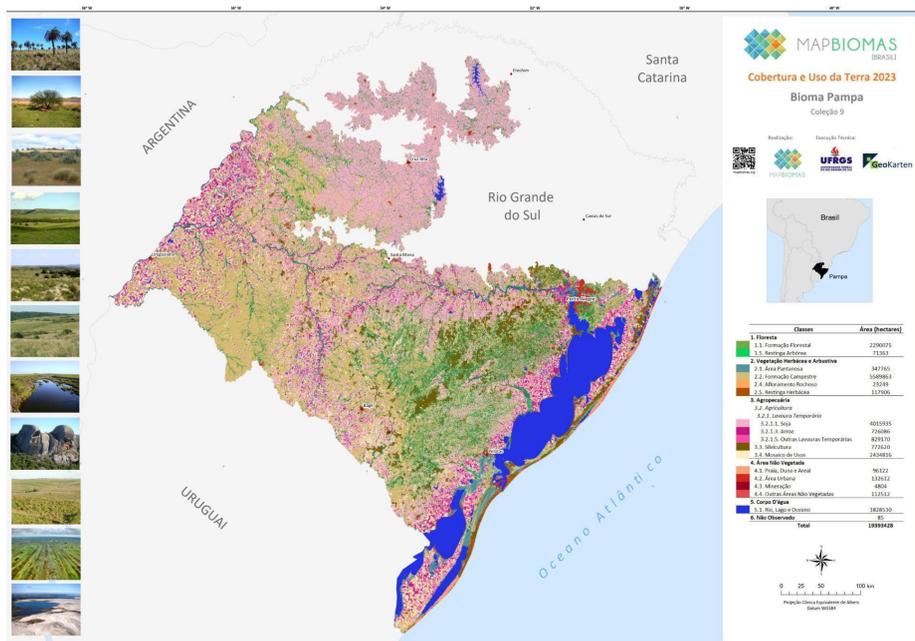


Figura 7: Mapa de Cobertura e Uso da Terra nos Pampas. Apenas 3% do bioma é protegido em uma região onde a agricultura é predominante como uso da terra. Fonte: Mapbiomas. Mapa de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Coleção 9, 2023.

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 Milhorce 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 inundação 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 MapBiomias. Utilizando séries temporais de imagens Landsat, algoritmos de aprendizado de máquina e validação com dados locais, o MapBiomias 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 (MapBiomias, 2023).

Porém, o acesso a imagens de altíssima resolução (<1 metro) é um desafio para a comunidade científica nacional. Imagens comerciais deste 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 (Pribisczki, 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 às 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 alinham 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 multibiomass. 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 autolicensing 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+ (red-projectsdatabase.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.

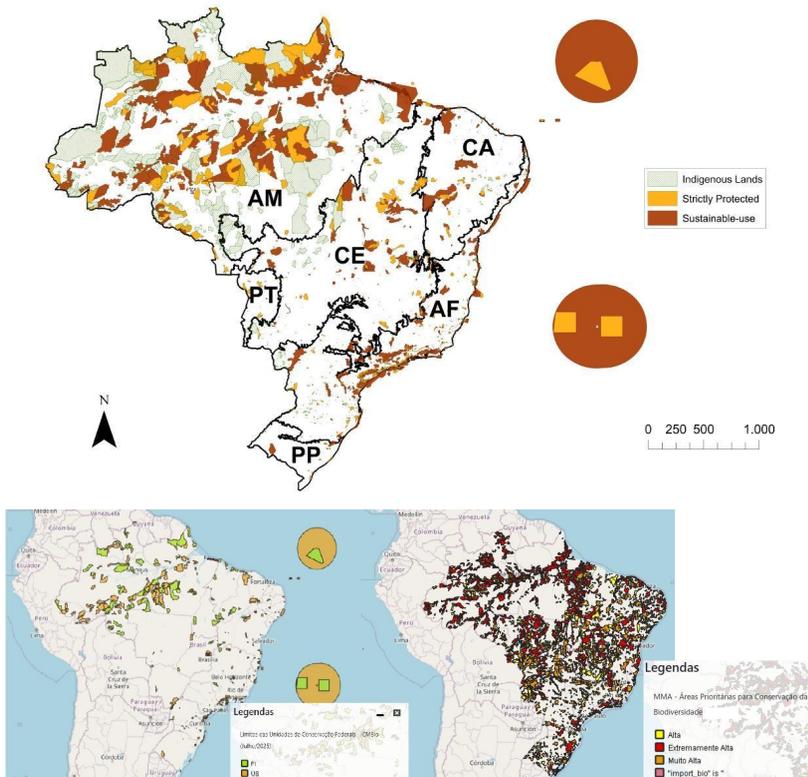


Figura 9: Distribuição de Territórios Indígenas, Unidades de Conservação, Reservas de Uso Sustentável e Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade no Brasil. Fontes: Malecha, A., Vale, M. M., & Manes, S. (2023). Ampliar a rede de áreas protegidas brasileiras é vital em um clima em mudança. *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.	Reduzir 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
<p>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.</p>	<p>MMA, IBAMA, ICMBio, governos estaduais, MPF, produtores rurais, comunidades locais, universidades, institutos de pesquisa e INCTs.</p>	<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.
<p>Planejamento sistemático de conservação, criação de corredores ecológicos e mosaicos agroflorestais, integração com PSA e RPPNs.</p>	<p>ICMBio, SNUC, ONGs, gestores de UCs, estados, municípios, comunidades locais.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - % de território protegido por bioma. - Índices de Conectividade ecológica. - UCs criadas/ redesenhadas. - Planos de manejos atualizados.
<p>Fomento orientado por lacunas, apoio a redes científicas como PP-Bio, inclusão de grupos de pesquisa, integração com INCTs.</p>	<p>MCTI, CNPq, Capes, universidades, institutos de pesquisa, INCTs e FAPs.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Produção científica por bioma - Consolidação de redes científicas por bioma - Proporção de financiamento para cada bioma
<p>Consórcios intermunicipais, coordenação multissetorial e políticas integradas.</p>	<p>MMA, MDA, estados, consórcios intermunicipais, conselhos, sociedade civil.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comitês interfederativos ativos - Planos territoriais integrados - Participação social nos conselhos
<p>Coordenação entre MCTI/MMA, formação de equipe dedicada, manutenção e acessibilidade pública.</p>	<p>MCTI, INPE, IBGE, MMA, universidades, institutos de pesquisa e desenvolvedores públicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Nº 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 ribeirinhas, 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 MapBiomass (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 (Brancaion 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-protegidos 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 tem 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 arbustos, 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% (MapBiomass, 2023) — apenas cerca da metade de floresta maduras — 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.ap-geog.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 tropicalrainforest 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., Alegría, 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
- Dalzochoio, T., Rodrigues, G. Z. P., Petry, I. E., & Silva, L. B. 2016. The use of biomarkers 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. Manag. 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., Brienen, R.J.W., Feldpausch, T.R., Lloyd, J., Monteagudo-Mendoza, A., Arroyo, L., Álvarez-Dávila, E., Higuchi, N., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Silveira, M., Vilanova, E., Gloor, E., Malhi, Y., Chave, J., Barlow, J., Bonal, D., Davila Cardozo, N., Erwin, T., Fauset, S., Hérault, 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 Aguila Pasquel, J., Di Fiore, A., Fernandez 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/c2100003.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/spa-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 Brasiliensia*, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.17655/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101439)

Manes, S., Gama-Maia, D., Vaz, S., Pires, A. P., Tardin, R. H., Maricato, G., Bezerra, 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. Projeto MapBiomass, <https://mapbiomas.org>.

MapBiomass. 2024, 12 de novembro. Redução de superfície de água no Pantanal favorece incêndios. MapBiomass. Recuperado de <https://brasil.mapbiomas.org/2024/11/12/reducao-de-superficie-de-agua-no-pantanal-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-biomas-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 Pantanal 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 wildfires continues degrading Brazilian Amazon forests. *Global change biology* 30, e17202. 10.1111/gcb.17202

Milhorance, C., Sabourin, E., Chechi, L. 2018. Adaptação às mudanças climáticas e integração de políticas públicas no semiárido pernambucano. *Artmix/Odisseia INCT*, Brasília, DF, 39 pages.

Ministério da Economia (Brasil). 2024. Brazil's second nationally determined contribution (NDC): National determination to contribute and transform. UNFCCC. Recuperado de https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second_Nationally_Determined_Contribution_updated_NDC_2024.pdf

cond%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_No-
vember2024.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](https://doi.org/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](https://doi.org/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., Pfoh, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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>
- Prizibiszki, 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 hotspot: 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., Sena, 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., Versteegen, 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., Plutzer, 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., Forstnerhaeusler, 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

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

WEF - World Economic Forum. 2018. The Global Competitiveness Report 2017–2018: Brazil Competitiveness and Inclusive Growth Lab Report [Supplemento]. 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>

4. DEGRADAÇÃO FLORESTAL NO BRASIL E A CRISE CLIMÁTICA

Liana O. Anderson¹², Luiz E.O.C. Aragão¹²

INTRODUÇÃO

O funcionamento das florestas tropicais é crucial para a manutenção da estabilidade climática, a regulação dos fluxos de massa e energia e a preservação da biodiversidade, contribuindo assim para a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais à economia nacional. Esses serviços incluem a manutenção das chuvas para a agricultura de grande escala e de subsistência, bem como a garantia da segurança hídrica e energética. Esses serviços garantem os recursos necessários ao bem-estar humano e à proteção das diversas formas de vida da Terra, e as florestas tropicais podem ser consideradas um bem comum e vital para toda a humanidade. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2025) do Serviço Florestal Brasileiro, em 2022, 58,3% do território brasileiro era coberto por florestas, com uma área estimada de 495.834.867 ha, utilizando 1990 como referência. A maior extensão de nossas florestas encontra-se no bioma Amazônia, sendo a fitofisionomia mais comum a Floresta Ombrófila Densa, representando 67,45% do total de florestas, seguida pelas formações florestais de Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, que cobrem, respectivamente, 15,75%, 8,92% e 6% do território nacional. Do total de florestas, apenas 1,9% são consideradas florestas plantadas.

Além dos benefícios diretos para a sociedade, as florestas tropicais, especialmente as brasileiras, que representam cerca de metade dessas

¹² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos, SP.
Autora correspondente: liana.anderson@inpe.br

florestas globalmente, são componentes essenciais do sistema terrestre para mitigar e aliviar os efeitos das mudanças climáticas. A Amazônia brasileira, por exemplo, é um sumidouro significativo de carbono, armazenando aproximadamente 0,30 (0,22 a 0,37) Pg C ano⁻¹ em suas florestas de Terra Firme não perturbadas (Aragão et al., 2018). Esse fluxo garante um armazenamento total de 150-200 Pg C em sua biomassa, equivalente a 15–20 anos de emissões globais de CO₂ (Flores et al., 2024). No entanto, devido ao desmatamento e outras perturbações antrópicas que causam degradação florestal, essas florestas também contribuem significativamente para as emissões de CO₂ na atmosfera. Segundo dados do Sistema Nacional de Registro de Emissões (SIRENE, 2025), que é o instrumento oficial do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) para a divulgação dos resultados de emissões de gases de efeito estufa no país, em 2022, estimou-se que as emissões brutas totais de todos os gases de efeito estufa para todos os setores econômicos do país somaram aproximadamente 2.040 Tg CO₂eq. Desse total, o setor de mudança do uso da terra e florestas (LULCC) foi responsável por quase 40% das emissões, destacando-se como o setor com a contribuição mais considerável. Considerando as emissões de CO₂ separadamente, a contribuição do setor LULCC atinge quase 60% das emissões nacionais.

A maioria das análises sobre mudanças no uso e cobertura da terra, no entanto, concentra-se apenas nas causas e impactos da perda florestal por desmatamento, obscurecendo o impacto significativo da degradação florestal. De acordo com dados do projeto MapBiomas (Souza et al., 2020), em 1985, havia aproximadamente 604 milhões de hectares de florestas no Brasil (71% da cobertura terrestre do país), dos quais 114 milhões de hectares foram convertidos em áreas dedicadas à agricultura e pecuária até 2023. Apesar da pressão óbvia exercida pelo processo de desmatamento, que é definido pela remoção total da cobertura vegetal nativa, as perturbações antrópicas representam uma ameaça crescente à estabilidade dos ecossistemas naturais no Brasil, principalmente em áreas florestadas. Essa preocupação baseia-se no fato de que perturbações antrópicas causam degradação florestal, resultando em perdas significativas de estoques de carbono, biodiversidade e serviços ecossistêmicos (Costa et al., 2023, Pessoa et al., 2023, Barbosa et al., 2022, Mataveli et al., 2021). A degradação pode ser definida, de acordo com a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças

Climáticas (IPCC), como uma perda direta, induzida pelo homem, de longo prazo (persistindo por X anos ou mais) de pelo menos Y% dos estoques de carbono florestal (e outros atributos florestais) desde o tempo T e não se qualificando como desmatamento (Penman et al., 2003). A degradação causada por perturbações antrópicas está, portanto, relacionada a efeitos de borda, exploração madeireira ilegal e incêndios florestais.

Estima-se que, entre 2001 e 2018, aproximadamente 3,6 milhões de hectares da bacia amazônica foram afetados por alguma forma de degradação associada à atividade humana. Considerando a área de florestas afetadas por incêndios, extração de madeira e efeitos de borda, e as sobreposições entre esses processos, Lapola et al. (2023) estimaram que a área degradada devido a esses fatores afetou pelo menos 364.748 km² (5,5% de todas as florestas amazônicas remanescentes) entre 2001 e 2018, o equivalente a uma área 12% maior do que a área total desmatada no mesmo período (325.975 km²). A degradação impacta direta e negativamente as funções e serviços florestais, como, entre outros, armazenamento de carbono, produtividade biológica, composição de espécies, estrutura florestal, umidade atmosférica local e regional e os usos e valores da floresta para os seres humanos (Lapola et al., 2023).

Os impactos de longo prazo da degradação florestal e sua extensão nas florestas brasileiras diferem daqueles causados pelo desmatamento, tanto em termos de mudanças no funcionamento dos ecossistemas quanto em relação à provisão de meios de subsistência para as populações locais. Os diferentes vetores de degradação frequentemente ocorrem simultânea e repetidamente, aumentando consideravelmente sua pressão sobre as condições das florestas e outras vegetações nativas. Muitos dos efeitos dessas perturbações também ocorrem em escalas de tempo mais longas. Por exemplo, a mortalidade contínua de árvores após um incêndio ou seca extrema significa que as florestas podem continuar a emitir mais carbono por décadas após o evento (Silva et al., 2020). Assim, estimativas recentes sugerem que a perda total de carbono associada aos processos de degradação florestal é comparável, se não maior, à perda de carbono causada pelo desmatamento.

Além disso, estima-se que apenas 14% das florestas amazônicas degradadas foram posteriormente desmatadas ao longo de um período de 22 anos (Bullock et al., 2020), sugerindo que esses processos são parcialmente independentes. Uma estimativa pan-amazônica entre 1995 e 2017 indica que uma área de 103 milhões de ha (\pm 2,4 milhões de ha) foi

impactada por distúrbios humanos e naturais, correspondendo a 17% da área total da floresta em 2017 (Bullock et al., 2020). Em outro estudo, entre 2001 e 2018 (Lapola et al., 2023), a estimativa da área total degradada aumenta para 2.542.593 km², representando 38% das florestas amazônicas remanescentes, considerando extração de madeira, efeitos de borda, incêndios e secas, bem como todas as possíveis sobreposições entre esses fatores. Essa área total degradada inclui 628.909 km² de floresta onde duas ou mais das quatro perturbações se sobrepõem.

A degradação das florestas brasileiras, particularmente as da Amazônia, compromete os valores ecológicos, climáticos, sociais, econômicos, culturais e espirituais profundamente enraizados em comunidades tradicionais e indígenas (Camilotti et al., 2020; Whyte, 2020). Dependendo da escala e da intensidade do processo, essa degradação pode comprometer grande parte do tecido socioeconômico que evoluiu entrelaçado com o ecossistema florestal ao longo de milênios (Pereira et al., 2023). A complexidade e a insubstituibilidade dessas relações bioculturais ressaltam a necessidade urgente de destinação de terras a esses grupos, em conformidade com os direitos territoriais e conforme previsto na Constituição Brasileira, pois isso contribui indiretamente para a conservação dessas florestas. Portanto, compreender, monitorar e explorar formas alternativas de prevenir a degradação florestal são de importância ímpar para a compreensão não apenas do contexto das emissões de gases de efeito estufa, mas também de todo o potencial valor sociobioeconômico que esse ativo ambiental oferece ao país.

Os resultados dos estudos apresentados neste capítulo representam, principalmente, pesquisas lideradas por ou com participação significativa de pesquisadores brasileiros. Devido à importância da região amazônica e à disponibilidade de estudos de larga escala publicados sobre o tema da degradação nessa região, muitos dos resultados aqui apresentados se concentrarão no conhecimento atual estabelecido sobre a maior floresta tropical do mundo, a Amazônia. Vale ressaltar que pesquisadores brasileiros, seja em instituições no Brasil ou no exterior, lideraram mais de 50% das referências citadas. Entre as demais referências, a maioria dos estudos conta com a participação de autores brasileiros. Aproximadamente um terço dos estudos foi publicado nos periódicos *Science* e *Nature*, destacando a qualidade excepcionalmente alta da ciência brasileira. Os trabalhos restantes são publicados principalmente em periódicos com alto fator de impacto. Esta avaliação destaca o papel

de liderança da ciência brasileira, bem como a importância do fluxo de conhecimento e da consolidação de colaborações internacionais para o avanço da compreensão de questões relevantes e complexas de interesse nacional e global.

Neste capítulo, abordaremos dois tipos de pressões enfrentadas por nossas florestas: climáticas e antropogênicas. Primeiramente, discutiremos as ameaças representadas por secas e temperaturas extremas ao funcionamento das florestas. Em seguida, exploraremos os estressores humanos, com foco na fragmentação florestal, no efeito de borda e nos incêndios florestais. Por fim, exploraremos maneiras de mitigar as emissões do desmatamento e da degradação florestal, discutindo os benefícios da restauração florestal e as necessidades críticas da ciência e da tecnologia para apoiar a implementação eficiente de políticas públicas.

SECAS E TEMPERATURAS EXTREMAS COMO VETORES DE DEGRADAÇÃO

Alguns dos principais processos climáticos interanuais que modulam eventos de seca na Amazônia incluem anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) nos oceanos Pacífico Norte e tropical e Atlântico Norte e tropical (Aragão et al., 2018; Marengo, 2004). Essas oscilações são medidas por índices climáticos, que são: índice de Oscilação Tropical do Atlântico Sul (TSA), índice multivariado ENSO (MEI V2), índice de Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e índice de Oscilação Decadal do Atlântico. Estudos sugerem que secas extremas foram intensificadas por mudanças climáticas induzidas pelo homem. Por exemplo, na região amazônica, estima-se que forçantes antropogênicas alteraram a intensidade da seca de 2015-2016 e aumentaram o risco desse evento em cerca de quatro vezes, com um intervalo de confiança variando de 2,7 vezes a 4,7 vezes (Ribeiro et al., 2020). Desde o início do século XXI, quatro secas intensas (2005, 2010, 2015-2016 e 2023-24) foram classificadas como eventos que ocorrem uma vez a cada cem anos quando ocorreram. No entanto, cada uma delas foi superada em magnitude pelo evento seguinte (Barichvich et al., 2018; Papastefanou et al., 2022; Espinoza et al., 2024).

Especialmente, dependendo do padrão de aquecimento do oceano, as secas afetam diferentes regiões. Por exemplo, as áreas afetadas por reduções na precipitação devido a eventos ENSO positivos e fases quen-

tes da ODP estão predominantemente localizadas no norte e nordeste da Amazônia, bem como na borda ocidental da Amazônia, abrangendo Equador e Peru. As áreas afetadas por TSS anormalmente altas no Atlântico Norte ocorrem predominantemente na Amazônia centro-ocidental, e aquelas afetadas por TSS anormalmente altas no Atlântico Sul tropical oriental afetam predominantemente o sul da Amazônia boliviana e o norte da Amazônia venezuelana (Marengo et al., 2011). Utilizando o Índice Integrado de Secas (IDI) (Cunha et al., 2019), os anos de 2023 e 2024 ocupam o primeiro lugar em termos de extensão de áreas afetadas pela seca, cobrindo aproximadamente 5 milhões de km², o que corresponde a cerca de 59% do território brasileiro. Em segundo lugar, a seca de 2015-2016 afetou aproximadamente 4,6 milhões de quilômetros quadrados (aproximadamente 54% do país). A seca de 1997-1998 afetou cerca de 3,6 milhões de km², o equivalente a 42% do território nacional (CEMADEN, 2024).

A exposição e a vulnerabilidade das florestas brasileiras a secas e temperaturas extremas têm se tornado cada vez mais evidentes. Por exemplo, secas afetam as florestas amazônicas aproximadamente a cada cinco anos (Anderson et al., 2018). O primeiro evento documentado de mortalidade generalizada de árvores em florestas de terra firme resultante de uma seca foi registrado em 2005 (Phillips et al., 2009). Esse evento causou impactos persistentes nas copas das árvores, que duraram pelo menos 4 a 5 anos após a seca (Saatchi et al., 2013). Embora não haja evidências de impactos compostos entre as recorrências de seca, com base em dados de campo, estimou-se que, durante a seca de 2010, as florestas de terra firme não ganharam biomassa, houve um aumento na mortalidade de árvores e um declínio na produtividade florestal. Esses impactos cobriram uma fração significativa da bacia amazônica durante a seca de 2010 e estavam relacionados à intensidade do déficit hídrico (Feulds-patch et al., 2016). No entanto, a avaliação de dados de satélite sobre a capacidade fotossintética da floresta revelou que os impactos das secas parecem se agravar ao longo do tempo, com a recorrência dos eventos (Anderson et al., 2018). Neste estudo, os pesquisadores observaram uma redução na capacidade fotossintética, evidenciada por dados de satélite que monitoram a vegetação, afetando mais de 400.000 km² de florestas na Amazônia brasileira. Essa redução foi acompanhada por um aumento na intensidade e em áreas florestais cada vez maiores afetadas em anos de seca extrema.

Um estudo que avaliou o impacto do El Niño de 2015-2016 nas florestas tropicais da América do Sul, com foco na Amazônia e na Mata Atlântica, mostrou que todos os locais de coleta de dados apresentaram temperaturas extremas e maiores déficits hídricos (DH) durante o período censitário de El Niño de 2015-2016 do que no período de monitoramento pré-El Niño (Bennett et al., 2023). O DH serve como um indicador de estresse hídrico em florestas, com base na lógica de que a floresta entra em estresse quando a evapotranspiração excede a precipitação, sem considerar a capacidade de armazenamento de água do solo e as adaptações fisiológicas das plantas (Aragão et al., 2007). Os resultados do estudo de Bennett et al. (2023) revelaram que, durante as altas temperaturas e a seca induzidas pelo fenômeno El Niño de 2015-2016, as 123 parcelas florestais monitoradas não conseguiram atuar como um sumidouro significativo de carbono na biomassa, contrastando com seu comportamento de longo prazo antes do evento El Niño. Os autores estimaram que a mudança líquida no carbono foi impulsionada por um aumento significativo nas perdas devido à mortalidade de árvores, de 1,96 para 2,41 Mg C ha⁻¹ por ano ($P = 0,02$). Em comparação, não houve mudança nos ganhos de carbono com o crescimento das árvores e o recrutamento de novas árvores (2,40 Mg C ha⁻¹ por ano antes do El Niño e 2,43 Mg C ha⁻¹ por ano durante o El Niño, $P = 0,7$) (Bennett et al., 2023).

Os impactos das secas nas florestas são claros, mas com que frequência essas secas afetaram a floresta amazônica? Uma análise de dados históricos de 2003 a 2020 revela que certos anos têm um impacto significativo em extensas áreas florestais, representando $\geq 20\%$ da área total da região, e são caracterizados por anomalias severas de precipitação (precipitação anual abaixo da média local de longo prazo). Esses anos (área afetada) foram os seguintes: 2015 (54%), 2010 (35%), 2020 (26%), 2003 (21%) e 2005 (20%). No entanto, reduções substanciais na precipitação não levam necessariamente a déficits hídricos em solos florestais, já que a precipitação na região amazônica geralmente está bem acima da demanda hídrica da vegetação, que é de aproximadamente 100 mm por mês (Aragão et al., 2007). Assim, o cálculo do déficit hídrico acumulado máximo (DMCA, Aragão et al. 2007) é considerado um indicador mais apropriado para analisar o impacto das secas em áreas florestais.

Avaliar este indicador como uma alternativa às anomalias de precipitação revela uma ligeira mudança nos anos e área afetada em termos da extensão das anomalias MCWD, com os anos (área afetada) de 2015

(34%), 2010 (33%), 2016 (33%), 2005 (24%) e 2007 (21%) se destacando. Além disso, uma análise recente do déficit hídrico acumulado, derivada de dados de precipitação (Lapola et al., 2023), mostrou que entre 2001 e 2018, 2.740.647 km² da área florestal do bioma Pan-Amazônico foi afetada por secas, correspondendo a 41,1% da cobertura florestal amazônica remanescente (6.673.908 km²). Embora os efeitos cumulativos das secas sobre as florestas ainda não sejam totalmente compreendidos, sabe-se que as secas induzem aumento da mortalidade e diminuição do crescimento das árvores, potencialmente exacerbando esse impacto em áreas afetadas múltiplas vezes. Sabe-se que mais de um terço da área afetada por secas extremas foi afetada por dois (26%) ou mais (10%) eventos ao longo de um período de 18 anos (Lapola et al., 2023).

Impactos cada vez mais severos e complexos das secas na Amazônia estão sendo observados. Recentemente, a seca de 2023-24 foi caracterizada por chuvas excepcionalmente escassas e sete ondas de calor durante a estação seca (Espinoza et al., 2024). Os níveis dos rios atingiram níveis recordes de baixa e os incêndios aumentaram (Jiménez et al., 2024), resultando em uma série de impactos negativos sobre toda a população e os ecossistemas amazônicos. Durante 2023-2024, houve uma redução de mais de 8% na extensão de águas abertas (AAA) na Amazônia central em comparação com a AAA média de novembro e dezembro. Uma redução de 4.458 km² foi observada em dezembro de 2023 em comparação com a média do OWE para dezembro, e uma análise comparativa destacou a transição de áreas anteriormente alagadas para zonas secas durante a seca de 2023, destacando uma diferença substancial de até 80% tanto em porcentagem quanto em área (Maciel et al., 2024). A perda total de água superficial em 2023, em comparação com o mesmo período de 2022, atingiu 3,3 milhões de hectares, sendo os locais mais afetados o estado do Amazonas, com perda de 1,96 milhão de hectares (59,4%) de água superficial, seguido pelo Pará (841.000 hectares; 25,5%) e Roraima (333.000 hectares; 10,1%) (Souza Jr et al., 2024).

Variações nos níveis dos rios têm impactos significativos nas florestas. Householder et al. (2024) demonstraram que um sexto das árvores nas planícies de inundação da Amazônia são ecologicamente especializadas em habitats de planície de inundação, destacando a importância desses ambientes de água doce para a conservação da biodiversidade. A disponibilidade de água no solo, que determina a percepção das plantas de déficit ou excesso hídrico, é controlada principalmente pelas condi-

ções edáficas e hidrológicas locais, sendo estas últimas significativamente influenciadas pela topografia. Assim, árvores expostas ao mesmo macroclima podem estar em contato direto com águas subterrâneas (como em terras baixas e vales, com solos mais úmidos onde há lençol freático raso - SWT) ou longe dessa fonte (como em encostas e planaltos), sofrendo maiores déficits hídricos e sendo mais dependentes da precipitação (Esteban et al., 2020). Evidências da região central da Amazônia sugerem que espécies associadas a florestas de lençol freático raso foram significativamente menos afetadas por períodos de seca severa do que aquelas associadas a florestas em locais com águas subterrâneas mais profundas. No entanto, períodos extremos de seca e precipitação reduziram as taxas de crescimento em diâmetro entre 11% e 42% e aumentaram a mortalidade entre 88% e 146%, respectivamente, indicando que ambos os extremos climáticos podem ter efeitos adversos sobre a floresta (Esteban et al., 2020). No entanto, espécies associadas a SWTs não apresentam diminuição no crescimento ou aumento na mortalidade à medida que a seca se torna mais severa e poderiam, pelo menos com base em evidências limitadas até o momento e teoricamente, funcionar em condições de seca como refúgios hidrológicos, ou seja, locais na paisagem que sustentam populações de uma espécie enquanto as condições climáticas circundantes se tornam inadequadas (Costa et al., 2023).

A multiplicidade de resultados de dados de longo prazo, medidos em campo por meio de inventários florestais ou imagens de satélite, nos leva a duas conclusões claras. Primeiro, os eventos de seca aumentam a mortalidade de árvores e reduzem a capacidade de absorção de carbono dessas florestas. Impactos semelhantes foram registrados durante secas em outras florestas tropicais do país. Em segundo lugar, a frequência e a intensidade dessas secas estão aumentando, com as mudanças climáticas globais contribuindo para essa tendência. Portanto, áreas cada vez maiores de floresta estarão expostas a repetidos eventos de seca com altas temperaturas, aumentando assim o risco de interrupção da prestação de serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo a perda da estabilidade dos estoques de carbono, da biodiversidade e do ciclo hidrológico. Além disso, as secas podem aumentar a vulnerabilidade das florestas a outros vetores de degradação, como incêndios, e exacerbar os impactos negativos de outros eventos, como a fragmentação, conforme discutido nas seções seguintes.

FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL E EFEITOS DE BORDA

Estima-se que, na faixa tropical da América Latina, entre 2001 e 2018, aproximadamente 11,72% (702.954 km²) da cobertura florestal existente desde 2000 (702.954 km²) foi perdida, a uma taxa média de 39.053 ± 11.677 km² por ano (Silva Júnior et al., 2022). O desmatamento inevitavelmente leva à perda de habitat, alterando a distribuição espacial e o tamanho das florestas remanescentes por meio da fragmentação florestal (Villard & Metzger, 2014). Analisando as florestas de sete estados da Amazônia brasileira entre 2001 e 2010, Numata e Cochrane (2012) estimaram que o número total de fragmentos dobrou no período analisado, de 76.866 fragmentos em 2001 para 143.572 fragmentos em 2010, considerando bordas florestais com comprimento de 1.000 m, quantificando um aumento de 467.237 km² em 2001 para 543.393 km² em 2010. Para 2014, uma avaliação abrangendo a área florestal total dos nove estados da Amazônia brasileira e definindo bordas com extensão estimada de 1.020 m, resultou em uma área florestal total de 3.177.238 km², dos quais 28,1% foram classificados em alguma classe de fragmentação. Desse total, 3,2% das florestas remanescentes se enquadram na categoria de fragmentos isolados, conhecidos como ilhas florestais, que são florestas relativamente mais isoladas dentro da paisagem e suscetíveis à degradação (Vedovato et al., 2016). Em termos comparativos, somando os tipos de fragmentação florestal para o ano de 2014, na ordem de 891.593 km² de florestas, e considerando que os efeitos de borda se estendem até 1.020 m dentro da floresta, temos uma área afetada 17% maior do que o total de desmatamento acumulado até o momento (Vedovato et al., 2016).

Na escala da bacia amazônica envolvendo nove países, Silva Júnior et al. (2020) estimaram que as áreas de borda florestal, definidas como 120 m de largura em direção ao interior da floresta a partir de um determinado uso da terra, aumentaram de 16.212 km² em 2001 para 176.555 km² em 2015, representando 65% da área total desmatada durante esse período. Esse número fornece uma estimativa média de 11.770 ± 3.546 km² de novas bordas florestais formadas anualmente na Amazônia. Para o ano de 2009, nessa região, foram estimados um total de 77.038 fragmentos com uma área média de 83,76 km² e 321.135 km² de área total de borda (1.000 m de largura) (Putz et al., 2014). Em relação à Mata Atlântica, em 2005, os mesmos autores identificaram um total de 245.173 fragmentos florestais com área média de 0,63 km² e comprimento total de borda de 73.476 km²,

considerando um limiar de 1.000 m de largura. Uma avaliação da idade das bordas florestais na bacia amazônica revelou que, em 2015, 23% das bordas florestais tinham entre 1 e 3 anos, 21% entre 4 e 6 anos, 19% entre 7 e 9 anos, 20% entre 10 e 12 anos e 16% entre 13 e 15 anos, resultando em uma idade média de 7 ± 3 anos (Silva Júnior et al., 2020). Esses resultados indicam que a fragmentação florestal na América tropical teve um impacto significativo nas florestas nativas. Dependendo do histórico das fronteiras de desmatamento, podem ser observadas bordas de diferentes idades, o que conseqüentemente leva à variação espacial e temporal nos impactos desse efeito de borda na estrutura florestal, especialmente nos estoques de biomassa (Silva Júnior et al., 2020).

O estudo do efeito de borda na biomassa ampliou nossa compreensão do impacto negativo desse processo nos estoques de carbono florestal, tanto em termos do aumento da mortalidade de árvores devido às mudanças microclimáticas quanto do aumento da incidência de incêndios nas bordas florestais. As bordas florestais sofrem perdas significativas de carbono, pelo menos nos primeiros 100 m em direção ao seu interior, ao longo de sua formação, induzidas por mudanças microclimáticas em seu interior, levando ao aumento das taxas de mortalidade de árvores (Laurance et al., 2011; Magnago et al., 2015; Meza-Elizalde et al., 2021; Nunes et al., 2023). Hissa et al. (2018) relataram uma pequena contribuição dessa perturbação para as perdas totais de carbono em relação ao desmatamento, com uma média de 1,88% e 3,7% para 100 e 300 metros de bordas, respectivamente, durante o período de 1985 a 2012, avaliado em um trecho de 700 km ao longo da rodovia BR-163 entre os estados do Pará e Mato Grosso.

Em outro estudo, Numata et al. (2010) estimaram que a perda de carbono devido ao efeito de borda representou 3,6% da perda total atribuída a todos os fluxos de carbono derivados do desmatamento entre 1985 e 2008 em uma região do estado de Rondônia. Na escala da Amazônia brasileira, Numata et al. (2011) avaliaram o carbono liberado pelas bordas florestais entre 2001 e 2010, representando 2,6–4,5% das emissões de carbono relacionadas ao desmatamento, mas sua importância relativa aumentou de 1,7–3,0% para 3,3–5,6% entre os períodos de baixas e altas taxas de desmatamento, respectivamente. Os autores já haviam alertado para o crescente aumento das emissões devido à criação de novas bordas florestais. Entretanto, Silva-Júnior et al. (2020) quantificaram que para florestas na região Pan-Amazônica, entre 2001 e 2015, as per-

das médias de carbono associadas ao efeito de borda corresponderam a um terço das perdas decorrentes do desmatamento. Este estudo demonstrou uma perda bruta total de carbono devido ao efeito de borda de aproximadamente 947 Tg C (0,95 Pg C), com uma média de 63 ± 8 Tg C por ano. Para comparar a ordem de grandeza dessas perdas com aquelas devidas ao desmatamento, estimou-se uma perda bruta total de 2592 Tg C (2,59 Pg C) para o mesmo período, com uma média de 173 ± 46 Tg C por ano. A análise temporal dessa contribuição revela uma perda de carbono nas bordas florestais estimada em 25% em relação à perda causada pelo desmatamento em 2001, com um aumento para 48% em 2015. É importante notar que os estoques de carbono florestal acima do solo diminuem progressivamente nas bordas da Floresta Amazônica devido à sua idade, sendo o período mais crítico os primeiros cinco anos após a criação da borda florestal (Silva Júnior et al., 2022). Da mesma forma, Laurance (1997) encontrou uma perda significativa de biomassa, variando de 8% a 14%, nos primeiros 100 metros de bordas florestais durante os primeiros 10 anos após a fragmentação, com a perda mais pronunciada ocorrendo nos primeiros quatro anos.

No estágio inicial da formação da borda, as taxas de mortalidade aumentam significativamente entre as árvores de grande porte, que são responsáveis pela maior parte do carbono armazenado na floresta (Laurance et al., 2000; Brando et al., 2024). Posteriormente, à medida que as bordas envelhecem, as taxas de renovação, o número de lianas lenhosas e espécies pioneiras aumentam como resultado do processo de sucessão (Laurance et al., 2011; Numata et al., 2017). Após esse processo, a comunidade vegetal estabelecida na borda da floresta tende a se adaptar melhor às novas condições microclimáticas, reduzindo a perda de biomassa devido à mortalidade das árvores. Embora o crescimento de novas árvores aumente ao longo do tempo, as taxas de renovação também aumentam (Esquivel-Muelbert et al., 2019) como consequência do aumento da mortalidade, levando a uma tendência das bordas da floresta permanecerem em um estado alternativo de equilíbrio pós-fragmentação. Este estado alternativo, que se estabiliza entre 6 e 15 anos após a criação da borda, é caracterizado por florestas com menor biomassa acima do solo (BPA) do que as áreas centrais adjacentes. Isso ocorre porque a maioria das bordas amazônicas está constantemente exposta a incêndios, o que na Amazônia brasileira pode levar a uma redução da BPA florestal de $24,8 \pm 6,9\%$ após 31 anos (Silva et al., 2018; Silva et al., 2020). Barni et al.

(2025) avaliaram os impactos dos efeitos da borda florestal entre 2007 e 2023 no município de Rorainópolis, localizado no sul do estado de Roraima, e quantificaram uma perda de biomassa de 19 Mg C ha⁻¹. Os autores também avaliaram a perda de carbono na biomassa em um local exposto a três vetores de degradação, totalizando uma perda de 36,4% de carbono na biomassa exposta, ponderada pelas áreas de ocorrência e considerando os percentuais de perda de 22,15% devido a incêndios, valor semelhante ao estimado por Silva et al. (2018) e Silva et al. (2020), e 8,20% devido à exploração seletiva de madeira e 8,75% devido ao efeito de borda.

Os impactos desse processo de fragmentação florestal e o efeito de borda resultante vão muito além do carbono armazenado na biomassa florestal. Sabe-se que, em paisagens fragmentadas, a área do fragmento florestal é um importante determinante da persistência das espécies. Sugere-se que a conservação da diversidade de aves florestais é impactada negativamente pelo tamanho do fragmento, sendo sugerida uma área mínima de mais de 10.000 ha para manter a diversidade em florestas bem preservadas (Lees et al., 2006; Morante-Filho et al., 2015). Os impactos das perturbações florestais se estendem a toda a biodiversidade, incluindo a fauna e a flora. Um estudo com foco na Mata Atlântica revelou que fragmentos florestais podem ter de 25% a 32% menos biomassa, de 23% a 31% menos espécies e 33%, 36% e 42% menos indivíduos de espécies endêmicas, de sementes grandes e de sucessão tardia, respectivamente (Lima et al., 2020).

Esses resultados indicam que, apesar da redução nas taxas de desmatamento, novas bordas florestais ainda estão sendo criadas. Essas bordas contribuirão significativamente para o aumento das emissões nacionais de gases de efeito estufa. Além disso, o efeito observado sobre a biodiversidade da fauna e da flora compromete ativos bioeconômicos e funções ecossistêmicas críticas, como os processos de polinização. Acabar com o desmatamento ilegal e reduzir a expansão das bordas florestais são essenciais para o sucesso dos esforços de redução das emissões por desmatamento e degradação florestal no Brasil, bem como para o cumprimento dos acordos internacionais que visam mitigar a crise climática.

INCÊNDIOS FLORESTAIS

A gravidade, a extensão e a recorrência dos incêndios florestais estão aumentando em todo o mundo. No Brasil, em particular, esse aumento se deve às atividades humanas relacionadas à mudança do uso da terra, ao desmatamento e à degradação florestal, sendo as pessoas a principal causa das ignições e seus impactos amplificados pelas mudanças climáticas, com o aumento da frequência e da intensidade de secas e extremos de temperatura (Lapola et al., 2023, Jones et al., 2024, Kelley et al., 2025).

No Brasil, há um registro médio de 219.811 detecções de incêndios por ano entre 1998 e 2025 (INPE/Queimadas, 2025), atingindo valores máximos e mínimos em 2007 (393.915 detecções) e 2000 (101.530 detecções), respectivamente. Entre os meses com os maiores números, observou-se uma mudança nos padrões sazonais ao longo deste século. Os picos históricos de ocorrência de incêndios ocorrem tipicamente entre junho e dezembro. Os anos entre 2003 e 2007 apresentaram os maiores valores de toda a série histórica desde 1998, coincidindo com um período de altas taxas de desmatamento. Anualmente, entre fevereiro e maio, também ocorre um pico na ocorrência de incêndios, cerca de 10 vezes menor do que os observados entre junho e dezembro. Esse pico está relacionado a eventos de incêndios detectados acima do Equador durante a estação seca nessa região. Os valores máximos registrados em toda a série histórica para essa região ocorreram nos últimos cinco anos (INPE/Queimadas, 2025). Mudanças no padrão de incêndios no território nacional, como as relatadas acima, têm sido observadas em todo o país. Por exemplo, uma avaliação dos valores médios mensais de maio ao longo da série histórica (1998-2025) revelou que, desde 2020, esse mês teve mais de 4.000 focos de incêndio, um limite anteriormente superado apenas entre 2003 e 2007 e novamente em 2010, com o recorde histórico sendo estabelecido em 2022. Houve também um aumento de 25% no número de focos de incêndio para o mês médio de fevereiro nos últimos cinco anos, em comparação com a média histórica entre 1999 e 2019. O aumento nas detecções de focos de incêndio nos primeiros meses do ano não ocorreu às custas de uma diminuição nas ocorrências nos meses mais críticos. Os valores médios de setembro e outubro, em relação às médias de longo prazo, ficaram dentro de uma variação de 10%, o que é considerado alto. Esse aumento nos incêndios no início do ano indica uma intensificação dos padrões de incêndio associados ao uso da terra, desmatamento e se-

cas recentes, particularmente no Estado de Roraima. O impacto dos focos de incêndio geralmente é revelado pela análise de dados sobre áreas queimadas. O produto da área queimada produzido pelo MapBiomas (Alencar et al., 2020) indica a extensão da área afetada por eventos de incêndio. Com base nesses dados, estima-se que aproximadamente 24% do território nacional tenha sido afetado por incêndios pelo menos uma vez nos últimos 40 anos, com uma média de 18,5 milhões de hectares queimados por ano (MapBiomas fire, 2025). Entre 1985 e 2024, estima-se que 69,5% da área queimada ocorreu em regiões ocupadas por vegetação nativa, com aproximadamente 11% em florestas. Portanto, esses incêndios podem ser diretamente categorizados como incêndios florestais antropogênicos, visto que incêndios nesse tipo de cobertura vegetal são praticamente inexistentes ou raros nesses ecossistemas.

Na Amazônia, os incêndios florestais são amplificados em anos de seca e temperaturas extremas, e a extensão das florestas afetadas pelo fogo vem aumentando a cada evento de seca. Silva Júnior et al. (2019) estimaram um total de 41.378 km² de área queimada durante a seca amazônica de 2010, dominada por incêndios em terras produtivas (68%; 28.161 km²), com 12% (5.032 km²) dos incêndios ocorrendo em áreas florestais. Esses números representaram um aumento simultâneo na área queimada de 168% em terras produtivas, 73% na vegetação não florestal e 91% na cobertura florestal em comparação com a média entre 2006 e 2016. Durante as secas de 2015 e 2016, foram observadas áreas queimadas de 20.049 km² e 16.994 km², respectivamente. Desse total, 55% (10.944 km²) e 39% (6.568 km²) da área queimada foram registradas em terras produtivas nesses dois anos, respectivamente. No entanto, as áreas florestais afetadas pelo fogo representaram 20% (3.993 km²) e 31% (5.253 km²) em 2015 e 2016, respectivamente, superando os percentuais de todos os outros anos analisados. Esses números representam um aumento simultâneo de 51% e 99% nas florestas queimadas em 2015 e 2016, respectivamente, em comparação com a média do período.

A seca de 2023 e 2024, que afetou aproximadamente 59% do território nacional (CEMADEN 2024), trouxe novos recordes de florestas queimadas. Um diagnóstico fornecido pelo MapBiomas Fogo (Mapbiomas, 2025) revelou que, em 2024, 30 milhões de hectares foram afetados por incêndios, representando um aumento de 62% em relação à média anual, considerando estimativas desde 1985. Os biomas Amazônia e Mata Atlântica estabeleceram recordes históricos nesses anos, com aumentos de

117% e 261% nas áreas afetadas, respectivamente. Os biomas Pantanal e Cerrado também apresentaram alta incidência de incêndios: um aumento de 157% e 10%, respectivamente, foi observado. A situação foi apenas branda nos biomas Pampa e Caatinga, com redução de 48% e 16% na área afetada por incêndios, respectivamente (Mapbiomas, 2025). Ainda referente aos dados do MapBiomas, em 2024, 72,7% da área queimada ocorreu em vegetação nativa, compreendendo 25,9% formações florestais, 20,7% formações savânicas, 13,9% planícies de inundação e 12,2% formações campestres. As formações florestais foram a classe de cobertura do solo mais afetada pelo fogo, com 7,7 milhões de hectares (Mha), 287% acima da média histórica.

O relatório sobre incêndios florestais, abrangendo o período de janeiro de 2023 a fevereiro de 2024 (Jones et al., 2024), mostrou que esse período foi bastante intenso ao avaliar diferentes métricas associadas aos incêndios no Brasil. Os estados do Amapá e Amazonas tiveram a maior e a segunda maior área queimada desde 2002, respectivamente. Os estados de Roraima e Amazonas tiveram o segundo e o terceiro piores anos em termos de emissões de carbono, respectivamente. Os estados do Amazonas, Roraima e Amapá tiveram o primeiro, segundo e terceiro maior número de incêndios, com Amapá e Rondônia tendo a primeira e a segunda maiores taxas de propagação de incêndios em toda a série histórica, respectivamente. Uma análise de atribuição causal revelou que as anomalias na área queimada na Amazônia Ocidental durante a temporada de incêndios de 2023-2024 foram 50% maiores do que o esperado devido às mudanças climáticas antropogênicas. O novo relatório sobre incêndios florestais cobrindo o período de março de 2024 a fevereiro de 2025 (Kelly et al., 2025) pinta um quadro ainda mais crítico. Os estados do Pará e Amazonas têm um recorde histórico de áreas queimadas desde 2002. Mato Grosso do Sul teve a segunda maior área queimada na série, Rondônia teve a terceira maior, e Mato Grosso e São Paulo tiveram a quarta maior área queimada na série histórica avaliada. Em termos de emissões de C por incêndios, Amazonas, São Paulo e Mato Grosso do Sul apresentaram valores recordes no período 2024-2025 em relação a toda a série de dados analisada. O Paraná teve o segundo pior ano em termos de emissões, e o Pará teve o quarto pior ano. Em termos de intensidade de incêndios, esse período foi o mais extremo nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio de Janeiro e Roraima, e o segundo pior ano para os estados do Amazonas e Goiás. Todos esses estados também estiveram

entre os cinco piores anos em termos de extensão e taxas de propagação de eventos de incêndio. Essas métricas relacionadas à ocorrência de incêndio enviam uma mensagem clara: nos períodos mais recentes da série histórica, pode-se observar que os incêndios estão produzindo uma área queimada maior, com eventos de incêndio mais quentes e propagação mais rápida em vários estados do território nacional, em comparação aos primeiros 18 anos deste século.

Na Amazônia brasileira, calculou-se que aproximadamente um terço das detecções ativas de incêndios entre 2003 e 2019 ocorreram a menos de 1 km de áreas desmatadas no mesmo ano, e um terço das áreas desmatadas em um determinado ano estavam localizadas a menos de 500 m de áreas desmatadas no ano anterior (Silveira et al., 2020). Além disso, na escala da bacia amazônica, 25% dos incêndios florestais ocorrem nos primeiros 120 metros da floresta em relação à área de contato com outros usos do solo, uma região conhecida como borda da floresta, resultando em aproximadamente 17% das bordas da floresta sendo afetadas pelo fogo (Lapola et al., 2023). De acordo com este estudo, 69% da área florestal queimada na bacia foi afetada por um único incêndio florestal. Esses incêndios têm uma série de impactos negativos, que vão desde a redução da biodiversidade da fauna e da flora e dos estoques de carbono, alteração do funcionamento da floresta, aumento das emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, até o aumento da vulnerabilidade das populações que dependem desses recursos florestais para fins de subsistência, econômicos, espirituais ou de bem-estar (Lapola et al., 2023). Quantificar a magnitude dos impactos negativos dos incêndios é um tanto complexo, pois as medidas de severidade do fogo, que são medidas diretamente em campo, são restritas a locais específicos e podem não ser representativas de todas as florestas, que variam em termos de estoques de carbono, diversidade de espécies, clima, estrutura da paisagem, solos e usos da terra.

A mortalidade de árvores no sub-bosque após incêndios varia espacialmente: os maiores níveis de mortalidade de árvores e as maiores perdas de biomassa foram registrados no estado brasileiro do Pará (Cochrane et al., 1999; Barlow et al., 2023). Efeitos menores foram registrados em regiões amazônicas mais secas (Brando et al., 2020), onde as árvores são protegidas por cascas mais espessas (Staver et al., 2020) e em regiões menos sazonais, onde a intensidade do fogo pode ser limitada pelo alto teor de umidade do combustível (Pontes et al., 2021). Para a região

sudeste da Amazônia, verificou-se que a frequência e a intensidade dos incêndios aumentaram significativamente a mortalidade, particularmente entre árvores pequenas, mas os impactos na estrutura e produtividade da floresta foram mais sutis. Por exemplo, a biomassa acima do solo diminuiu cerca de 13% em florestas expostas a dois incêndios em 2013 e 2016 (Maracahipes-Santos et al., 2025). Sabe-se também que o tempo decorrido desde a perturbação pode ser considerado um importante determinante dos estoques de carbono acima do solo. Quando florestas são queimadas, a recuperação dos estoques de carbono a partir do recrutamento e crescimento de árvores é compensada por altas taxas de mortalidade contínua de árvores (Berenguer et al., 2021, Barlow et al., 2003), de modo que a floresta queimada pode ser uma fonte líquida de emissões de carbono por até 7 anos após o incêndio e conter cerca de 25% menos carbono após 30 anos (Aragão et al., 2018, Silva et al., 2018). Os impactos negativos do fogo são ainda mais críticos quando o fogo ocorre duas ou mais vezes no mesmo local. Essa característica dos incêndios é chamada de recorrência e pode ser avaliada quantitativamente. Por exemplo, Barlow et al. (2008) demonstraram que áreas com alta recorrência podem sofrer perdas de mais de 80% do carbono acima do solo (Barlow et al., 2008). Estima-se que, na Amazônia, quase um terço da área queimada tenha sido queimada duas vezes (18%) ou três ou mais vezes (13%) (Map-biomas fogo, 2025). O fogo tem um efeito direto na riqueza e composição de espécies. A cobertura do dossel superior é mais afetada ao longo do tempo após o incêndio do que o sub-bosque. Essas mudanças estruturais também tendem a influenciar a composição das espécies de aves, que, mesmo após um período de 38 anos, não apresentou uma recuperação completa da comunidade de aves (Valentim et al., 2025).

No entanto, generalizações sobre os impactos negativos do fogo na diversidade de fisionomias florestais e seus habitats são limitadas. Por exemplo, Schöngart et al. (2024) especificam que, além das florestas ombrófilas, onde a maioria dos estudos de impacto do fogo são conduzidos, há áreas de florestas de várzea na bacia amazônica. Estas são divididas em dois grandes grupos: várzea, cobrindo uma área de aproximadamente 456.000 km², e igarapé, cobrindo uma área de 302.000 km². Entre as florestas de igarapés, existem dois tipos de floresta: aquelas expostas a águas pretas (~140.000 km²) e aquelas expostas a águas claras (162.000 km²). Atualmente, o pouco que se sabe sobre os impactos dos incêndios na vegetação de várzea está predominantemente relacionado a eventos

que afetaram as florestas de igarapés de águas pretas, que representam cerca de 15% das planícies de inundação da Amazônia. A maioria dos estudos se concentrou na região central da Amazônia. Flores et al. (2014) constataram que as florestas de igarapé-de-água-preta são extremamente sensíveis ao fogo, com mortalidade de árvores chegando a 91% (75-100%) e uma taxa de recuperação relativamente baixa para esse tipo de floresta. Resende et al. (2014) observaram efeitos mais brandos, porém ainda significativos. As florestas de igarapé-de-água-preta afetadas pelo fogo neste estudo apresentaram uma perda de 59% ($\pm 13\%$) de árvores. Para outras florestas de várzea da Amazônia, há falta de evidências científicas sobre a vulnerabilidade ao fogo, mas espera-se que a magnitude dos impactos seja semelhante à relatada até o momento.

Além disso, poucos estudos foram conduzidos sobre o impacto do fogo nas Campinaranas, que são formações vegetais que se desenvolvem em substratos de areia branca na Amazônia e cobrem uma área de aproximadamente 87.500 km² na região, com características e peculiaridades únicas dependendo de sua localização. No norte do estado do Acre, onde várias espécies de campinaranas são tradicionalmente utilizadas, foi quantificado que a densidade de indivíduos com potencial madeireiro na área não queimada do tipo florestal campinarana foi de 70 ± 25 indivíduos ha⁻¹, e com o impacto de um incêndio florestal, houve uma redução de 23% na densidade desses indivíduos. Para espécies com potencial não madeireiro, em áreas onde não houve incêndios, foi quantificada uma densidade de 67 ± 58 indivíduos ha⁻¹, e uma redução de 93% na densidade desses indivíduos após o incêndio (Costa et al., 2023). Esses resultados indicam uma vulnerabilidade exacerbada das campinarnas a incêndios, visto que grandes áreas dessa vegetação não possuem proteção legal (Acre, 2017).

De modo geral, dentre os diversos impactos negativos dos incêndios florestais, as emissões de carbono na atmosfera são consideradas as mais críticas em termos de contribuição para o agravamento da crise climática. Embora ainda existam diversas limitações, o arcabouço de conhecimento científico permite avaliações desse impacto, especialmente em florestas de Terra Firme. Com a redução do desmatamento, houve uma diminuição correspondente nas emissões decorrentes do desmatamento. No entanto, tem sido demonstrado que, mesmo com o padrão de desmatamento, durante anos de seca, a incidência de incêndios e suas respectivas emissões de carbono na atmosfera tendem a aumentar.

Em 2010, um ano seco, as emissões brutas de C devido aos incêndios foram 1,7 vezes maiores ($0,51 \pm 0,12$ Pg C ano⁻¹) do que durante o ano subsequente sem seca. Isso correspondeu a 57% das emissões globais em 2010, resultantes da mudança no uso da terra ($0,9 \pm 0,7$ Pg C) (Gatti et al., 2014; Gatti et al., 2023). Estima-se que os incêndios florestais na Amazônia brasileira contribuam para uma emissão bruta anual média de 454 ± 496 Tg CO₂ ano⁻¹ (2003-2015), ou $31 \pm 21\%$ da emissão estimada do desmatamento (Aragão et al., 2018). Esses estudos sugerem que a região amazônica está entrando em uma nova fase de mudança no uso e cobertura da terra, na qual uma dissociação entre as emissões de carbono relacionadas ao fogo e ao desmatamento, impulsionada por secas recorrentes no século XXI, pode comprometer as conquistas nacionais na redução das emissões do desmatamento.

A IMPORTÂNCIA DAS FLORESTAS SECUNDÁRIAS PARA A MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA DEGRADAÇÃO

Apesar da perda florestal contínua no Brasil em taxas variáveis, as florestas secundárias estão se regenerando em áreas onde as florestas primárias foram completamente removidas por atividades humanas. As florestas secundárias são distintas das florestas primárias e diferem significativamente em termos de estágio sucessional, composição de espécies, estrutura e funcionalidade. Essas florestas são essenciais para mitigar as emissões de carbono provenientes do desmatamento e da degradação, aliviar os impactos das mudanças climáticas e restaurar a diversidade e as funções dos ecossistemas. As florestas secundárias são altamente produtivas, com uma taxa média de absorção líquida de carbono, para regiões neotropicais em florestas com menos de 20 anos, variando de $2,95 \pm 0,4$ a $3,05 \pm 0,5$ Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, que é de 11 a 20 vezes maior do que a das florestas primárias (Heinrich et al., 2020). Uma análise de 1.500 parcelas na América do Sul e Central revelou que, em geral, as florestas tropicais secundárias levaram em média 66 anos para atingir 90% da CAA das florestas primárias (Poorter et al., 2016).

O crescimento dessas florestas secundárias em paisagens fragmentadas e degradadas pode minimizar a perda de biodiversidade, permitindo que as espécies se movam ao longo dos corredores florestais e, assim, mantendo o fluxo genético na paisagem. A riqueza de espécies

e a similaridade composicional das florestas secundárias atingem, em média, 88% e 85%, respectivamente, dos valores encontrados em florestas primárias após 40 anos (Lennox et al., 2018). Em fragmentos de Mata Atlântica, o crescimento da floresta secundária recuperou aproximadamente 76% da diversidade taxonômica, 84% da diversidade filogenética e 96% da diversidade funcional ao longo de um período de 30 anos após o abandono. Além disso, a recuperação dessas florestas, em comparação com as florestas primárias, permitiu a recuperação de 65% e 30% das espécies ameaçadas e endêmicas, respectivamente (Matos et al., 2020). Considerando esses benefícios, o manejo da regeneração natural pode ser a estratégia mais eficaz para promover a restauração florestal em larga escala (Crouzelles et al., 2017, 2020). Entre 1986 e 2018, estima-se que um total de 262.791 km² de florestas secundárias foram recuperados no Brasil (Silva Júnior et al., 2020b). Essa área corresponde a 59% da área de floresta primária desmatada na Amazônia brasileira entre 1988 e 2019. A distribuição espacial por bioma dessas florestas em regeneração ocorre em maior proporção, aproximadamente 57% (148.764 km²) no bioma Amazônia, seguida pela Mata Atlântica, contribuindo com 26,72% (70.218 km²), Cerrado com 12,98% (34.115 km²), Caatinga com cerca de 2,32% (6.106 km²), Pampa com 0,94% (2.469 km²) e Pantanal, contribuindo com 0,43% (1.120 km²). Com base em dados de 2018, estimou-se que a distribuição etária das florestas secundárias nos biomas Caatinga e Mata Atlântica apresentou florestas secundárias mais jovens, com mais de 50% das florestas com idades entre 1 e 6 anos, e florestas mais velhas, com mais de 50% das florestas com idades entre 1 e 12 anos, respectivamente. A estratificação etária das florestas secundárias para a Amazônia para o ano de 2023 indica que a maioria dessas florestas é jovem, com cerca de 50% com menos de 11 anos e 90% com menos de 29 anos (Silva Júnior et al., 2020b).

No contexto da emergência climática, onde as florestas secundárias são consideradas uma solução baseada na natureza, sua característica mais importante é o seu potencial de sequestro de carbono. Entre 1986 e 2018, Silva Junior et al. (2020b) estimaram que as florestas secundárias foram responsáveis pela absorção de 835 Tg C durante os 33 anos analisados, ou 25,30 Tg C ano⁻¹. Enquanto o bioma Pantanal teve a menor contribuição, respondendo por 0,42% da absorção de carbono do Brasil e armazenando 3 Tg C em suas florestas secundárias entre 1986 e 2018, o bioma Amazônia teve a maior contribuição, respondendo por

52,21% da absorção das florestas secundárias brasileiras. Esta estimativa foi baseada em uma taxa de absorção líquida linear de carbono de $3,05 \pm 0,19 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, que, apesar de ser uma simplificação metodológica, é baseada em um valor médio para florestas secundárias neotropicais durante os primeiros 20 anos de sucessão florestal (Pooter et al., 2016; Fearnside et al., 1996; Heinrich et al., 2023). Com base nesta estimativa de Silva-Júnior et al. (2020b) e considerando o período entre 1988 e 2018, a absorção estimada pelas florestas secundárias no Brasil (784 Tg C) compensa apenas 12% das emissões de carbono do desmatamento somente na Amazônia brasileira (6.740 Tg C). Vale ressaltar que há considerável variabilidade espacial nas taxas de crescimento e permanência do carbono armazenado entre as regiões, devido às diferenças de clima, solo, uso anterior da terra e exposição a perturbações como incêndios. Heinrich et al. (2021) demonstraram que, em geral, as florestas secundárias no noroeste da Amazônia se regeneram até duas vezes mais rápido ($3,0 \pm 1,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em comparação com as regiões no leste da bacia ($1,3 \pm 0,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Os impactos de distúrbios como incêndios e desmatamentos repetidos antes do início da regeneração reduzem o crescimento dessas florestas em 20% no noroeste da Amazônia ($2,4 \pm 0,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), em comparação com 55% no sudeste ($0,8 \pm 0,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) da bacia. Concentrando-se apenas em 2017, os autores descobriram que o carbono total armazenado nas florestas secundárias da Amazônia naquele ano foi de 293,7 Tg C. Se essas florestas tivessem se regenerado sem qualquer perturbação, poderiam ter atingido 319,7 Tg C em 2017. No entanto, as perturbações causaram uma redução de 8% na quantidade potencial total de carbono que poderia ser restaurada desde 1985. Considerando um cenário em que todas as florestas secundárias existentes em 2017 tivessem sido preservadas, estimou-se que até 2030, $\sim 19,0 \pm 2,4 \text{ Tg C ano}^{-1}$ poderiam ser removidas da atmosfera, um valor que corresponde a aproximadamente 5,5% da meta de redução de emissões líquidas do Brasil para 2030. Portanto, promover o crescimento de áreas de florestas secundárias e garantir sua permanência é uma solução eficiente baseada na natureza para mitigar as mudanças climáticas, contribuindo para a neutralização das emissões do desmatamento e da degradação e fornecendo serviços ecossistêmicos (Silva Júnior et al., 2020b; Matos et al., 2020; Heinrich et al., 2021; Baker et al., 2025).

A restauração e o reflorestamento de 12 milhões de hectares de florestas secundárias foram uma das principais estratégias de mitigação

para reduzir as emissões de carbono dentro da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil (MMA, 2016). Esse instrumento precisa ser acompanhado de incentivos políticos e econômicos, necessários para impulsionar a transição do atual modelo de produção, baseado na degradação e exploração ambiental extensiva, para um modelo alternativo que promova o surgimento de novas florestas secundárias, bem como, e sobretudo, a conservação e a manutenção das florestas remanescentes. Esse desafio é único no Brasil, visto que atualmente não existem modelos de desenvolvimento econômico de países desenvolvidos que tenham se desenvolvido com sucesso em consonância com a integridade ambiental. No entanto, com o conhecimento atualmente disponível, tanto em relação à crise climática quanto à importância das florestas e sua biodiversidade para a economia do país e para o clima global, um novo caminho nos aguarda para ser descoberto e implementado. Aumentar a área de regeneração natural em larga escala, em áreas desmatadas, pode reverter, em parte, de forma eficiente, as perdas de carbono, biodiversidade e serviços ecossistêmicos decorrentes do desmatamento e degradação contínuos da vegetação nativa brasileira. Esses resultados reforçam a necessidade de restaurar grandes áreas de floresta secundária em todos os biomas brasileiros. No entanto, a restauração não substitui a conservação da vegetação nativa.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA NO BRASIL PARA APOIAR AÇÕES DE REDUÇÃO DA DEGRADAÇÃO

A base científica e tecnológica para o monitoramento em larga escala de impactos ambientais evoluiu desde a década de 1970, com a expansão das atividades do Projeto de Sensoriamento Remoto (SERE) do INPE. O Brasil foi o terceiro país do mundo a receber imagens do satélite Landsat-1, o que permitiu avançar na formação de recursos humanos especializados para o desenvolvimento científico e a construção dos sistemas de monitoramento ambiental atualmente em operação. Na década de 1980, a consolidação da experiência em análise de dados de satélites, conhecida como sensoriamento remoto, tornou-se evidente quando o INPE lançou o projeto Detecção de Incêndios, que utilizou imagens de satélites de órbita polar da série NOAA/Advanced Tiros-N, e o projeto Avaliação da Cobertura Florestal Amazônica, com dados a partir de 1988. Enquanto o sis-

tema de detecção de incêndios fornece abertamente vários dados sobre incêndios no Brasil e na América do Sul, o Projeto de Desmatamento da Amazônia Legal (PRODES), que utiliza imagens de satélites de observação da Terra, fornece um inventário anual do corte raso na floresta, onde as árvores são completamente removidas, consolidando o desmatamento.

Um avanço significativo nos sistemas ocorreu em 2004, quando o INPE lançou o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Quase Real (DETER) para produzir alertas diários de mudanças na cobertura florestal. Estes não apenas indicam áreas sofrendo remoção da cobertura florestal por corte raso, usando o mesmo conceito de desmatamento empregado pelo PRODES, mas também mapeiam áreas em degradação (exploração madeireira, mineração, queimadas e outras formas de degradação do dossel florestal). Esses alertas visam auxiliar os órgãos de fiscalização no planejamento de ações durante o processo em questão, evitando assim que os danos ambientais se tornem permanentes e aumentando a probabilidade de responsabilizar os envolvidos em tais crimes. O sistema DETER evoluiu para uma resolução espacial de 64 m, em comparação com os 250 m utilizados anteriormente, graças à operação bem-sucedida dos satélites CBERS-4 em 2014, CBERS-4A em 2019 e Amazônia-1 em 2021, quando o INPE passou a contar com imagens do sensor WFI. Todas as informações geradas por essas plataformas estão disponíveis na plataforma Terra Brasilis para toda a sociedade, que tem acesso a todos os dados em «tempo quase real». Essas informações formam a Base de Informações Georreferenciadas (BIG), também liderada pelo INPE, que avança na estruturação de uma base unificada para a disseminação de produtos de satélites por meio de plataformas de livre acesso à sociedade.

Os satélites têm sido fundamentais há décadas no combate ao desmatamento, à degradação florestal e aos incêndios florestais. Em 2025, novos satélites de parceiros internacionais, como o BIOMASS da Agência Espacial Europeia e o NISAR da NASA, foram lançados com sucesso e adicionarão informações importantes aos dados já produzidos no Brasil, aumentando a precisão da quantificação dos múltiplos impactos negativos aos quais as florestas estão expostas. Especificamente, estes permitirão uma avaliação detalhada da estrutura da vegetação, bem como a quantificação de vetores de perturbação como fogo, corte seletivo e outros. Avanços são esperados no campo da inteligência artificial, que melhorarão a precisão do mapeamento e da modelagem preditiva do risco de des-

matamento e degradação por fogo e exploração madeireira seletiva em nossos ecossistemas em diferentes escalas de tempo. Além disso, a modelagem climática por meio do desenvolvimento de modelos do sistema terrestre, especificamente o MONAN, liderado pelo INPE, permitirá projeções mais consistentes, tanto temporal quanto espacialmente, o que não apenas aprimorará as avaliações de como o clima amplificará os riscos às florestas brasileiras, mas também servirá como ponto de partida para estratégias de mitigação e adaptação em vários setores da sociedade e da economia nacional.

A solução para o problema da degradação florestal, especialmente aquela causada por incêndios, não é uma questão exclusivamente para o desenvolvimento da ciência e tecnologia nacionais. É claro que a ciência e a tecnologia devem ser usadas em conjunto com políticas públicas eficazes. Essa necessidade é ainda mais relevante tendo em vista a próxima 30ª Conferência das Partes (COP), a ser realizada no Brasil. Na última Conferência das Partes (COP29), o Brasil apresentou suas contribuições nacionalmente determinadas (NDC) para a redução das emissões de gases de efeito estufa. O progresso na redução do desmatamento (INPE-PRODES) para 6.000 km² por ano é uma conquista para a meta da NDC, pois contribui para quase 50% das emissões nacionais (SEEG, 2024). Esse marco exemplifica a integração da tecnologia com uma política voltada para a redução do desmatamento, conforme delineado no Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento (PPCDAm), que foi reestabelecido em 2023 pelo Decreto nº 11.367/2023. No entanto, o programa INPE/DETER (INPE-DETER) quantificou uma área de floresta degradada por fogo de 40.000 km² em 2024. A degradação pelo fogo aumenta as emissões por desmatamento em uma média de 30% a 50% (Aragão et al., 2018), potencialmente comprometendo o cumprimento das metas das NDCs. Certamente, essa situação pode ser revertida com tecnologias aliadas a políticas públicas urgentes, uma vez que o potencial aumento da frequência e da intensidade de futuras secas, associado às mudanças climáticas e às contínuas alterações na cobertura do solo, provavelmente catalisará um aumento na incidência de incêndios florestais se a gestão e a responsabilização dos diferentes aspectos que contribuem para sua ocorrência não avançarem. Esse arranjo futuro clima-cobertura do solo, já observado durante as últimas quatro grandes secas, aumentará os impactos negativos diretos sobre os serviços ecossistêmicos e, conseqüentemente, so-

bre a segurança hídrica, alimentar e energética, com efeitos diretos sobre a economia nacional.

O manejo sustentável dos vetores de degradação florestal no Brasil deve se basear em sólida base científica para quantificar e prever a magnitude, a extensão e os impactos da degradação, e propor soluções para o problema. O sucesso dessa ação depende do fluxo de informações entre a ciência e a sociedade, como o apoio à implementação da Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (Lei 14.944/2024), onde o alinhamento dos programas implementados pelo governo, iniciativa privada, sociedade e comunidades é fundamental para a mitigação dos incêndios florestais. As informações científicas geradas no país também devem subsidiar a efetiva aplicação e o monitoramento das Políticas Nacionais do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981), das Mudanças Climáticas (Lei 12.187/2009), da Biodiversidade (Decreto 4.339/2002), da Política Nacional de Educação Ambiental (Lei 9.795/1999) e do Pagamento por Serviços Ambientais (Lei 14.119/2021), além de garantir a eficiência das ações de redução das emissões de gases de efeito estufa, no contexto das contribuições nacionalmente determinadas (NDCs) do Brasil e do desenvolvimento sustentável nacional.

CONCLUSÕES

Neste capítulo, apresentamos as principais causas climáticas e antropogênicas da degradação florestal, que ameaçam a integridade das florestas brasileiras. Também exploramos dados que demonstram a capacidade técnica e científica do país para apoiar e liderar ações de mitigação e adaptação no combate global às mudanças climáticas. Investimentos na conservação da vegetação nativa, por meio de iniciativas de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD+) e créditos de carbono, aliados a iniciativas de promoção da regeneração natural e ações de restauração florestal, no contexto do pagamento por serviços ambientais, constituem oportunidades reais a serem implementadas como estratégias de mitigação das mudanças climáticas. Para tanto, é fundamental a utilização de ciência e tecnologia de ponta para consolidar a base científica e a interface ciência-política-sociedade, bem como para apoiar os processos envolvidos na gestão ambiental dos biomas brasileiros. Esse desafio é um dos mais importantes da atualidade, com avanços

significativos em políticas públicas e em ciência e tecnologia, como o país já demonstrou com suas capacidades e ações no passado.

Prevenir o desmatamento continua sendo um objetivo fundamental para estabilizar o sistema climático, preservar a biodiversidade e garantir o desenvolvimento sustentável. O desmatamento é, por si só, um dos principais causadores das emissões de gases de efeito estufa e da perda de biodiversidade, além de ser um fator de diversas formas de degradação, considerando que a integridade da bacia depende da manutenção da cobertura florestal. A prevenção da degradação florestal também se beneficiará das condições necessárias para conter o desmatamento, como o fortalecimento da posse da terra, o fornecimento de crédito com foco ambiental e a oferta de alternativas sustentáveis de renda e subsistência que possam mitigar as desigualdades sociais. No entanto, é evidente que as ações tomadas para prevenir o desmatamento não são suficientes para prevenir a degradação florestal e devem ser apoiadas por outras intervenções, como investimentos em larga escala e treinamento para a transição para uma produção agrícola sem uso de fogo, técnicas de monitoramento e responsabilização para impedir a exploração madeireira ilegal e a promoção e o apoio aos mercados da bioeconomia como uma das alternativas para o desenvolvimento sustentável. Além disso, iniciativas para conter a degradação e estimular a restauração originadas no setor privado devem ser incentivadas por políticas públicas, como demonstrado pelos esforços para prevenir o desmatamento no setor de produção de soja na Amazônia. Todas essas ações serão beneficiadas por melhorias no monitoramento e na previsão da degradação das florestas tropicais.

REFERÊNCIAS

Acre, Governo do Estado do Acre; Secretaria de Estado de Planejamento; Secretaria de Estado de Meio Ambiente; Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre. Acre Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre: Fase II (Escala 1:250000), 2nd ed.; Secretaria de Estado de Meio Ambiente: Rio Branco, Brazil, 2010; ISBN 978-85-60678-00-6.

Alencar, Ane, *et al.* «Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the google earth engine platform.» *Remote Sensing* 12.6 (2020): 924.

Anderson, Liana Oighenstein, *et al.* «Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts.» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373.1760 (2018): 20170411.

Aragão, Luiz Eduardo OC, *et al.* «Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts.» *Geophysical Research Letters* 34.7 (2007).

Aragão, L. E. O. C., *et al.* «Above-and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils.» *Biogeosciences* 6.12 (2009): 2759-2778.

Barbosa, Maria Lucia F, *et al.* «Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal.» *Global Ecology and Biogeography* 31.10 (2022): 1960-1975.

Barichivich, Jonathan, *et al.* «Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation.» *Science advances* 4.9 (2018): eaat8785.

Barlow, Jos, *et al.* «Large tree mortality and the decline of forest biomass following Amazonian wildfires.» *Ecology letters* 6.1 (2003): 6-8.

Barlow, Jos, and Carlos A. Peres. «Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest.» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363.1498 (2008): 1787-1794.

Barni, Paulo Eduardo, *et al.* «Edge Effects in the Amazon Rainforest in Brazil's Roraima State.» *Forests* 16.8 (2025): 1322.

Bennett, Amy C., *et al.* «Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly.» *Nature Climate Change* 13.9 (2023): 967-974.

Berenguer, Erika, *et al.* «A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests.» *Global change biology* 20.12 (2014): 3713-3726.

Berenguer, Erika, *et al.* «Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests.» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.30 (2021): e2019377118.

Brando, Paulo M., *et al.* «Legacies of multiple disturbances on fruit and seed patterns in Amazonia: Implications for forest functional traits.» *Ecosphere* 15.2 (2024): e4780.

Brando, Paulo M., *et al.* «The gathering firestorm in southern Amazonia.» *Science advances* 6.2 (2020): eaay1632.

Bullock, Eric L., *et al.* «Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon.» *Global Change Biology* 26.5 (2020): 2956-2969.

Camilotti, Vagner Luis, *et al.* «The importance of Forest extractive resources for income generation and subsistence among Caboclos and colonists in the Brazilian Amazon.» *Human Ecology* 48.1 (2020): 17-31.

CEMADEN, 2024. Nota Técnica. Nº 679/2024/SEI-CEMADEN. Disponível em: <http://bit.ly/3KlgoLy>

Cochrane, Mark A., *et al.* «Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests.» *Science* 284.5421 (1999): 1832-1835.

Costa, Jessica Gomes, *et al.* «Forest Degradation in the Southwest Brazilian Amazon: Impact on Tree Species of Economic Interest and Traditional Use.» *Fire* 6.6 (2023): 234.

Costa, Flavia RC, *et al.* «The other side of tropical forest drought: do shallow water table regions of Amazonia act as larg-scale hydrological refugia from drought?.» *New Phytologist* 237.3 (2023): 714-733.

Cunha, Ana Paula MA, *et al.* «Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019.» *Atmosphere* 10.11 (2019): 642.

Crouzeilles, Renato, *et al.* «Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests.» *Science advances* 3.11 (2017): e1701345.

Crouzeilles, Renato, *et al.* «Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration.» *Conservation letters* 13.3 (2020): e12709.

Espinoza, Jhan-Carlo, *et al.* «The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features.» *Scientific Reports* 14.1 (2024): 8107.

Esteban, Erick JL, *et al.* «The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest.» *New Phytologist* 229.4 (2021): 1995-2006.

Esquivel-Muelbert, Adriane, *et al.* «Compositional response of Amazon forests to climate change.» *Global change biology* 25.1 (2019): 39-56.

Fearnside, Philip M. «Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest.» *Forest ecology and management* 80.1-3 (1996): 21-34.

Feldpausch, T. R., *et al.* «Amazon forest response to repeated droughts.» *Global Biogeochemical Cycles* 30.7 (2016): 964-982.

Flores, Bernardo M., Maria-Teresa F. Piedade, and Bruce W. Nelson. «Fire disturbance in Amazonian blackwater floodplain forests.» *Plant Ecology & Diversity* 7.1-2 (2014): 319-327.

Flores, Bernardo M., *et al.* «Critical transitions in the Amazon forest system.» *Nature* 626.7999 (2024): 555-564.

Gatti, L. V., *et al.* «Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements.» *Nature* 506.7486 (2014): 76-80.

Gatti, Luciana V., *et al.* «Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement.» *Nature* 621.7978 (2023): 318-323.

Guedes, Betina J., *et al.* «Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraíba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome.» *Forest Ecology and Management* 465 (2020): 118095.

Heinrich, Viola HA, *et al.* «Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change.» *Nature communications* 12.1 (2021): 1785.

Heinrich, Viola HA, *et al.* «The carbon sink of secondary and degraded humid tropical forests.» *Nature* 615.7952 (2023): 436-442.

Hissa, Letícia de Barros Viana, *et al.* «Historical carbon fluxes in the expanding deforestation frontier of Southern Brazilian Amazonia (1985–2012).» *Regional Environmental Change* 18.1 (2018): 77-89.

Householder, John Ethan, *et al.* «One sixth of Amazonian tree diversity is dependent on river floodplains.» *Nature ecology & evolution* 8.5 (2024): 901-911.

INPE-Queimadas - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Banco de Dados de queimadas. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 22 de julho. 2025

INPE-PRODES - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. – Monitoramento Anual da Supressão da Vegetação Nativa – Amazônia/Cerrado/Pantanal/Caatinga/Mata Atlântica/Pampa. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>. Acesso em: 2 de setembro. 2025

Jiménez, Juan Carlos, *et al.* «Vegetation Warming and Greenness Decline across Amazonia during the Extreme Drought of 2023.» *Remote Sensing* 16.14 (2024): 2519.

Jones, Matthew W., *et al.* «State of wildfires 2023–2024.» *Earth System Science Data* 16.8 (2024): 3601-3685.

Kelley, Douglas I., *et al.* «State of Wildfires 2024–25.» *Earth System Science Data Discussions* 2025 (2025): 1-179.

Lapola, David M., *et al.* «The drivers and impacts of Amazon forest degradation.» *Science* 379.6630 (2023): eabp8622.

Laurance, William F., *et al.* «Biomass collapse in Amazonian forest fragments.» *Science* 278.5340 (1997): 1117-1118.

Laurance, William F., Heraldo L. Vasconcelos, and Thomas E. Lovejoy. «Forest loss and fragmentation in the Amazon: implications for wildlife conservation.» *Oryx* 34.1 (2000): 39-45.

Laurance, William F., *et al.* «The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation.» *Biological conservation* 144.1 (2011): 56-67.

- Lees, Alexander C., and Carlos A. Peres. «Rapid avifaunal collapse along the Amazonian deforestation frontier.» *Biological conservation* 133.2 (2006): 198-211.
- Lennox, Gareth D., *et al.* «Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests.» *Global Change Biology* 24.12 (2018): 5680-5694.
- Lima, Renato AF, *et al.* «The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot.» *Nature communications* 11.1 (2020): 6347.
- Maciel, Daniel A., *et al.* «Sentinel-1 data reveals unprecedented reduction of open water extent due to 2023-2024 drought in the central Amazon basin.» *Environmental Research Letters* 19.12 (2024): 124034.
- Magnago, Luiz Fernando Silva, *et al.* «Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments.» *Biodiversity and Conservation* 24.9 (2015): 2305-2318.
- Malhi, Yadvinder, *et al.* «The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots.» *Global change biology* 10.5 (2004): 563-591.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). REDD+ and Brazil's Nationally Determined Contribution. <http://redd.mma.gov.br/en/redd-and-brazil-s-ndc> (2016).
- MapBiomias Fogo, 2025, «40 anos de fogo nos biomas brasileiros: coleção 4 do Mapbiomas (1985 a 2024)», <https://bit.ly/46mR7ZW>, MapBiomias Data, V1
- Maracahipes-Santos, Leonardo, *et al.* «Amazonian forest resilience inferred from fire-induced changes in carbon stocks and tree diversity.» *Environmental Research Letters* (2025).
- Marengo, José A. «Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin.» *Theoretical and applied climatology* 78.1 (2004): 79-96.
- Marengo, Jose A., *et al.* «The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.» *Geophysical research letters* 38.12 (2011).
- Mercado, Lina M., *et al.* «Variations in Amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply.» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366.1582 (2011): 3316-3329.
- Mataveli, Guilherme AV, *et al.* «Relationship between biomass burning emissions and deforestation in Amazonia over the last two decades.» *Forests* 12.9 (2021): 1217.
- Matos, Fabio AR, *et al.* «Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits.» *Global Change Biology* 26.2 (2020): 509-522.

Meza-Elizalde, María C., and Dolores Armenteras-Pascual. «Edge influence on the microclimate and vegetation of fragments of a north Amazonian forest.» *Forest Ecology and Management* 498 (2021): 119546.

Morante-Filho, José Carlos, *et al.* «Birds in anthropogenic landscapes: the responses of ecological groups to forest loss in the Brazilian Atlantic Forest.» *PLoS One* 10.6 (2015): e0128923.

Numata, Izaya, *et al.* «Biomass collapse and carbon emissions from forest fragmentation in the Brazilian Amazon.» *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115.G3 (2010).

Numata, Izaya, and Mark A. Cochrane. «Forest fragmentation and its potential implications in the Brazilian Amazon between 2001 and 2010.» *Open Journal of Forestry* 2.4 (2012): 265-271. Pan, Yude, *et al.* «A large and persistent carbon sink in the world's forests.» *science* 333.6045 (2011): 988-993.

Numata, Izaya, *et al.* «Fire and edge effects in a fragmented tropical forest landscape in the southwestern Amazon.» *Forest Ecology and Management* 401 (2017): 135-146.

Nunes, Matheus Henrique, *et al.* «Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forests.» *Nature communications* 14.1 (2023): 8129.

Papastefanou, Phillip, *et al.* «Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: Assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators.» *Biogeosciences* 19.16 (2022): 3843-3861.

Penman, Jim, *et al.* «Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human-induced degradation of forests and devegetation of other vegetation types.» Hayama Kanagawa: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme-Technical Support Unit, available at <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp> (2003): 32.

Pereira, Cássio Alves, *et al.* «Restoring fire-degraded social forests via biocultural approaches: a key strategy to safeguard the Amazon legacy.» *Restoration Ecology* 31.8 (2023): e13976.

Pessôa, Ana Carolina M., *et al.* «Protected areas are effective on curbing fires in the Amazon.» *Ecological Economics* 214 (2023): 107983.

Phillips, Oliver L., *et al.* «Drought sensitivity of the Amazon rainforest.» *Science* 323.5919 (2009): 1344-1347.

Pontes-Lopes, Aline, *et al.* «Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet Central Amazonian forest.» *Proceedings of the Royal Society B* 288.1951 (2021): 20210094.

Poorter, Lourens, *et al.* «Biomass resilience of Neotropical secondary forests.» *Nature* 530.7589 (2016): 211-214.

- Pütz, Sandro, *et al.* «Long-term carbon loss in fragmented Neotropical forests.» *Nature communications* 5.1 (2014): 5037.
- Quesada, C. A., *et al.* «Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis.» *Biogeosciences* 7.5 (2010): 1515-1541.
- Resende, Angélica F., *et al.* «Fire damage in seasonally flooded and upland forests of the Central Amazon.» *Biotropica* 46.6 (2014): 643-646.
- Ribeiro, G. G., *et al.* «Attributing the 2015/2016 Amazon basin drought to anthropogenic influence.» *Climate Resilience and Sustainability* 1.1 (2022): e25.
- Rosan, Thais M., *et al.* «Fragmentation-driven divergent trends in burned area in Amazonia and Cerrado.» *Frontiers in Forests and Global Change* 5 (2022): 801408.
- Saatchi, Sassan, *et al.* «Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy.» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.2 (2013): 565-570.
- Schöngart, Jochen, *et al.* «Fate of floodplain forests in a changing Amazon.» *The future of Amazonian aquatic biota*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 163-222.
- SEEG, 2024. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima, acessado em 2 DE SETEMBRO DE 2025 – seeg.eco.br
- Silva, Camila VJ, *et al.* «Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics.» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373.1760 (2018): 20180043.
- Silva, Camila VJ, *et al.* «Estimating the multi-decadal carbon deficit of burned Amazonian forests.» *Environmental Research Letters* 15.11 (2020): 114023.
- Silva Junior, Celso HL, *et al.* «Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia.» *Forests* 9.6 (2018): 305.
- Silva Junior, Celso HL, *et al.* «Fire responses to the 2010 and 2015/2016 Amazonian droughts.» *Frontiers in Earth Science* 7 (2019): 97.
- Silva Junior, Celso HL, *et al.* «Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses.» *Science Advances* 6.40 (2020): eaaz8360.
- Silva Junior, Celso HL, *et al.* «Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil.» *Scientific data* 7.1 (2020b): 269.
- Silva-Junior, Celso HL, *et al.* «Forest fragmentation and fires in the eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil.» *Fire* 5.3 (2022): 77.
- Silveira, Marcus VF, *et al.* «Drivers of fire anomalies in the Brazilian Amazon: lessons learned from the 2019 fire crisis.» *Land* 9.12 (2020): 516.

SNIF. Sistema Nacional de Informações Florestais do Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: <https://bit.ly/4nf33CQ>. Acesso em: 22 de julho. 2025

SIRENE. Sistema de Registro Nacional de Emissões. Disponível em: <http://sirene.mctic.gov.br>. Acesso em: 22 de julho. 2025

Souza Jr, Carlos M., *et al.* «Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine.» *Remote Sensing* 12.17 (2020): 2735.

Souza, Carlos M., *et al.* «Amazon severe drought in 2023 triggered surface water loss.» *Environmental Research: Climate* 3.4 (2024): 041002.

Staver, Ann Carla, *et al.* «Thinner bark increases sensitivity of wetter Amazonian tropical forests to fire.» *Ecology letters* 23.1 (2020): 99-106.

Valentim, C., *et al.* «Fire Effects on Bird Communities From Seasonally Flooded Forests Along Amazonian Black Water Rivers of the Negro River Basin.» *Diversity and Distributions* 31.5 (2025): e70035.

Vedovato, Laura Barbosa, *et al.* «The extent of 2014 forest fragmentation in the Brazilian Amazon.» *Regional environmental change* 16.8 (2016): 2485-2490.

Villard, Marc-André, and Jean Paul Metzger. «Beyond the fragmentation debate: a conceptual model to predict when habitat configuration really matters.» *Journal of Applied Ecology* 51.2 (2014): 309-318.

Whyte, Kyle. «Too late for indigenous climate justice: Ecological and relational tipping points.» *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 11.1 (2020): e603.

Zhao, Maosheng, and Steven W. Running. «Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009.» *science* 329.5994 (2010): 940-943.

5. O PAPEL CENTRAL DA ÁGUA NA RESILIÊNCIA E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS

Suzana Maria Gico Lima Montenegro¹³, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes¹⁴, Dirceu Silveira Reis Junior¹⁵, Eduardo Mario Mendiondo¹⁶, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins¹⁷, Francisco de Assis Souza Filho¹⁷, Pedro Borges Chaffe¹⁸, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹⁹, Rosa Maria Formiga Johnsson²⁰, Saulo Aires de Souza²¹, Walter Collischonn¹⁹

INTRODUÇÃO

O ciclo Hidrológico compõe o mecanismo dinâmico mais ativo dos ecossistemas, exercendo papel integrador entre atmosfera, o solo, o subsolo e as águas de superfície. Assim, os efeitos potenciais de mudanças climáticas produzem impactos de ordem social, econômica e ambiental. A água, em particular os rios, é o verdadeiro termômetro da qualidade ambiental e os impactos inerentes ganham uma dimensão que requer uma

13 Agência Pernambucana de Água e Clima - APAC, Recife, PE.

14 Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR.

15 Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF.

16 Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP.

17 Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME, Fortaleza, CE.

18 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC.

19 Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS.

20 Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

21 Agência Nacional de Água - ANA, Brasília, DF

Autora correspondente: suzana.montenegro@apac.pe.gov.br

nova visão de planejamento, ações e interações, em especial com a Sociedade. Cabe destacar que, ao passo que a ciência do Clima clama por mitigação de emissões de gases de efeito estufa, a ciência da Água na superfície, estrategicamente, foca na defesa de estratégias de adaptação. Enquanto a mitigação eficiente das mudanças climáticas necessita de uma visão e acordo global, a adaptação depende do conhecimento local sobre a gestão da água.

Adicionalmente, a variabilidade hidrológica tem peculiaridades diferentes da variabilidade climática, apesar da natural integração entre ambas. Os ecossistemas se equilibram em ciclos até o limite da ação antrópica, que provoca impactos induzindo um novo componente às condições de variabilidade temporal e espacial que caracterizam processos hidrológicos. Essas mudanças geram incertezas com claros efeitos sobre estacionariedade, homogeneidade, independência e aleatoriedade de séries observacionais, afetando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Assim, enquanto o clima nos informa sobre possíveis mudanças nas chuvas e na evaporação, a gestão dos recursos hídricos requer principalmente compreender como a água é armazenada e transportada após chegar ao continente, o que depende das condições locais (características naturais das bacias hidrográficas) e também das modificações feitas pela sociedade, como o uso da terra e a construção de estruturas hidráulicas.

Neste contexto, os efeitos das mudanças climáticas e a intensificação de eventos extremos, combinados com as ações de ocupação inadequada de uso da terra, desmatamento sem planejamento para expansão de fronteiras agrícolas, falta de saneamento básico, atividades rurais insustentáveis, degradação ambiental de práticas inadequadas de mineração, entre outros fatores, resultam em desastres naturais de grande magnitude, com impactos sociais, econômicos e ambientais significativos, como mortes, destruição de infraestrutura e paralisação de atividades econômicas. Os impactos das mudanças climáticas já são sentidos na escala local, intensificando especialmente desastres relacionados a secas e cheias.

O Brasil abriga cerca de 12% da água doce superficial do planeta (ANA, 2022), mas essa disponibilidade é distribuída de forma desigual. Aproximadamente 80% das vazões médias anuais estão na Bacia Amazônica, onde vive menos de 5% da população nacional (ANA, 2022; IBGE, 2023). Regiões densamente povoadas, como o Sudeste, têm disponibilidade per capita bem abaixo da média nacional. Em áreas do semiárido, o

balanço hídrico tende a ser negativo, pois a recarga natural, limitada pela baixa precipitação e alta evapotranspiração, frequentemente é inferior à demanda, sobretudo em áreas de uso intensivo. Essas situações têm levado à redução de vazões ecológicas, à sobre-exploração de aquíferos e à degradação da qualidade da água.

Outros problemas de grande magnitude incluem a poluição difusa e pontual, a degradação de nascentes e matas ciliares e a baixa eficiência no uso da água. A agricultura responde por cerca de 70% das retiradas no país (ANA, 2021). Aproximadamente 45% do esgoto gerado não recebe tratamento adequado (SNIS, 2022), agravando a poluição dos corpos hídricos. O uso inadequado da terra e a supressão de vegetação nativa comprometem a infiltração, aumentam o escoamento superficial e reduzem a resiliência das bacias.

Além disso, eventos hidrológicos extremos se tornaram mais frequentes e intensos. Entre os episódios recentes de seca mais severos, o CEMADEN (2024) destaca: a seca prolongada no Nordeste (2012–2017); eventos no Sudeste (2014–2015, 2017–2018, 2023–2024); no Pantanal (2020–2024); e no Sul do Brasil (2020–2023). Crises hídricas urbanas, como a do Sistema Cantareira em 2014–2015, expuseram vulnerabilidades do abastecimento de metrópoles. A Amazônia registrou estiagens severas em 2005, 2010, 2015–2016, 2023–2024 (CEMADEN, 2024). No caso de inundações, podemos citar o megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro (2011), as cheias em Petrópolis (2022) e na Região Metropolitana do Recife (2022), além das inundações históricas do Rio Grande do Sul em 2024, que atingiram centenas de municípios e evidenciaram a gravidade crescente dos desastres associados às mudanças do clima no Brasil.

Essa combinação de pressões climáticas, ambientais e socioeconômicas exige uma governança das águas adaptativa, baseada em monitoramento, planejamento integrado e gestão de riscos (ANA, 2022; PBMC, 2022). O setor de Recursos Hídricos do Brasil possui uma vasta experiência acumulada, que vai além do domínio técnico e científico, abrangendo também a complexa interface dos processos hidrológicos com os aspectos legais e institucionais. Essa dimensão foi materializada de forma estruturante pela Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e consolidou princípios de descentralização, participação social e gestão integrada. A partir desse marco legal, o país avançou em uma abordagem multi e interdisciplinar, capaz de integrar conhecimento, governança e prática. Esse conjunto de competências torna

o Brasil uma referência em planejamento e gestão de recursos hídricos voltados à adaptação, ao desenvolvimento sustentável e à resiliência, tendo como missão oferecer elementos de suporte à decisão e subsídios consistentes para políticas de Estado com impacto concreto na sociedade.

Este capítulo apresenta um panorama dos impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica hidrológica no Brasil, articulando evidências científicas com práticas e desafios para a gestão de recursos hídricos. Destaca implicações para políticas públicas e explora estratégias de adaptação e resiliência voltadas para a segurança hídrica do país.

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL E SEGURANÇA HÍDRICA-CONTEXTUALIZAÇÃO

A gestão de Recursos Hídricos no Brasil iniciou de forma mais sistêmica com a Lei das Águas, Lei 9.433/1997, que estabelece a PNRH, com diretrizes, objetivos e instrumentos para a gestão da água no Brasil. e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), com o arcabouço institucional para a efetivação da Política. A lei busca garantir o uso múltiplo, racional e sustentável da água, assegurando sua disponibilidade para as presentes e futuras gerações. As diretrizes da PNRH preveem a gestão participativa, com a participação do poder público, dos usuários de água e da sociedade nas tomadas de decisão.

A Lei das Águas estabeleceu como fundamento o respeito aos usos múltiplos e como prioridade o abastecimento humano e dessedentação animal em casos de escassez. O acompanhamento da evolução da gestão dos recursos hídricos em escala nacional é feito por meio da publicação do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos, que a cada quatro anos faz um balanço da implementação dos instrumentos de gestão, dos avanços institucionais do Sistema e da conjuntura dos recursos hídricos no País. Ao longo desse tempo, desde a criação das bases da política, muito se evoluiu a nível federal e nos estados, e com criação de mecanismos regionais específicos para lidar com potenciais situação de conflito pelo uso da água, como a alocação negociada de água no Nordeste. Também ao longo desses últimos anos, além dos desafios de consolidação da política e do sistema de gerenciamento, surgiram agendas mundiais que se conectam à questão da água e do clima.

Construída de forma participativa pelas experiências acumuladas desde a edição do Relatório Nosso Futuro Comum (ONU, 1991), a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, editada pela Organização das Nações Unidas em setembro de 2015, consolida o que há de mais avançado em sustentabilidade, fixando 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a serem concretizados por países desenvolvidos e em desenvolvimento. Dentro deste contexto, os últimos 25 anos de pesquisas, avanços e ferramentas tecnológicas alertaram para os impactos das mudanças climáticas.

Em outra frente, dentre várias definições propostas (Vörösmarty et al., 2018; Singh, 2017; UN, 2015, Cook e Bakker, 2012), o conceito de segurança hídrica vai além do mero equilíbrio entre a disponibilidade hídrica e demanda hídrica, tendo como denominador comum a disponibilidade e o acesso a quantidade e qualidade de água adequadas para a população e as atividades econômicas, além de um nível aceitável de risco devido aos impactos hidrometeorológicos extremos e à deterioração ambiental (Moura et al, 2020; Arreguin-Cortes et al., 2019; Jepson et al, 2017; Lall et al., 2017).

O conceito de ‘*water security*’ definido pela UNESCO é “the capacity of a population to safeguard access to adequate quantities of water of acceptable quality for sustaining human and ecosystem health on a watershed basis, and to ensure efficient protection of life and property against water related hazards – floods, landslides, land subsidence and droughts” (UNESCO-IHP, 2012); este conceito, portanto, coloca diversas dimensões em conjunto com a questão da água. Uma outra definição foi introduzida por Scott et al. (2013), incorporando a dimensão de resiliência: ‘Water security constitutes the sustainable availability of adequate quantities and qualities of water for resilient societies and ecosystems in the face of uncertain global change. A inclusão da dimensão da resiliência permite que a interativa e acoplada dinâmica sociedade-meio ambiente possa reverter um quadro de insegurança hídrica e adequar uma eventual interpretação do caráter não dinâmico da definição.

Beek e Arriens (2014) reforçam que a SH pode ser compreendida como o objetivo principal da Gestão Integrada de Recursos Hídricos, base para estratégias de adaptação para o enfrentamento de mudanças climáticas. Tais conceitos, porém, abrigam intensa complexidade quanto à sua aplicação prática, tendo em vista que os múltiplos usos e demandas por

água desafiam a capacidade dos sistemas de governança em oferecer respostas (Ribeiro e Formiga-Johnsson, 2018).

No Brasil, a segurança hídrica é um dos grandes desafios no cenário nacional, considerando suas múltiplas dimensões com relação aos aspectos econômicos, da sociedade, do clima e dos ecossistemas, além da infraestrutura hídrica.

Na esfera nacional, faz-se importante destacar o papel do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), lançado em 2019, fruto de parceria entre a ANA e o então Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). O PNSH se configura como iniciativa inédita no país e se alinha com os conceitos internacionais de SH, visando, entre outros, assegurar “um planejamento integrado e consistente de infraestrutura hídrica com natureza estratégica e relevância regional, até o horizonte de 2035, para redução dos impactos de secas e cheias” (ANA, 2019a). O PNSH concebeu o Índice de Segurança Hídrica (ISH), com o intuito de “retratar, com simplicidade e clareza, as diferentes dimensões da segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água” (ANA, 2019a).

Faz-se necessário, ainda, consolidar “base científica das mudanças ambientais globais; impactos, adaptação, vulnerabilidade, mitigação, e esforços de inovação tecnológica em modelos do sistema climático, geo-sensores e sistema de prevenção de desastres naturais”. O legado científico trouxe em evidência questão de extremos e os impactos para áreas prioritárias como: (i) Agricultura: no contexto de segurança alimentar; (ii) Saúde: no contexto de vulnerabilidade ambiental a espalhamento de doenças relacionadas ao clima e extremos climáticos; (iii) Desenvolvimento urbano: no contexto de extremos climáticos e desastres naturais, as dimensões humanas e seus impactos na infraestrutura física: moradia, rodovias, ferrovias, sistemas de água e esgoto, portos, transporte público, desenvolvimento de cidades mais resilientes e redução de risco de desastres naturais; (iv) Fontes alternativas de energias renováveis: no contexto de segurança energética e hídrica e (v) Tecnologia da informação e comunicação: no contexto de uma comunicação mais eficaz e abrangente do tema mudanças globais para a sociedade e governo, visando à definição de políticas públicas ambientais.

É dentro deste escopo que se destaca uma reflexão mais aprofundada sobre segurança hídrica e gestão adaptativa, conceitos perceptíveis, fortes, mas que requerem uma abordagem científica adequada. Entende-se a necessidade de uma reflexão e com o propósito de contribuir

para a instauração de um paradigma de inovação colaborativa no Brasil, estimulando o estreitamento das relações entre Universidade e Empresas Públicas e Privadas e a interação entre os mais diferentes componentes do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação - SNCTI, e se inserindo no contexto da PNRH Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Ela orienta o SNCTI a buscar soluções para os grandes desafios sociais, ambientais e econômicos, contribuindo para a construção das bases do desenvolvimento sustentável do País no contexto de gestão adaptativa.

AVANÇOS DO CONHECIMENTO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Mudanças no período histórico (distante e recente)

As mudanças no clima e no uso da terra e o aumento do consumo de água têm afetado os padrões de disponibilidade hídrica em todo o mundo. No hemisfério sul, por exemplo, essas mudanças resultaram em uma redução de 20% da disponibilidade hídrica média em 20 anos (Blöschl & Chaffe, 2023). Para entender como as mudanças na disponibilidade atmosférica (chuva e evaporação) são traduzidas em mudanças na parte terrestre do ciclo (armazenamento e vazão), é necessário a análise de base de dados hidrológicos consistentes e de características físicas de bacias hidrográficas (e.g., CAMELS-BR; Chagas et al., 2020) além de estudos de modelagem em diversas escalas que reportem a evidência de mudanças nos recursos hídricos (Borges & Chaffe, 2019). No Brasil, nas últimas quatro décadas, houve uma redução significativa das vazões em 40% do território, alinhada com a diminuição da chuva e também com o aumento do consumo para atividades humanas (Figura 1; Chagas et al., 2022a).

Porém, a mudança nas vazões nem sempre é alinhada às mudanças na disponibilidade hídrica média atmosférica. Em algumas regiões, houve um aumento significativo tanto das cheias quanto das secas em 30% do território – o dobro do que seria esperado normalmente. Essa intensificação de parte terrestre do ciclo é resultado não apenas da intensificação do regime de chuvas, mas também de alteração nos mecanismos de armazenamento e fluxo de água e nos usos para diversas atividades humanas (Chagas et al., 2022a). Apesar dos avanços recentes no enten-

dimento da hidrologia brasileira, ainda precisamos melhorar a atribuição dos principais mecanismos de mudanças nas cheias e secas e seus impactos (Paiva et al., 2020).

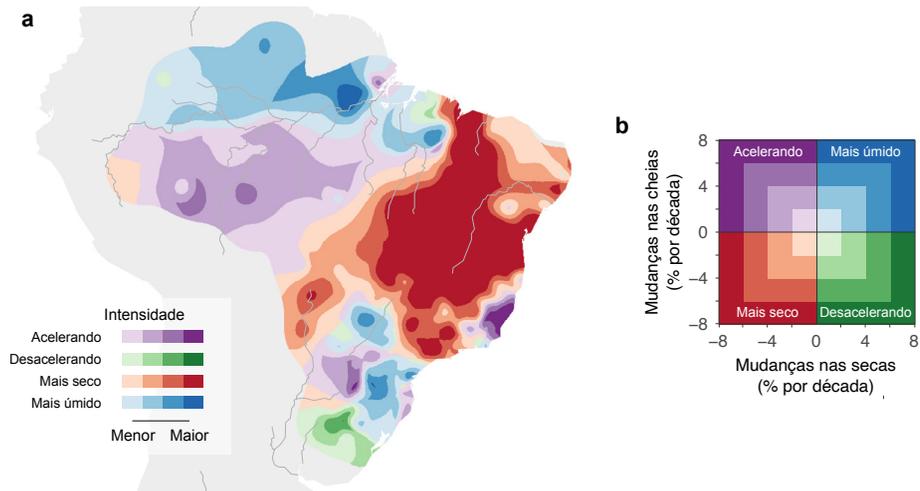


Figura 1: Distribuição espacial das mudanças no regime hidrológico do Brasil (Chagas et al., 2022).

Projeções das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos

Os estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima - IPCC (Arias et al., 2021) apresentam evidências de como as mudanças climáticas antropogênicas, causadas por emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultam no aquecimento da atmosfera e consequentemente, em alterações no regime de chuvas, na disponibilidade hídrica e na frequência e magnitude de eventos hidrológicos extremos. Neste sentido, as ações em busca de melhor segurança hídrica, gestão de riscos, resiliência a eventos hidrológicos extremos e adaptação à mudança climática requerem a avaliação de cenários e projeções acerca das condições hidrológicas futuras.

As mudanças climáticas podem causar alterações nas trocas de água entre a atmosfera e as bacias hidrográficas, como no volume total de chuva e sua distribuição sazonal, nas chuvas intensas e na evapotranspiração potencial. Entretanto, uma mesma alteração nessas variáveis pode impactar de formas diferentes a disponibilidade hídrica, as cheias e as

estiagens, a depender de controles locais exercidos pelas próprias bacias hidrográficas. Sendo assim, é necessário desenvolver projeções regionalizadas de potenciais alterações hidrológicas.

Inúmeros estudos têm sido desenvolvidos para compreender o impacto da mudança climática sobre os recursos hídricos brasileiros (e.g. Brêda et al. 2020, Brêda et al. 2023, Sorribas et al. 2016, Borges de Amorim et al. 2020, Petry et al. 2025, Paiva et al. 2024, Miranda et al. 2025). As projeções de alterações são normalmente desenvolvidas com base em resultados de modelos climáticos globais (GCMs) do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). São avaliadas variáveis como precipitação, temperatura, radiação solar, temperatura e umidade do ar. E são considerados possíveis cenários de emissões de gases de efeito estufa. Estas projeções climáticas são utilizadas para forçar modelos hidrológicos (e.g. Modelo de Grandes Bacias MGB), capazes de simular computacionalmente o ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas e rios. Por fim, são comparadas as projeções das condições hidrológicas das próximas décadas até o final do século com o histórico das décadas mais recentes.

Conforme as projeções atuais, espera-se que o volume de precipitação seja reduzido em grande parte do Brasil, incluindo a Amazônia, Cerrado e partes do nordeste. É esperado que a precipitação média aumente apenas na região Sul. Em função do aumento da temperatura do ar, a evapotranspiração potencial pode aumentar na maior parte do Brasil. Consequentemente, a disponibilidade hídrica e vazão média dos rios pode se reduzir na maior parte do Brasil, com alterações superando 50% na região amazônica.

Conforme as projeções, é esperado um aumento nas chuvas intensas de curta duração (por exemplo 1 dia) em praticamente todo o Brasil. O aumento nas chuvas intensas traz preocupações sobre a intensificação de cheias em bacias pequenas e alagamentos em áreas urbanas.

Em relação às cheias em rios de médio a grande porte, causadores de grandes inundações, são projetados aumentos nas vazões máximas na região sul, incluindo Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, e em partes do nordeste brasileiro. Pode ocorrer aumento na magnitude das vazões máximas superiores a 20%. Isto poderia causar acréscimos da ordem de 3 metros no nível d'água máximo em rios de regiões de serra (equivalente a 1 andar de uma edificação) e 50cm a 1 m em regiões planas. A área inundada e população afetada seria maior, podendo haver maior destruição por escoamento com maior velocidade e profundidade d'água.

Este cenário também ameaça a segurança da infraestrutura hídrica como reservatórios, estruturas de proteção contra cheias, sistemas de drenagem, rodovias, etc. Além disso, as cheias extremas podem se tornar até 5x mais frequentes. Isso significa que, por exemplo, um evento extremo que atualmente ocorre, em média, a cada 50 anos, no futuro poderia ocorrer, em média, a cada 10 anos, aumentando seus impactos negativos.

Por outro lado, é esperada a redução de cheias nos grandes rios do centro do Brasil e partes da Amazônia, causado pelo aumento das perdas d'água por evapotranspiração e redução da umidade do solo antecedente ao período de cheia. Como resultado, pode ocorrer a redução na extensão e frequência de inundação em áreas úmidas como a Amazônia e Pantanal, comprometendo a manutenção de importantes ecossistemas.

São esperadas alterações nas secas no território brasileiro. As projeções apontam para um prolongamento e intensificação da estação seca. Na maior parte das regiões do Brasil pode ocorrer aumento do número consecutivo de dias sem chuva, com destaque para a Amazônia, Nordeste e Centro-Oeste brasileiro. Nestas mesmas regiões são esperadas condições climáticas mais áridas.

As mudanças climáticas devem impactar as vazões mínimas dos rios, responsáveis por manter usos d'água e ecossistemas em períodos de estiagens. As vazões mínimas devem se reduzir na maior parte do Brasil, com alterações chegando a mais de 50% no sul da Amazônia e partes do Nordeste. Pode ocorrer aumento do grau de intermitência (rios totalmente secos) na região Nordeste. Além disso, espera-se um aumento da duração de períodos de escassez hídrica (até 2 meses) em que a vazão disponível no rio é menor que a atualmente utilizada como referência no planejamento dos usos d'água.

Águas subterrâneas

Naturalmente mais protegidas do que as águas superficiais, as águas subterrâneas apresentam características de maior resiliência à variabilidade climática, de forma geral, e também às mudanças climáticas, e também são mais protegidas de contaminação. No entanto, uma vez afetadas, tanto pelos aspectos de quantidade, como de qualidade, as águas subterrâneas são de mais difícil recuperação. A comunicação científica recente destaca esses aspectos (Schroeter et al. 2025). O estudo destaca que extremos hidroclimáticos, além de afetar a recarga das águas sub-

terrâneas, podem afetar sua qualidade. As alterações na recarga podem trazer impactos na diminuição capacidade de armazenamento nos aquíferos e disponibilidade de águas subterrâneas. O possível decréscimo de disponibilidade de águas superficiais em algumas regiões pelo efeito das mudanças climáticas pode também aumentar a pressão sobre as águas subterrâneas, que em condições de superexploração, e com condições de recarga alteradas, tende a interferir sobremaneira nas reservas exploráveis. Pesquisa realizada no Brasil ressalta essas questões, considerando projeções com cenários de alterações climáticas em horizontes futuros e os impactos na recarga natural de águas subterrâneas em diferentes regiões (Hirata et al., 2025).

Além disso, os aquíferos costeiros podem sofrer o impacto do aumento do nível do mar, combinado com superexploração e diminuição da recarga natural, e torná-los mais vulneráveis a ocorrência da intrusão salina, quando a água salgada passa a se misturar com água doce e alterar padrões de qualidade das águas subterrâneas.

Além disso, há estudos que alertam que rios brasileiros apresentam risco de redução de vazões devido ao fluxo da água em direção aos aquíferos (Uchôa et al., 2024), devido a condições climáticas e à intensa atividade agrícola. O estudo destaca como áreas especialmente críticas a bacia do rio São Francisco e a região do MATOPIBA, que abrange os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, ambas muito dependentes de águas subterrâneas para irrigação e abastecimento humano.

PLANEJAMENTO CLIMÁTICO NACIONAL E RECURSOS HÍDRICOS

O relatório “Aplicação da Ferramenta Water Resilience Tracker para o Planejamento Climático Nacional” (CEPAS et al, 2024), elaborado pela ANA em parceria com AGWA, BID e CEPAS/UFC, marca uma iniciativa pioneira no contexto brasileiro para avaliar de forma estruturada como a resiliência hídrica tem sido incorporada nos principais instrumentos de planejamento climático e setorial. A partir de uma metodologia inovadora de análise de conteúdo, com apoio de inteligência artificial, foram examinados oito documentos estratégicos: a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) do Brasil (o país apresentou sua primeira NDC em 2016 e atualizou em 2023, ambas analisadas no relatório), brasileira, o Plano Nacional de Adaptação (PNA) (BRASIL/MMA, 2016), o

Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL/MIDR, 2022), o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) (BRASIL/ANA, 2019), o Plano ABC+ (agropecuária) (BRASIL/MAPA, 2021), o PLANSAB (saneamento) (BRASIL/SNS-MIDR, 2019), o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) (BRASIL/MME, 2022) e o Plano Nacional de Defesa Civil (PNDC) (BRASIL/MIDR, 2024). A análise foi estruturada em quatro grandes dimensões: (i) presença da água nos planos climáticos; (ii) governança e planejamento adaptativo; (iii) conexões com setores usuários de água; e (iv) financiamento climático e implementação de projetos.

Os resultados revelam avanços importantes, especialmente no PNRH e no Plano ABC+, que se destacam por reconhecerem a água como elemento estratégico diante da mudança do clima. O PNRH incorpora cenários climáticos e diretrizes voltadas à gestão de riscos hídricos, sendo o documento mais bem avaliado na dimensão “água nos planos climáticos”. O PNA também apresenta contribuições relevantes, ao articular resiliência hídrica com segurança alimentar e abastecimento humano. Em contraste, planos como o PLANSAB e o PNDC demonstram baixa integração entre os desafios climáticos e as políticas de gestão da água, o que indica uma necessidade urgente de revisão e alinhamento.

Na dimensão de governança e planejamento adaptativo, o PNRH novamente se sobressai, apresentando marcos legais que favorecem abordagens flexíveis e interativas. O ABC+ também avança ao propor mecanismos de adaptação no setor agropecuário. Já o PNSH, apesar de sua importância estratégica, apresenta baixa articulação entre segurança hídrica e adaptação climática. A NDC brasileira, por sua vez, enfatiza compromissos internacionais, mas ainda carece de instrumentos internos eficazes para integrar a água em sua governança.

A análise das conexões com setores estratégicos revela que, embora o setor agropecuário (ABC+) apresente diretrizes importantes para o uso eficiente da água, sobretudo na irrigação, há fragilidades em outros setores. O PLANSAB e o PNSH, por exemplo, carecem de estratégias claras para a alocação de água em situações de escassez. Nesse ponto, destaca-se a importância de diretrizes que permitam ajustes dinâmicos nos direitos de uso da água, em função de variações sazonais e projeções climáticas.

A análise do setor energético, representado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), mostra avanços pontuais, mas ainda insuficientes. Embora o PDE reconheça os riscos climáticos para a segurança

energética e mencione a necessidade de diversificação da matriz, ele carece de uma abordagem mais estruturada para integrar a resiliência hídrica ao planejamento do setor elétrico. A dependência da matriz hidrelétrica exige maior articulação entre os cenários hidrológicos e energéticos, sobretudo frente à variabilidade crescente das vazões. Essa lacuna limita a capacidade do PDE de antecipar e responder a eventos críticos, como secas prolongadas e estiagens severas, que têm impacto direto na geração de energia e na segurança do sistema.

Na dimensão do financiamento climático, o relatório identifica uma lacuna expressiva na maior parte dos planos. Apenas o ABC+ e o PNRH mencionam, ainda que de forma incipiente, fontes como o Fundo Verde para o Clima e estratégias de mobilização de recursos por meio de parcerias público-privadas. Os demais planos não detalham mecanismos de financiamento ou critérios técnicos compatíveis com os requisitos das instituições financeiras internacionais. Essa ausência compromete a viabilidade de implementação das medidas propostas e dificulta o acesso a recursos disponíveis para adaptação climática. A análise destaca, portanto, a necessidade de desenvolver estratégias financeiras mais robustas, alinhadas com a realidade dos diferentes setores e regiões.

Transversalmente, o relatório aponta como críticas a fragmentação entre políticas públicas, a baixa articulação entre os níveis de governo e a insuficiente integração entre agendas — como água, agricultura, energia, saneamento e defesa civil. O *Water Resilience Tracker* evidencia também a importância de incorporar ferramentas baseadas em evidências, como projeções hidroclimáticas, sistemas de alerta e indicadores de vulnerabilidade, de forma mais sistemática e padronizada. Apenas alguns documentos, como o PNRH e o PNA, demonstram avanços nesse sentido. A maioria ainda carece de metodologias robustas para lidar com incertezas e orientar a tomada de decisão em ambientes de risco crescente.

Por fim, o relatório reforça o potencial da ferramenta *Water Resilience Tracker* como uma metodologia replicável para futuros ciclos de avaliação e aprimoramento contínuo das políticas públicas. A experiência revela a importância de posicionar a água como eixo estruturante do planejamento climático nacional, fortalecendo a governança orientada à resiliência e à adaptação sustentável. O estudo oferece um diagnóstico valioso e recomendações estratégicas para que o Brasil avance na construção de políticas climáticas e hídricas mais integradas, eficazes e preparadas para os desafios do século XXI.

DESAFIOS DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL PARA UMA AGENDA DE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA

As mudanças climáticas intensificam secas, enchentes e pressões sobre a qualidade e disponibilidade da água no Brasil, ampliando vulnerabilidades sociais e territoriais. Enfrentar esses desafios exige superar a dependência de soluções puramente infraestruturais e avançar para estratégias integradas que combinem governança, ciência, inovação e participação social. Este capítulo discute os principais desafios da gestão de recursos hídricos para uma agenda de adaptação e resiliência, organizados em cinco eixos: secas, chuvas intensas, águas subterrâneas, qualidade da água e gestão de riscos de desastres.

Gestão de riscos de desastres

A Gestão de Riscos de Desastres (GRD) é um processo sistemático que envolve a identificação, análise, avaliação, tratamento e monitoramento de riscos. A GRD tem como objetivo reduzir os impactos adversos de perigos e a probabilidade de ocorrência de desastres. É um esforço contínuo que visa proteger pessoas, bens e o meio ambiente. A GRD, de acordo com a UNDRR, abrange diversas etapas e medidas: (i) Prevenção (para evitar a ocorrência de desastres), (ii) Mitigação (para reduzir a intensidade dos impactos de um desastre), (iii) Preparação (para garantir que a comunidade esteja pronta para responder a um desastre), (iv) Resposta (ações tomadas durante e imediatamente após um desastre para salvar vidas e proteger bens) e (v) Recuperação (ações para restaurar um novo patamar de “normalidade” após ocorrência de desastres).

Adicionalmente, o Brasil é signatário do Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres, adotado em 2015, que visa orientar os esforços globais na prevenção e redução de riscos de desastres até 2030. Ele estabelece metas globais e prioridades de ação para fortalecer a resiliência das comunidades e reduzir os impactos negativos dos desastres. São prioridades: a) Compreender o risco de desastres, b) Fortalecer a governança do risco de desastres, c) investir na redução do risco de desastres para a resiliência, e d) Melhorar a preparação para desastres, incluindo resposta e recuperação.

As Metas do Marco de Sendai abrangem: i) a redução da mortalidade, ii) do número de pessoas afetadas, iii) de perdas econômicas, iv)

de danos à infraestrutura crítica, v) o aumento do número de países com estratégias de redução de riscos, vi) a cooperação internacional e vii) o acesso a sistemas de alerta precoce. Pelas Nações Unidas e Organização Meteorológica Mundial, a iniciativa “Alertas Precoces para Todos” (“Early Warnings 4 All”, da OMM, 2023) visa garantir que todos sejam protegidos por esses sistemas até 2027. Para redução de riscos é fundamental estabelecer escalas de atuação, por exemplo sistemas de alertas antecipados para eventos de curto prazo, e ferramentas financeiras para planejamento da mitigação no longo prazo.

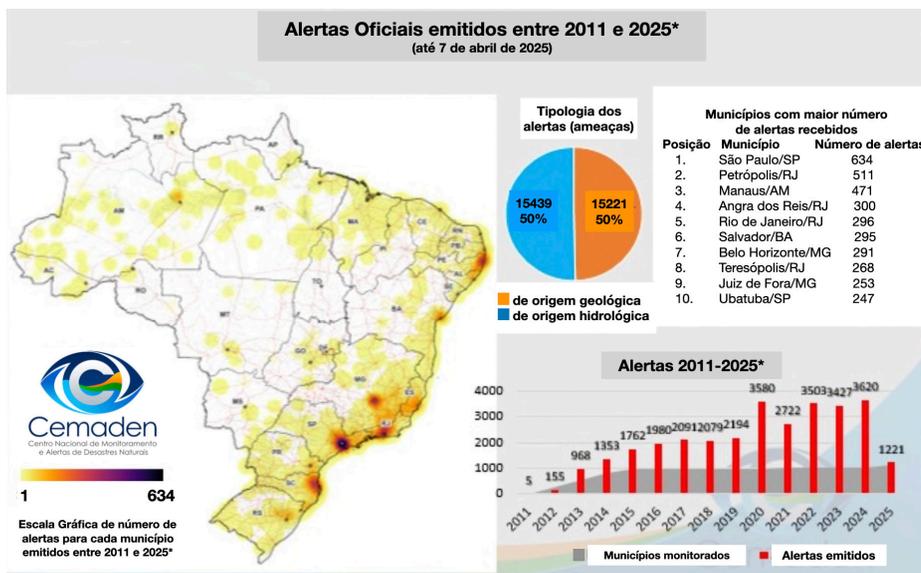
Neste contexto, para a consolidação do Sistema Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, foi criado o Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), com intuito de, em parceria com várias instituições, implementar, complementar e consolidar a rede de instrumentos meteorológicos, hidrológicos e geotécnicos para monitoramento e alerta de eventos extremos e seus impactos (deslizamentos, secas e inundações). O CEMADEN foi criado pelo Decreto Presidencial nº 7.513, é uma Unidade de Pesquisa (UP), vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e adota uma estrutura técnico-científica especializada.

Conforme o IPCC/AR6, o aquecimento global acima 1°C desencadeou aumento de frequência e da magnitude de extremos hidrológicos em níveis sem precedentes na história recente, especialmente de secas e cheias (Kreibich et al, 2022). Também, os impactos do clima sobre os recursos hídricos e setores usuários são mais vastos e severos do que se esperava, e os riscos futuros aumentam a cada fração de grau de aquecimento. Ao mesmo tempo, medidas de adaptação podem construir resiliência, mas é necessário aumentar o financiamento para expandir as soluções. Disto, o IPCC/AR6 alerta que, em trajetórias alinhadas ao limite de 1,5°C, o pico das emissões de GEE aconteceria antes ou próximo do ano 2025. Em consequência, o financiamento climático tanto para mitigação quanto para adaptação precisa de um aumento significativo nesta década. Assim, a gestão de riscos pode ser pautada por instrumentos como sistemas de alertas antecipados (ou precoces) e pelos seguros financeiros.

Sistemas de Alerta Antecipados

Um sistema de alerta antecipado é um conjunto de procedimentos e tecnologias projetados para detectar, monitorar e alertar sobre poten-

ciais perigos ou ameaças com antecedência, permitindo que pessoas e organizações tomem medidas preventivas para mitigar seus efeitos. Esses sistemas podem abranger desde alertas meteorológicos até avisos sobre desastres naturais, conflitos, surtos de doenças e outros eventos críticos. Para fins de recursos hídricos, são importantes alguns alertas relacionados a alertas meteorológicos, p.ex. Sistema “TerraBrasilis”/INPE (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/alerts>), INPE/Portal (<https://portal.inmet.gov.br/>), alertas de inundações, inundações, secas e outros eventos climáticos extremos do CEMADEN (<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/>). No Brasil, a Lei nº 12.608/2012 institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC). Além disso, autoriza a criação de um sistema de informações e monitoramento de desastres e altera outras leis relacionadas à defesa civil e planejamento urbano.



Entre 2011 e 2025, o CEMADEN emitiu alertas de origem hidrológicas e geológicas para mais de 1000 municípios prioritários no território brasileiro (Figura 2).

Figura 2: Mapa de Alertas (esquerda), características das ameaças dos alertas (centro), municípios mais alertados (direita superior), histórico de alertas emitidos e número de municípios monitorados entre 2011 e junho de 2025 (direita inferior) no Território Nacional Brasileiro. Fonte: Cortesia do Meteorologista e Coordenador Geral de Operação e Modelagem do CEMADEN - Marcelo Seluchi.

Em 2024, foram emitidos 3620 alertas relativos a 1690 desastres, dos quais 68% dos alertas foram de origem hidrológica e 32% de origem geológica (deslizamentos). Segundo o CEMADEN, a predominância de eventos hidrológicos reflete os impactos recorrentes das enchentes e enxurradas, notadamente em áreas urbanas mais vulneráveis. A emissão do alerta é sobre o potencial impacto que um evento intenso pode ocasionar, enquanto o impacto real depende das condições e vulnerabilidades de cada localidade. O CEMADEN monitora 1.133 municípios brasileiros, o que corresponde a 20% das cidades brasileiras e cerca de 60% da população do país.

No período 2014-2024, vinculados ao CEMADEN e ao INCT-Mudanças Climáticas Fase 2 (<http://inctmc2.cemaden.gov.br/>), a pesquisa brasileira avançou no desenvolvimento de modelos para previsão e emissão de alertas hidrológicos, especialmente sobre enchentes em áreas urbanas. Dando subsídios técnicos ao marco legal de defesa civil (Lei federal 12.608/2012), por um lado, esses avanços incluem aprendizado de máquinas e sistemas caóticos (Furquim et al, 2016), sistemas de informações geográficas com ciência cidadã (Horita et al, 2015; Fava et al, 2019) e uso de mídias sociais (Restrepo-Estrada et al, 2018). Por outro lado, novos modelos sociohidrológicos (Souza et al, 2021; Sarmiento-Buarque et al, 2021) alertam que a memória social e a percepção comunitária sobre as águas urbanas servem como sistemas de alertas de longo prazo dos riscos de impactos futuros sob cenários de mudanças climáticas. Uma revisão de tendências, desafios e perspectivas metodológicas sobre enchentes é proposta por Souza e Silva (2025).

Nas inundações excepcionais de Rio Grande do Sul, entre 28 de abril e 2 de maio de 2024, o CEMADEN emitiu 53 alertas hidrológicos de risco “alto” e/ou “muito alto”²². O Governo Federal, cria em 2024 a iniciativa “Defesa Civil Alerta”²³, no Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD). Os alertas avisam sobre a iminência de desastres naturais ou causados por pessoas, estabelecidos na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade) e o que os moradores das

22 https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2024/07/CEMADEN-_JMarengo_tragedia_RS.pdf

23 <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/defesa-civil-alerta-saiba-como-funciona-o-novo-sistema-de-alertas-de-desastres-do-governo-federal>

idades devem fazer naquele momento. O conteúdo desses alertas é de responsabilidade dos órgãos estaduais de defesa civil.

Seguros Financeiros para Mitigação de Riscos

O risco ambiental e sua variável climática sempre foi um risco financeiro em sua essência, além de extremamente relevante, por exemplo, para riscos relacionados a fenômenos climáticos como secas e chuvas intensas. Do ponto de vista do risco climático, vale destacar um movimento importante que vem sendo estimulado em especial pela TCFD (Força Tarefa para Divulgações Financeiras de Informações Relacionadas com o Clima), que recomenda estudos de cenários e testes de stress relacionados a este risco e seus possíveis impactos nos resultados de companhias de diferentes setores, entre eles o de seguros. Assim, no cenário global, em 2020, seguradoras reunidas em torno do PSI (Princípios para Sustentabilidade em Seguros), da UNEP-FI²⁴, a Iniciativa Financeira do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

As crises de água, principalmente, aumentaram nas últimas décadas. No Brasil, secas e inundações representam mais de 80% dos desastres naturais e, segundo a ANA, entre 1995 e 2014 as perdas econômicas diretas somaram R\$ 9 bilhões por ano, acarretando prejuízos para famílias, indústrias e agricultores. Em todo o planeta, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial, fenômenos climáticos entre 1971 e 2012 foram responsáveis por quase 287 bilhões de dólares em prejuízos. O impacto econômico de desastres naturais provocados por essas mudanças climáticas é incontestável.

A última seca na região metropolitana de São Paulo, entre 2013 e 2015, aumentou os preços das contas de água e provocou racionamento para pelo menos 9 milhões de pessoas abastecidas pelo Sistema Cantareira. A seca somada a uma demanda de água contínua gerou déficit no abastecimento. Foi a pior crise hídrica e financeira da história da Companhia Estadual de Águas de São Paulo (SABESP). O lucro da empresa caiu 60% entre 2014 e 2015. Em relação às cheias, destacam-se as enchentes e inundações no Rio Grande do Sul em maio de 2024. Segundo a Confederação Nacional dos Municípios, esse desastre gerou prejuízos entre

24 <https://www.unepfi.org/insurance/insurance/>

12 e 100 bilhões de reais²⁵, sendo que o mercado segurador pagou em indenizações, para os sinistros do referido período, algo muito próximo dos R\$ 4 a 7 bilhões²⁶, segundo as fontes levantadas com base em dados preliminares.

Embora os seguros climáticos ainda sejam um desafio para a resiliência no Brasil, existem avanços tecnológicos dos chamados “seguro Indexado”. Nesta tipologia de seguro, os valores a serem pagos a famílias ou empresas em casos de falta d’água ou tragédias ambientais, por exemplo, podem variar conforme aumenta o risco de um desastre ocorrer bem como seu potencial de gerar prejuízos. Por meio de imagens de satélite, dados das chuvas, análise da vazão de rios e do fluxo da água é possível mapear uma área, simular cenários, estimar danos provocados por eventos climáticos e calcular preços e valores de indenizações justos em casos de secas ou enchentes. No período 2017-2025, fomentado pelo INCT-Mudanças Climáticas Fase 2, houve avanços sobre desenvolvimento de seguros indexados em recursos hídricos.

Por um lado, entre 2017 e 2020, ainda com cenários CMIP5/IPCC/AR5, os seguros climáticos foram baseados em modelos hidrológicos semi-conceituais e distribuídos (Mohor & Mendiondo, 2017; Guzmán et al, 2020; Taffarello et al, 2020;). Os modelos de seguros para setores usuários de água são sensíveis às magnitudes dos extremos hidrológicos, às forçantes radiativas dos cenários futuros e aos critérios de valoração de serviços ambientais de produção de água. Isto cobra relevância frente ao marco regulatório recente do saneamento (Lei Fed. 14.014/2020) e de pagamento de serviços ambientais (Lei. Fed. 14.119/2021)

Já no período 2021 e 2025, com novos cenários CMIP6/IPCC/AR6, os novos modelos de seguros no Brasil incorporaram uma análise exploratória de padrões de dados, a combinação de multi-ameaças climáticas e foram vinculados aos modelos de equilíbrio geral computável (Silva et al, 2021; Benso et al, 2023; 2025; Gesualdo et al, 2024).

Por outro lado, a Confederação Nacional das Empresas de Seguros Gerais, Previdência Privada e Vida, Saúde Suplementar e Capitalização, congrega as Federações. Assim, A CNSeg (2022), junto à UNEP FI incorpo-

25 <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/balanco-das-chuvas-no-rio-grande-sul-aponta-para-r-12-2-bilhoes-em-prejuizos-financeiros>

26 <https://cnseg.org.br/noticias/volume-de-indenizacoes-de-seguros-no-rio-grande-do-sul-chega-a-quase-r-4-bilhoes>

rou indicadores para transição climática e incorporou exposição geográfica brasileira a 11 riscos climáticos físicos, considerando dois cenários climáticos (aumento de 2°C e de 4°C) e dois horizontes temporais (2030 e 2050). Dentre estes riscos, 4 têm relação com recursos hídricos: 1) inundações urbanas; 2) inundações fluviais; 3) estresse hídrico, 4) secas. O marco normativo brasileiro, a Lei 15.040/2024, conhecida como “Marco Legal de Seguros”, dispõe sobre normas de seguro privado, e confere ao segurado o dever de declarar os riscos cotidianos em um questionário de avaliação de risco no momento da contratação. Este mecanismo torna a identificação dos riscos mais transparente e permite a precificação adequada, conforme o perfil de cada cliente. Completam o âmbito regulatório de seguros, a Circular SUSEP 666/22²⁷, fortalece a gestão de riscos climáticos, e a Resolução CNSP 473/24²⁸, e define regras de sustentabilidade para classificação de produtos de seguro.

Resiliência e adaptação a secas

Este item discute um conjunto de opções de ações de gestão e adaptação para o aumento da resiliência das comunidades que precisam lidar com a ocorrência de secas. A discussão apresentada aqui retrata, em boa parte, o que foi apresentado em Martins e Reis (2021), que fez parte do Relatório Especial sobre Secas, organizado pelo Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR, 2021).

Os extensos investimentos em infraestrutura hídrica no Brasil durante o período de 1990-2010, especialmente no Nordeste do Brasil, criaram uma falsa sensação de segurança em relação à segurança hídrica, independentemente da intensidade das secas. No entanto, a recente seca plurianual (2012-2018) demonstrou que enfrentar as secas requer não apenas a melhoria da infraestrutura, mas também a identificação de vulnerabilidades e o desenvolvimento de planos de contingência para cada setor e sistema de gestão da água, bem como a necessidade de uma governança mais coordenada, tanto em nível local quanto em níveis mais elevados.

A seca prolongada de 2012-2018 motivou discussões no Brasil sobre o aprimoramento da política e da gestão de secas (Martins et al.,

27 <https://www2.susep.gov.br/safe/scripts/bnweb/bnmap.exe?router=upload/26128>

28 <https://www2.susep.gov.br/safe/scripts/bnweb/bnmap.exe?router=upload/29371>

2016a). A necessidade de uma ação governamental mais coordenada em resposta às secas, envolvendo todos os níveis de administração (federal, estadual e municipal), tanto em medidas reativas de curto prazo quanto em medidas proativas de longo prazo, resultou no desenvolvimento de uma Política Nacional de Secas mais estruturada e proativa, que segue o ciclo de gestão de risco de desastres (Figura 3). Essa política é baseada em uma estrutura de três pilares (Figura 4), conforme descrito por Wilhite et al. (2005), e consiste nas seguintes categorias analíticas: (1) monitoramento e alerta/previsão antecipada, (2) avaliação de vulnerabilidade/resiliência e de impactos e (3) planejamento de mitigação e resposta (Gutierrez et al., 2014).

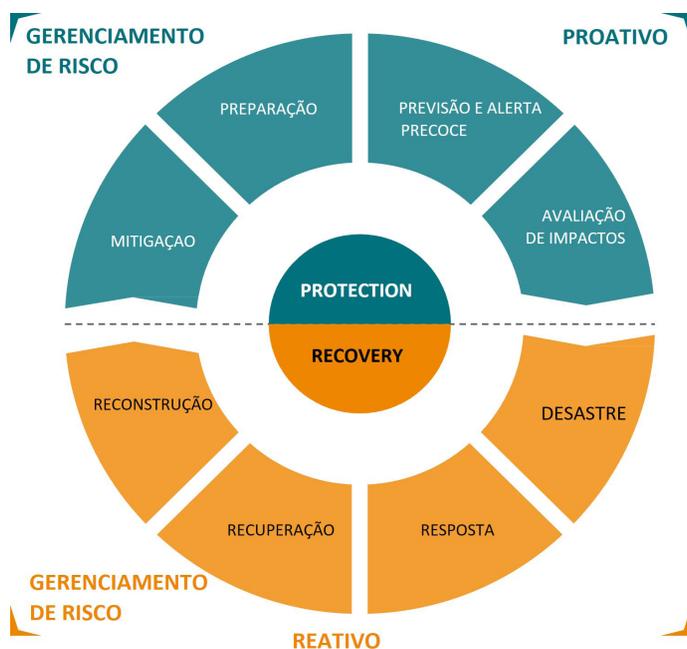


Figura 3: O ciclo de gestão de risco de desastres. A ênfase típica reativa e de gestão de crise das secas é indicada em vermelho na metade inferior da figura, enquanto a mudança de paradigma necessária em direção a uma gestão de risco mais proativa e preparação para secas é indicada na metade superior da figura, em azul. Fonte: Figura fornecida por Donald Wilhite, Universidade de Nebraska, Lincoln.



Figura 4: Os três pilares da preparação para secas que sustentam uma mudança de paradigma da gestão reativa de crises para abordagens mais proativas diante de eventos de seca. Fonte: Gutiérrez et al., 2014.

Previsão de secas do Nordeste Brasileiro – O Caso do Estado do Ceará e contribuição para consolidação de Políticas Públicas

Desenvolver sistemas de previsão confiáveis, capazes de prever a evolução futura de uma seca em andamento ou identificar o início, a gravidade e a extensão espacial de uma seca futura em uma região normalmente estável, pode ser um passo crucial para estabelecer um plano de gestão de risco de secas. Muitas iniciativas desse tipo já foram realizadas em nível global, incluindo na América do Norte, Europa, Austrália e Nordeste do Brasil (Steinemann, 2006; Shafiee-Jood et al., 2012; Wood et al., 2015; Cancelliere et al., 2006; Lavaysse et al., 2015; Prudhomme et al., 2015; Werner et al., 2015; Souza Filho et al., 2003; Sun et al., 2005; Canamary et al., 2015; Pereira et al., 2015).

Os benefícios desses sistemas para a gestão de risco de secas são evidentes. Eles podem fornecer informações valiosas, embora incertas, sobre vários aspectos de uma seca, permitindo que gestores e tomadores de decisão tenham tempo suficiente para implementar medidas necessárias, reduzindo assim os impactos econômicos, sociais e ambientais das secas. No final da década de 1990, instituições meteorológicas no Brasil, incluindo o CPTEC/INPE e a FUNCEME, comprometeram-se a desenvolver um sistema de previsão climática para a região. Esta iniciativa inspirou o desenvolvimento de uma estratégia de monitoramento de secas que tem sido aplicada para todo o Brasil.

Nos finais dos anos 90, os benefícios potenciais do uso de previsões climáticas de precipitação para a gestão dos recursos hídricos já eram amplamente reconhecidos, e o Estado do Ceará investiu no desenvolvimento, pela FUNCEME, de modelagem climática numérica. Em 2001, a FUNCEME, o International Research Institute for Climate and Society (IRI) da Universidade de Columbia e o próprio IRI pioneiramente operacionalizaram um sistema para regionalizar previsões do modelo global ECHAM4.5 fornecidas pelo IRI. Ao longo dos anos, diversos sistemas de previsão climática numéricos e estatísticos foram desenvolvidos e apresentados nos fóruns de previsão, mas tiveram atenção limitada até janeiro de 2012, quando passaram a ser foco do fórum climático oficial.

Em janeiro de 2012, durante as discussões para a divulgação da previsão consensual para a quadra chuvosa de fevereiro a maio, Martins (2012) destacou a necessidade de mudanças imediatas no sistema de previsão climática, destacando a partir da análise das previsões consensuais entre 2001 e 2012, divulgadas em janeiro para a estação chuvosa, e verificou que, em 80% das vezes, o consenso indicava o tercil médio (“em torno da média”) como a categoria mais provável, o que estava distante das categorias realmente observadas.

Para resolver esse problema, Martins (2012) propôs um novo sistema baseado exclusivamente em previsões numéricas de modelos climáticos e no desempenho passado desses modelos. Entre os argumentos apresentados estavam: a complexidade do problema, a falta de compreensão de probabilidade e estatística, o envolvimento da equipe de previsão com o usuário final, agendas políticas do moderador da reunião, previsões consensuais restritas a áreas onde os modelos têm habilidade, uma abordagem conservadora para alcançar consenso nas negociações e a incompatibilidade entre o formato da previsão e o processo decisório. Observou-se também que esses fatores podem ocorrer em combinação.

Motivações de cunho político pessoal frequentemente dificultam o aprimoramento do sistema. Para superar isso, a FUNCEME implementou em 2012 um sistema de previsão baseado em modelos e tem buscado continuamente aumentar sua precisão e atrair atores nacionais para participar.

Reconhecendo a necessidade de mudança, conjuntamente CP-TEC/INPE, INMET e FUNCEME estabeleceram uma metodologia que combinou modelos das três instituições para alcançar probabilidades objetivas por tercís. Esse sistema tornou-se operacional em julho de

2012 e desde então passou a incluir o sistema independente de previsão climática da FUNCEME, que incorpora o Modelo Global de Previsão Climática ECHAM 4.6 e modelos regionais por ele forçados. Atualmente, as execuções da FUNCEME fazem parte da iniciativa de Conjunto Multimodelo Nacional, que inclui o modelo climático estatístico nacional do INMET, as três execuções de modelos globais do CPTEC/INPE e a execução ECHAM 4.6 da FUNCEME.

O impacto desse sistema de previsão para a antecipação de secas foi evidenciado em anos chuvosos, como 2008 e 2009, quando ele pôde orientar a operação de sistemas de reservatórios para garantir o abastecimento por vários anos. Em 2009, foi tomada a difícil decisão de priorizar o uso dos sistemas de monitoramento e previsão de clima e tempo em detrimento do plano de controle de cheias do maior reservatório do estado. Essa decisão resultou em armazenamento adicional de água e garantiu o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza durante a seca plurianual de 2012-2018. O uso de produtos de previsão climática nos processos de tomada de decisão nos setores de recursos hídricos e agrícola não é simples. Para maximizar o valor dessas previsões, é fundamental criar produtos orientados ao usuário que forneçam informações específicas para cada setor, no momento adequado.

Como exemplo, no Fórum de Previsão Climática de 2015, foram apresentadas evidências de que a seca em andamento no estado desde 2012 poderia persistir até 2016, com base em previsões de longo prazo da temperatura da superfície do mar. Apesar do alto nível de incerteza desse tipo de previsão, os tomadores de decisão do governo levaram muito a sério o impacto potencial de dois anos consecutivos de seca e decidiram agir de forma preventiva, lançando um grande processo licitatório para perfuração de poços, o que acabou ajudando a mitigar os impactos das secas subsequentes. A construção de 6.000 poços não teria sido possível sem o uso, pelo governo, das informações climáticas disponíveis. Embora este seja um exemplo bem-sucedido do uso de informações climáticas no processo decisório, é razoável supor que a comunicação eficaz entre cientistas e formuladores de políticas e decisões não teria sido possível se os impactos da seca já não fossem perceptíveis no momento da tomada de decisão.

Monitoramento de secas

O contexto do período 2012-2018 estimulou um diálogo já conhecido no país sobre o aprimoramento da política e da gestão de secas. O Ministério da Integração Nacional percebeu a necessidade de uma resposta estadual mais abrangente às secas, envolvendo todas as esferas administrativas — federal, estadual e municipal — e adotando uma perspectiva de longo prazo, em vez de apenas uma resposta emergencial. Essa percepção levou o ministério a formular uma Política Nacional de Secas mais estruturada (De Nys et al., 2016).

No passado, o debate sobre a gestão de secas ganhava ou perdia relevância conforme o ciclo de secas, o que resultava em avanços limitados rumo a uma gestão proativa. Inicialmente, para lidar com a complexidade do tema, o governo concentrou seus esforços no aspecto mais essencial da preparação para secas — o monitoramento — e também estabeleceu três Planos de Preparação para Secas para sistemas gerenciáveis, a fim de demonstrar a viabilidade do conceito (projetos-piloto para Abastecimento Urbano, Recursos Hídricos e Agricultura de Sequeiro).

Um modelo de monitoramento foi escolhido inspirado nos modelos do México e dos Estados Unidos, que reuniu informações de instituições federais e estaduais para produzir um único mapa mensal das condições de seca na região (Martins et al., 2016bc). Isso exigiu uma estreita colaboração entre instituições estaduais e federais, razão pela qual foi inicialmente lançado na Região Nordeste, restando atualmente apenas alguns estados fora do processo.

O processo foi um grande desafio para um país pouco acostumado a iniciativas tão coordenadas, e envolveu a integração de todos os bancos de dados regionais relevantes, permitindo o cálculo de diferentes indicadores de seca e a integração de diversas fontes de informação, incluindo sensoriamento remoto. O Monitor de Secas foi estabelecido em julho de 2014 e inicialmente liderado pela FUNCEME, com foco na região Nordeste, e apoio da Rede de Instituições de Clima/Água da região. Em fevereiro de 2017, foi assinado um Acordo de Cooperação entre a Universidade Federal do Ceará (UFC), a FUNCEME e com a liderança da ANA.

A Figura 5 ilustra os diversos atores estaduais envolvidos no processo, bem como as mudanças de liderança para garantir a participação formal das instituições federais. Uma década após essa mudança de paradigma (desde 2014), o país conta hoje com um robusto Monitor de Secas que inicialmente cobria apenas a região Nordeste (9 estados), mas que

cresceu ao longo do tempo até cobrir todos os 27 estados (todo o país), envolvendo mais de 60 instituições estaduais e 5 federais, demonstrando assim que a preparação para secas se tornou uma questão de interesse nacional. O objetivo do Monitor e de seu mapa resultante é aprimorar a compreensão e a definição de secas, bem como fortalecer a efetividade das respostas de políticas públicas para auxiliar as populações afetadas.

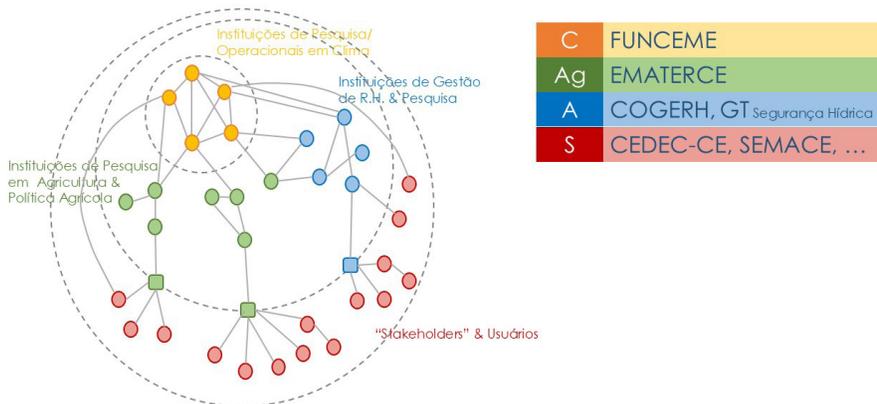


Figura 5: Processo do Monitor de Secas envolvendo, em nível estadual, instituições dos setores de Clima (C), Agricultura (Ag) e Água (A) e Usuários/Partes interessadas (S) (Defesa Civil, Órgão Ambiental e outros stakeholders). A figura também mostra o início e o status atual do Monitor de Secas, que teve inicialmente a FUNCEME como instituição central, de julho de 2014 a fevereiro de 2017, quando a ANA assumiu esse papel. Fonte: FUNCEME.

Planejamento

Os Planos de Contingência – O Monitor de Secas retrata principalmente a Seca Física ou Natural, enquanto a escassez hídrica, que está intimamente ligada a sistemas gerenciáveis, exige informações complementares. Para tratar dessa questão, foi implementado um programa piloto na região com o objetivo de estabelecer conexões entre o Monitor de Secas e o Plano de Preparação para Secas voltado a sistemas gerenciáveis. O objetivo principal do programa foi investigar as relações entre a seca física (representada pelo Monitor) e a seca operacional (indicada pelo Plano de Preparação) em três setores: Abastecimento Urbano, Recursos Hídricos e Agricultura de Sequeiro. O Monitor de Secas fornece informações cruciais, mas não suficientes para subsidiar plenamente os

Planos Setoriais de Preparação para Secas. As características e escalas específicas de cada setor desempenham papel significativo no desenvolvimento desses planos.

Os Planos de Preparação para Secas tiveram como objetivo demonstrar a aplicação prática da gestão proativa de secas por meio do uso de ferramentas e estratégias específicas. A correlação entre o Monitor de Secas e os Planos de Preparação varia, pois depende de como a seca física, representada pelo Monitor, se relaciona com a seca operacional representada nos Planos de Preparação. No caso do Plano de Preparação para Agricultura de Sequeiro, a seca operacional está fortemente vinculada à seca indicada pelo Monitor. Entretanto, essa relação pode não ser tão forte em outros planos.

O piloto no Nordeste lançou cinco planos de preparação como estudos de caso em três setores (De Nys et al., 2016, para detalhes específicos de cada plano): Serviços de Abastecimento de Água (Sistema Jucazinho – Estado de Pernambuco; Região Metropolitana de Fortaleza – Estado do Ceará), Planejamento de Bacias Hidrográficas (Bacia Piranhas-Açu – Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba), hidrossistema de usos múltiplos (Açude Jucazinho – Estado de Pernambuco) e Agricultura de Sequeiro de pequenos produtores (Município de Piquet Carneiro – Estado do Ceará). O objetivo desses planos foi tornar a preparação para secas mais acessível aos tomadores de decisão e promover a gestão proativa de secas.

Os planos foram concebidos para associar a categorização da seca a ações específicas de política e gestão, observando a estrutura dos três pilares. No entanto, a relação entre o Monitor de Secas e o Plano de Preparação pode variar conforme o setor, já que alguns podem requerer a adaptação do sistema de monitoramento devido à sua escala e características específicas. Após os esforços piloto dos Planos de Preparação para Secas, iniciaram outros estudos de caso na Região Nordeste, incluindo abastecimento urbano e hidrossistemas e agricultura de sequeiro de pequenos produtores.

Vários estados têm dedicado recursos significativos para avançar nos outros dois pilares, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de planos de contingência para secas adaptados a diversos setores. As lições da experiência brasileira estão sendo compartilhadas e adaptadas em outros países por meio de intercâmbio Sul-Sul, como com Essuatíni e Jordânia. No entanto, tais iniciativas demandam tempo, dada sua natureza setorial e a necessidade de personalização para sistemas

individuais (por exemplo, hidrossistemas, cidades etc.) sob sua responsabilidade. Além disso, reconhecendo que a adaptação ocorre principalmente no nível local, novas iniciativas têm sido implementadas em nível comunitário de forma participativa. Essas iniciativas consideram a capacidade de inovação de cada comunidade em termos de governança da água, garantindo seu engajamento ativo nas fases de diagnóstico, planejamento prospectivo e implementação.

Em períodos de seca, a maximização do uso da água não se limita à eficiência econômica, mas também envolve a integração de políticas públicas que promovam o nexo água-alimentos-energia-meio ambiente. No semiárido brasileiro, por exemplo, a convivência com a seca, combina tecnologias de captação e armazenamento de água (cisternas, barragens subterrâneas) com práticas agrícolas sustentáveis, como o cultivo de culturas resistentes à seca. Essas estratégias são incentivadas por dinâmicas de mercado, como o aumento dos preços de commodities agrícolas em períodos de escassez, mas também requerem planejamento para evitar a superexploração de recursos hídricos, que pode comprometer a resiliência a longo prazo.

Resiliência e adaptação a eventos de chuvas intensas

Os aspectos conceituais relativos às questões de adaptação em Águas Urbanas devem garantir “Sustentabilidade e Resiliência – particularmente no contexto de eventos extremos”, em acordo com a Carta de Recife 2024, do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU) e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos (SRRU), da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro). Para contextualizar, além dos inúmeros prejuízos materiais, houve uma grande quantidade de vítimas fatais dos últimos anos (mais de 600 óbitos causados pelas chuvas, considerando-se os casos de Petrópolis, Região metropolitana de Recife, São Sebastião e cidades do Rio Grande do Sul).

Tais eventos extremos e seus impactos tornam claras a extensão dos desafios e a premência de debater alternativas e meios técnicos, políticos e financeiros para implementá-las, observando-se princípios de sustentabilidade e participação social. Dessa forma, a partir de uma reflexão sobre os eventos que têm ocorrido e os desafios climáticos que temos pela frente, destacam-se ações como:

- Reconhecer que as cidades brasileiras estão cada vez mais vulneráveis aos problemas causados por chuvas de grande intensidade, de forma que gestores e a sociedade como um todo enfrente o problema de forma abrangente e multidisciplinar.
- Fomentar a compreensão, pelos moradores das cidades, dos riscos presentes na ocupação de áreas de encostas e margens de rios e córregos e de como tais riscos podem agravar-se em face de mudanças climáticas. Assim, gestores podem desenvolver programas de educação hidroambiental para que a sociedade se conscientize da existência do risco e possa se preparar adequadamente aos eventos.
- Assegurar que as infraestruturas e instalações operacionais de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas sejam dimensionadas e implantadas com as melhores técnicas e tenham manutenção preventiva e corretiva constantes, assim como a reposição e atualização dos sistemas de alerta e seus componentes.
- Desenvolver uma cultura de prevenção para manter a memória viva e evitar o esquecimento, mesmo que o intervalo entre ocorrências de eventos extremos seja grande. Uma ação efetiva pode ser a inclusão da cultura de prevenção de riscos de desastres no currículo da educação formal, em seus diferentes níveis.
- Incentivar o conhecimento científico avançado incluindo a modelagem computacional, sensoriamento remoto, internet das coisas, inteligência artificial, enquanto ferramentas que precisam ser utilizadas para definição de programas e projetos e, sempre que possível, considerando as mudanças climáticas.
- Ampliar e modernizar a rede de monitoramento qualitativa e quantitativa da área urbana para formar uma robusta base de dados, essencial para fornecer subsídios visando a calibração e validação de modelos, bem como para auxiliar na tomada de decisão nos projetos de revitalização de cursos d'água e de mitigação de inundações.
- Reconhecer que as universidades, entre outros institutos de ensino e pesquisa, possuem expertise para a proposição de soluções adequadas à realidade dos centros urbanos onde atuam e, portanto, devem ser consideradas pelas prefeituras para o desenvolvimento de políticas públicas integradas aos projetos de micro e macrodrenagem urbana.

- Priorizar, dentre as ações governamentais, as populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica, que estão mais suscetíveis aos riscos hidrológicos, utilizando tecnologias sociais que contribuam para a redução do risco.
- Priorizar ainda, dentre as ações governamentais, políticas públicas que considerem os efeitos dos eventos extremos e das mudanças climáticas, com utilização dos conhecimentos mais avançados e inovadores, na busca de maior sustentabilidade e resiliência dos ambientes urbanos.

Águas subterrâneas

As alterações nos padrões de ocorrência das águas subterrâneas no Brasil em decorrência das mudanças climáticas têm potenciais consequências principalmente para o abastecimento humano, agricultura e ecossistemas, mas também para indústria e outros setores usuários, dependendo da região. Para enfrentar os desafios atuais e futuros, deve-se buscar a gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas, aspecto também reforçado por pesquisa recente de Hirata et al. (2025), além de investir em monitoramento hidrogeológico (Uchôa et al., 2024), ainda muito incipiente no país e com grandes assimetrias regionais. Ferramentas auxiliares, baseadas em sensoriamento remoto também precisam ser mais disseminadas. ANA (2024), no último relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, ressalta a necessidade de estudos para avaliação da interdependência entre os fluxos superficiais e subterrâneos e sua importância para a gestão integrada. O relatório Conjuntura destaca a importância de identificar as porções das bacias onde os rios têm maior dependência dos aquíferos para a manutenção de suas vazões, tornando essas regiões prioritárias para implementação da gestão integrada rio/aquífero.

Recarga artificial de aquíferos, ou RGA (Recarga Gerenciada de Aquíferos), se destaca como uma estratégia de adaptação para as águas subterrâneas. Ainda não regulamentada no Brasil, mas com diversas pesquisas que podem orientar a formulação de política pública nesse sentido, a RGA pode considerar diversas fontes de água para essa finalidade, como águas de reuso de esgoto tratado, captação de águas de chuva em edificações no meio urbano, dentre outras. Recentemente, OODARZI et al. (2024) conduziram pesquisas para avaliar o potencial de RGA no esta-

do de São Paulo como estratégia de enfrentamento de efeitos de mudanças climáticas nos recursos hídricos.

Como a gestão de águas subterrâneas no Brasil é de responsabilidade dos estados, mais uma vez se reforça a necessidade de fortalecimento dos órgãos gestores estaduais.

Qualidade da água

Considerando que sistemas hídricos estão suscetíveis aos eventos extremos (secas e cheias) e considerando a complexidade dos processos hidrodinâmicos, morfodinâmicos e biogeoquímicos que caracterizam esses ambientes, os efeitos de uma variedade de eventos extremos induzidos pelas mudanças climáticas (frequência e aumento de intensidade) de fato indicam um risco potencial para a deterioração da qualidade da água.

Neste contexto destaca-se a relevância do monitoramento sistemático de parâmetros de qualidade da água, como parte do processo de gestão quali-quantitativa, mas que permita avaliar o impacto físico, químico e biológico no âmbito da dinâmica integrada dos ecossistemas. Tem-se muito que aprender sobre o impacto das mudanças climáticas na gestão de qualidade da água. Isso requer a adoção de abordagens multiriscos que integrem múltiplos estressores na avaliação dos impactos das mudanças climáticas na qualidade da água em sistemas ambientais.

Ferramentas inovadoras de modelagem e monitoramento são cruciais para abordar interações complexas e dinâmicas entre estressores relacionados às mudanças climáticas, processos ecossistêmicos, constituintes da qualidade da água e características morfológicas específicas do local (Kozak, 2021). Avanços no monitoramento de longo prazo e alta resolução, juntamente com o desenvolvimento de modelos sofisticados de IA baseados em processos e dados, bem como estratégias híbridas, devem ser o foco central de pesquisas futuras, para abordar lacunas de conhecimento, aprimorar as capacidades preditivas e reduzir incertezas.

Adicionalmente, considerar fatores impulsionados pelo homem, como o uso da terra e medidas de adaptação, é vital para desvendar a dinâmica complexa do sistema sob múltiplas pressões. Além disso, o trabalho futuro poderia ser aprimorado por iniciativas mais acessíveis (de baixo custo e fáceis de usar) que envolvam os cidadãos no contexto da socio-hidrologia (Almeida, 2024) nos esforços de coleta de dados, como

a divulgação de indicadores visuais de má qualidade da água para alertar as autoridades locais.

Essa abordagem integrada fomentaria pesquisas mais participativas, colaborativas e orientadas pela comunidade, aprimorando a compreensão científica e social da dinâmica de sistemas complexos sob múltiplas pressões.

ASPECTOS DAS POLÍTICAS PÚBLICAS E INOVAÇÕES NA AGENDA DE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA

As políticas públicas de recursos hídricos no Brasil enfrentam o desafio de responder a um cenário de intensificação das mudanças climáticas, que ampliam riscos de escassez, cheias e conflitos pelo uso da água. Neste item, apontam-se caminhos para modernizar instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e explorar inovações sociotécnicas, regulatórias e institucionais que fortaleçam a resiliência e a adaptação do país. O objetivo é destacar avanços e propor estratégias capazes de alinhar ciência, gestão e sociedade na construção de uma agenda hídrica mais preventiva, integrada e orientada ao futuro.

Instrumentos para a Gestão de Recursos Hídricos – visão ampliada

Diante da intensificação dos impactos da mudança do clima sobre os regimes hidrológicos e os usos múltiplos da água, torna-se imprescindível reavaliar e aprimorar os instrumentos da PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/1997. Embora esses instrumentos tenham proporcionado avanços importantes na gestão descentralizada e participativa da água no Brasil, muitos deles ainda não incorporam plenamente a dimensão da adaptação climática nem oferecem respostas adequadas aos novos riscos associados à variabilidade e incertezas hidrológicas. A seguir, são apresentadas propostas de aprimoramento para cada um dos instrumentos da PNRH, organizadas por tópicos, com foco na promoção de uma gestão mais adaptativa, preventiva, territorializada e baseada em evidências científicas. Esses aprimoramentos visam modernizar o marco regulatório, integrar a lente climática nos processos decisórios e fortalecer a resiliência hídrica nacional frente às pressões do século XXI.

vi. Plano de Recursos Hídricos

- Incorporar sistematicamente os cenários climáticos e a avaliação da vulnerabilidade hídrica como conteúdo obrigatório dos planos, abrangendo tanto os riscos de escassez quanto de cheias.
- Utilizar ferramentas como o Water Tracker para avaliar a integração da adaptação nos planos e monitorar a efetividade das ações propostas.
- Territorializar a análise de risco, transpondo a escala das bacias para o nível municipal, de modo a orientar respostas locais frente às mudanças climáticas.
- Certificar e qualificar o potencial de adaptação das ações existentes nos planos, com base em critérios técnicos robustos e evidências científicas.
- Criar um selo ou sistema de classificação que indique o grau de contribuição de cada ação à adaptação hídrica, facilitando a priorização e a alocação de recursos por parte dos gestores.
- Estimular a revisão periódica dos planos com base em novos cenários climáticos, promovendo um ciclo contínuo de atualização e aprendizado adaptativo.

vii. Cobrança pelo uso da água

Introduzir mecanismos tarifários dinâmicos, inspirados nas bandeiras tarifárias do setor elétrico, para refletir a escassez hídrica.

- Vincular o valor da cobrança ao estado hidrológico em tempo quase real, via decretos de escassez e monitoramento hidrometeorológico.
- Usar a cobrança como sinal econômico para incentivar o uso racional da água em cenários de estresse climático.

viii. Outorga de direito de uso da água

- Evoluir para um modelo adaptativo, com revisões condicionadas a gatilhos hidrológicos.
- Incorporar indicadores de disponibilidade hídrica e restrições temporárias em eventos críticos.
- Utilizar séries históricas mais recentes para estimar oferta hídrica em consonância com o novo regime climático.

- Considerar explicitamente as incertezas nas análises de balanço hídrico, reforçando a gestão por risco.

ix. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)

- Consolidar o SNIRH como base técnico-científica para a gestão adaptativa.
- Harmonizar cenários climáticos e apoiar a produção científica com dados hidrológicos de alta qualidade.
- Oferecer capacitação contínua e metodologias para avaliação de risco e vulnerabilidade.
- Modernizar a rede hidrometeorológica com base em critérios de risco e investir em governança de dados e integração institucional.

x. Enquadramento dos corpos hídricos

- Incorporar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica, especialmente nas vazões de diluição.
- Articular qualidade e quantidade da água sob uma ótica de risco, sobretudo para orientar investimentos em saneamento e infraestrutura resiliente.
- Ajustar o enquadramento às novas realidades climáticas, em especial nas regiões mais vulneráveis.
- Promover avaliação de planos de efetivação de enquadramento.
- Estabelecer metas e ações com abordagens baseada em estratégias de ciência cidadã (*citizen science*, Ramirez et al, 2023) e Socio-hidrologia.
- Integração de abordagem ecossistêmica em processos de enquadramento

Estratégias Complementares e inovações sociotécnicas

i. Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

As SbN vêm se consolidando como estratégia essencial de adaptação do setor de recursos hídricos às mudanças climáticas. Ao invés de depender exclusivamente de grandes obras de infraestrutura, favorecem a conservação de ecossistemas, ampliam a infiltração de água no solo e

contribuem para a regulação dos fluxos hídricos. Além de reforçar a resiliência frente à variabilidade climática, geram ganhos adicionais em biodiversidade, qualidade da água e provisão de serviços ecossistêmicos.

Entre as medidas mais relevantes estão soluções descentralizadas e de pequena escala, como o mapeamento e uso estratégico de pequenos reservatórios, capazes de assegurar disponibilidade em períodos secos e reduzir impactos de eventos extremos. Integradas a práticas de restauração florestal, recuperação de áreas úmidas e manejo sustentável do uso da terra, essas iniciativas demonstram o potencial das SbN para combinar infraestrutura natural e cinza em respostas mais flexíveis e adaptativas.

Nesse cenário, os Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) ganham destaque como mecanismos de incentivo para viabilizar SbN. Ao remunerar agricultores e comunidades pela conservação de ecossistemas estratégicos, os PSA fortalecem a proteção dos serviços hídricos e ampliam a escala de aplicação das soluções. A integração de SbN e PSA em políticas públicas representa, portanto, uma oportunidade para alinhar benefícios ambientais e sociais, reforçar a governança e assegurar maior segurança hídrica diante das mudanças climáticas.

ii. Revitalização de Bacias Hidrográficas

Ainda sem abrangência em larga escala, vários esforços vêm sendo empreendidos para a revitalização de bacias hidrográficas, que pode também ser considerada uma estratégia de gestão adaptativa e de resiliência climática. O Programa Produtor de Águas da ANA foi criado para incentivar o produtor rural a investir em ações que ajudem a preservar a água. O Programa Produtor de Água utiliza o conceito de PSA, incentivando produtores rurais a adotarem práticas conservacionistas em suas propriedades, como o controle da erosão e o manejo adequado da vegetação. Em troca, recebem apoio técnico e financeiro para implementar essas práticas.

Desde sua criação, o programa tem se mostrado eficaz na revitalização de bacias hidrográficas e na melhoria da qualidade e oferta de água. A ANA apoia 76 projetos em todo o país, abrangendo regiões metropolitanas de grandes cidades como Brasília, Campo Grande, Florianópolis, Goiânia, Palmas, Rio Branco, Rio de Janeiro e São Paulo.

Além da ANA, o programa conta com a participação de outras instituições federais, estaduais, municipais e da sociedade civil. A iniciativa faz parte do Planejamento Estratégico da ANA e está alinhada com o Plano

Nacional de Recursos Hídricos, segundo a ANA. O Programa Produtor de Águas completou 10 anos em 2024 e recuperou mais de 47 mil hectares.

Em 2022, o então MDR (Ministério do Desenvolvimento Regional) coordenou e contratou a elaboração do Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas cujo documento final apresenta diretrizes, objetivos, modelos de gestão e arranjos institucionais. O documento destaca, como marco importante para reorientar a estratégia de revitalização de bacias hidrográficas no Brasil, o reconhecimento da importância das SbN na agenda da água mundial. De acordo com Unesco (2018), especialmente no que se refere à melhoria da segurança hídrica, a ampliação das SbN será fundamental para a realização da Agenda 2030.

iii. Serviços Públicos de Drenagem e Manejos de Águas Pluviais Urbanas

As questões de drenagem urbana têm um papel relevante nas estratégias de adaptação. Particularmente com o objetivo de minimizar os impactos da urbanização, reduzir a poluição hídrica, promover a segurança hídrica e a gestão integrada das águas pluviais.

Como contribuição recente, destaca-se a norma de referência para Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) – NR nº 12/2025 – emitida pela ANA. Essa norma estabelece diretrizes e critérios para a estruturação, regulação e prestação dos serviços de DMAPU, buscando minimizar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e a poluição dos corpos d'água. Com destaque, a demanda estratégica de integração dos sistemas de DMAPU com a escala territorial e socioambiental da bacia hidrográfica.

iv. Marcos regulatórios, alocação de água e gestão adaptativa

Uma experiência inovadora e relevante de gestão em bacias hidrográficas compartilhadas (com duplo domínio das águas, federal e estadual) são os denominados marcos regulatórios, entendidos como acordos formais estabelecidos entre a ANA e os órgãos estaduais responsáveis, com a participação dos usuários. Esses instrumentos funcionam como pactos que definem responsabilidades e regras comuns para enfrentar períodos de crise hídrica ou resolver disputas já existentes.

Uma vez instituído, o marco regulatório passa a servir de referência para a regulação dos usos da água, orientando as decisões de gestão na

bacia ou sistema hídrico correspondente. No contexto de intensificação da variabilidade e mudanças do clima, é essencial adotar marcos legais mais flexíveis, com previsão de revisões periódicas de alocação e de cláusulas de reavaliação contratual durante eventos extremos.

Outra iniciativa inovadora no contexto da gestão integrada de recursos hídricos no Brasil é a alocação negociada de água, desenvolvida no estado do Ceará e depois ampliada para outras regiões com estresse hídrico no país. Nos Relatórios de Conjuntura ANA, a alocação negociada de água é apresentada como um instrumento de gestão que busca compatibilizar usos múltiplos em situações de conflito, especialmente em bacias e sistemas hídricos com restrição de disponibilidade. Trata-se de um processo participativo, que envolve usuários, órgãos gestores e comitês de bacia, resultando em acordos que definem regras temporárias de uso da água.

A ANA enfatiza que esse mecanismo tem se mostrado eficaz na prevenção de litígios e na redução de impactos econômicos e sociais durante períodos de escassez, pois promove diálogo, transparência e corresponsabilidade entre os atores envolvidos. Além da experiência consolidada do Ceará, experiências em nível nacional como a da Bacia do rio São Marcos, são frequentemente destacadas como exemplos de arranjos institucionais que garantiram maior segurança hídrica em contextos críticos. Com a intensificação de eventos de seca em todo o país, é essencial ampliar e fortalecer instrumentos de alocação negociada e adaptativa, com base em risco climático.

Mais recentemente, e de forma inovadora, instrumentos como a Outorga com gestão de Garantia e Prioridade (OGP) e a Outorga com Gestão Compartilhada (OGC) são duas abordagens que estão sendo testadas em ambiente regulatório experimental pela ANA. A OGP consiste em emitir outorgas com garantia mais baixa do que usualmente adotado pela ANA, sem se limitar a uma vazão de referência fixa. Já a OGC prevê a realocação, ou compartilhamento, de volumes de água que estão outorgados formalmente, mas que estão momentaneamente sem ser usados.

Ambas as iniciativas visam à maximização do uso da água e ao atendimento de usuários que não poderiam ser outorgados dentro das abordagens convencionais. Além disso, são iniciativas que foram construídas com a participação dos usuários e que descentralizam a tomada de decisão sobre como a água deve ser usada no dia a dia, representando

uma inovação do ponto de vista de gestão descentralizada, participativa e socio-hidrológica no contexto de adaptação.

v. Instrumentos econômicos e financeiros

A adaptação do setor de recursos hídricos às mudanças climáticas exige o fortalecimento de instrumentos econômicos e financeiros capazes de reduzir vulnerabilidades e ampliar a resiliência. Seguros climáticos e hidrológicos podem oferecer proteção a setores estratégicos, como a agropecuária e o abastecimento urbano, mitigando perdas em eventos extremos.

Outro caminho é a precificação da água com base em critérios de risco e escassez, ajustados às condições sociais e territoriais, de modo a promover o uso mais eficiente e equitativo dos recursos hídricos. Essa abordagem pode estimular práticas sustentáveis, ao mesmo tempo em que garante acesso justo às populações mais vulneráveis.

Ainda, a criação de fundos de resiliência e de mecanismos de pagamento por serviços hidrológicos representa uma oportunidade de integrar diferentes esferas de governo e comunidades locais. Esses instrumentos contribuem para financiar soluções adaptativas, apoiar a conservação de ecossistemas estratégicos e consolidar a segurança hídrica frente à variabilidade e às incertezas climáticas.

Desafios da Governança e da construção da resiliência

A governança da água é um tema complexo e multifacetado que envolve a participação de diversos atores e a articulação entre diferentes níveis e setores para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos. Em um contexto de mudanças climáticas, a gestão resiliente da água torna-se crucial, especialmente em territórios com condições semiáridas e alta variabilidade hídrica.

Desafios de inovação e governança

Conforme apontado por Martins (2025), a inovação na gestão da água é limitada por complexidades de governança em níveis nacional, regional e local. Essas restrições frequentemente impedem o desenvolvimento de abordagens de modelagem específicas para comunidades,

adaptadas às necessidades e contextos locais, especialmente em territórios vivos onde a habitabilidade e a resiliência devem ser equilibrados em contextos altamente variáveis, como regiões semiáridas que praticam a convivência com a seca. Essa abordagem, enraizada no princípio da subsidiariedade, enfatiza o empoderamento local dentro de um contexto global mais amplo para garantir que as soluções sejam contextualmente relevantes.

Além disso, a multiplicidade de iniciativas em diferentes escalas nos territórios hídricos pode levar a uma “redundância” voluntária de soluções. Embora isso possa parecer contrário à eficiência e ao desempenho — frequentemente associados a soluções lineares —, é necessário para lidar com os impactos da variabilidade e mudanças do clima e uso do solo sobre os “territórios da água”.

A dependência excessiva de soluções baseadas em infraestrutura (*hard engineering*) também representa um problema. Embora necessárias, essas soluções podem criar vulnerabilidades a longo prazo, especialmente quando não são adaptadas a mudanças climáticas ou à degradação de sistemas antigos. Isso destaca a diferença entre uma gestão que prioriza apenas o desempenho técnico (*performing water*) e outra que valoriza a adaptação social e ambiental (*resilient water*).

A fragmentação entre políticas de diferentes setores — como agricultura, planejamento urbano e gestão hídrica — leva a alocações de recursos mal alinhadas, comprometendo estratégias integradas. Modelos de financiamento padronizados ignoram as diversidades territoriais, limitando a implementação de soluções eficazes em contextos urbanos e rurais distintos.

Desafios Sistêmicos e Operacionais

As abordagens tradicionais de planejamento partem da premissa de que clima e uso da terra são estáveis, o que já não reflete a realidade. Essa visão ultrapassada compromete a eficácia das estratégias de longo prazo, sobretudo em regiões onde a variabilidade climática é alta. Embora dados climáticos estejam disponíveis, sua utilização em políticas públicas e na tomada de decisão ainda é limitada (ver Martins, 2025).

A falta de estratégias locais para lidar com anos extremamente secos ou chuvosos provoca falhas logísticas, uso excessivo de recursos e aumento da vulnerabilidade das comunidades. A comunicação pública

durante crises climáticas — como enchentes ou secas — também é insuficiente, reduzindo a capacidade de resposta da população.

A rotatividade de lideranças e a má gestão de recursos impedem a continuidade de políticas e ações de adaptação. Isso evidencia a necessidade de maior transparência, planejamento de longo prazo e participação ativa de múltiplos atores — incluindo governos,

Outro aspecto crítico refere-se ao financiamento para construir resiliência. Além da dificuldade de acessar financiamento em meio à competição com outras demandas de investimentos ao nível de cada unidade administrativa, um dos principais entraves é o desalinhamento territorial dos instrumentos de financiamento usados para desenvolver soluções adaptadas ao nível de território. Esses instrumentos, frequentemente caracterizados por uma estrutura rígida de investimentos predefinidos, restringem ou dificultam o envolvimento de atores locais, em suas diversas escalas, na concepção, implementação e operação das soluções.

No campo da capacitação e comunicação, recomenda-se definir estratégias eficazes para a educação/capacitação e comunicação sobre mudanças climáticas e água no contexto da gestão adaptativa que incluam o foco tanto nos problemas quanto nas soluções, a conexão de questões globais com as locais, a incorporação de atividades práticas e recursos digitais, o entendimento do conceito de risco e a promoção de um senso de justiça ambiental no processo de gestão adaptativa. De forma estratégica, recomenda-se integrar a educação sobre mudanças climáticas, água e adaptação nos currículos, para proporcionar desenvolvimento não somente profissional, técnico e científico, mas tornar a sociedade “agentes da mudança”. Nesse sentido, as prioridades incluem: 1. Dar foco em Soluções e Problemas; 2. Conectar Questões Globais às realidades locais; 3. Integrar Mudanças Climáticas e Segurança hídrica em projetos de extensão; 4. Incentivar Atividades Práticas e Recursos Digitais; 5. Estimular Reflexões sobre Justiça Ambiental e Impacto Social; 6. Apoiar o Desenvolvimento e Apoio Profissional no contexto de ciência cidadã; 7. Capacitar Alunos como Agentes de Mudança; 8. Repensar a Infraestrutura Escolar à luz das novas demandas climáticas e ambientais.

Desafios de monitoramento e Sistema de Informações

A perspectiva de construir estratégias para adaptação tem fundamento em entendimento de processos hidrológicos. A ciência hidrológica,

apesar dos avanços na utilização de modelos não só como ferramentas para planejamento, mas conhecimento da natureza física de processos hidrológicos, só se sustenta em função da relevância do monitoramento e a fundação dos sistemas informações e sua disponibilização em formato aberto, como os exemplos já consolidados como o Sistema Nacional de Informações sobre recursos Hídricos (SNIRH).

Neste contexto o futuro de planejamento vai requerer mais informações integradas e de natureza multidisciplinar, para com base em cenários futuros e avaliação de incertezas para permitir: (i) avaliar a magnitude e a natureza das mudanças climáticas e seus impactos sobre bacias hidrográficas considerando aspectos de downscaling e dinâmicas espaciais e temporais (ii) estabelecer a capacidade dos ecossistemas de se adaptarem naturalmente ou por meio de intervenção gerenciada às mudanças climáticas e das dinâmicas hidrológicas; (iii) considerar o aumento futuro da população e das atividades econômicas, com impactos potenciais sobre os recursos naturais; (iv) permitir estabelecer critérios para dimensionamento de infraestrutura hídrica e (v) a adaptação da sociedade humana por meio das respostas lógicas de indivíduos, empresas, mudanças políticas e segurança, no contexto da ciência cidadã e da socio-hidrologia.

A adaptação às mudanças climáticas precisa ser dinâmica, e é necessário considerar questões institucionais, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos em processos integrados orientados ao desenvolvimento. Mas a garantia de efetividade está no reconhecimento tácito que manter sistemas de informações hidrometeorológicas e garantia de efetividade de planejamento e execução consistente de medidas resilientes para a adaptação às alterações climáticas.

Integração de ações

Políticas e programas são frequentemente concebidos, implementados e operados de forma isolada, sem coordenação ou sinergia, desconsiderando seus impactos mútuos. Modelar soluções com base no nexus água-alimentos-energia-meio ambiente é fundamental para desenvolver abordagens integradas que combinem dados setoriais, promovam a colaboração entre políticas públicas e programas e evitem o desperdício de esforços. Promover essa integração exige:

- Coordenação multinível: articular níveis nacional, estadual, municipal e de bacias hidrográficas, com papéis bem definidos e canais de decisão e financiamento coerentes.
- Portfólios combinados: integrar infraestrutura cinza com soluções baseadas na natureza, gestão da demanda, instrumentos econômicos e governança adaptativa.
- Redundância inteligente e flexibilidade: prever alternativas operacionais para choques, incluindo gatilhos que ampliem a resposta em anos de seca ou cheias extremas.
- Financiamento e regulação calibrados ao território: substituir modelos padronizados por arranjos adequados a cada contexto, que incentivem monitoramento, transparência e prestação de contas.
- Capacitação e circulação de informação: transformar dados climáticos em insumos efetivos para decisões, fortalecendo serviços de extensão técnica e a comunicação de riscos com gestores e comunidades.

Em síntese, avançar da água “performativa” para a água “resiliente” requer reduzir a fragmentação institucional, planejar para a variabilidade e acoplar políticas pelo nexo. Isso alinha o capítulo à segurança hídrica como objetivo público: garantir funções ecossistêmicas, qualidade de vida e continuidade dos serviços, hoje e no futuro.

MUDANÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – VISÃO DA ANA

A intensificação dos eventos climáticos extremos e as alterações progressivas no regime hidrológico brasileiro têm pressionado os sistemas de gestão de recursos hídricos a operar além de sua capacidade institucional, normativa e financeira. A crise climática não apenas exacerba os riscos hidrológicos existentes, como também evidencia as limitações estruturais do modelo atual de governança da água, ainda fortemente baseado em pressupostos de previsibilidade, estabilidade e compartimentalização setorial. Nesse contexto, torna-se urgente compreender os principais desafios que dificultam a adaptação do setor de recursos hídricos às novas condições impostas pela variabilidade e mudança do clima.

A seguir, são apresentados alguns dos principais entraves que afetam a efetividade da gestão hídrica no Brasil em um cenário de transformação climática. Esses desafios, embora distintos, estão interligados e demandam abordagens articuladas e sistêmicas. Desde a dificuldade em utilizar cenários climáticos de forma padronizada e prática, passando pela necessidade de lidar com incertezas profundas e marcos legais ainda rígidos, até as fragilidades institucionais, orçamentárias e políticas que ameaçam a sustentabilidade do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), cada um desses pontos representa um aspecto crítico a ser enfrentado com prioridade.

Os desafios elencados evidenciam que a adaptação do setor hídrico à mudança do clima exige mais do que ajustes pontuais ou ações isoladas. Requer uma transformação profunda nos instrumentos legais e de planejamento, no modelo de financiamento, na integração entre políticas públicas e na própria cultura de tomada de decisão. O reconhecimento dessas fragilidades é o primeiro passo para a construção de soluções estruturantes, ancoradas em evidências, flexibilidade institucional, inovação e justiça climática.

i. Padronização e uso de cenários climáticos

- Falta de padronização metodológica dificulta a aplicação de cenários climáticos no planejamento hídrico.
- Escassez de projeções regionais e ausência de downscaling comprometem a utilidade local dos modelos climáticos.
- O SNIRH representa uma alternativa de baixo arrependimento para integrar dados e disseminar metodologias padronizadas.

ii. Gestão das incertezas profundas

- A imprevisibilidade climática demanda abordagens mais robustas e flexíveis de tomada de decisão.
- Adoção de métodos de tomada de decisão sob profunda incerteza (como por exemplo, *robust decision making* e *decision scaling*) que possibilita testar políticas sob múltiplos futuros possíveis.
- A gestão adaptativa, baseada em ciclos iterativos de planejamento e revisão, exige marcos legais que permitam ajustes dinâmicos.

- Estudos de risco são essenciais para subsidiar decisões em contextos incertos, promovendo resiliência institucional.

iii. Rigidez dos marcos legais e regulatórios

- A Lei nº 9.433/1997 e seus instrumentos foram concebidos sob pressupostos de estacionariedade, limitando sua aplicação atual.
- A PNMC ainda não está plenamente integrada à política de recursos hídricos, criando um vácuo regulatório.
- É necessário aprimorar os instrumentos da PNRH (planos de bacia, outorga, enquadramento) para incorporar critérios de adaptação climática, cláusulas adaptativas e revisões periódicas.

iv. Fragmentação institucional e falta de coordenação

- Falta de articulação entre políticas de gestão hídrica, desastres, território e clima dificulta a atuação coordenada.
- Ausência de plataformas integradas de dados, objetivos comuns e canais formais de cooperação reduz a efetividade das políticas públicas.
- O redesenho da governança com foco em sinergias multissetoriais é essencial para promover soluções integradas e preventivas.

v. Implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SbNs)

- Dificuldade em quantificar benefícios das SbNs com métricas reconhecidas pelos sistemas tradicionais de avaliação.
- Ausência de marcos legais, critérios normativos e incentivos financeiros específicos limita sua inserção no planejamento hídrico.
- É necessário desenvolver abordagens híbridas e metodologias padronizadas que valorizem os múltiplos benefícios das SbNs.

vi. Financiamento insuficiente e descontinuado

- O setor de recursos hídricos permanece subfinanciado, com forte dependência de recursos públicos instáveis.

- Usuários e gestores enfrentam dificuldades para acessar linhas de financiamento climático devido à complexidade dos editais e à falta de capacitação técnica.
- Projetos sem incorporação de risco climático limitam o acesso a fundos nacionais e internacionais.
- Guias orientativos claros e acessíveis são necessários para facilitar o acesso a fontes de financiamento da adaptação hídrica.

vii. Fragilidade política e risco para o SINGREH

- A instabilidade institucional, os cortes orçamentários e a rotatividade de equipes enfraquecem o SINGREH.
- Falta de integração entre políticas de água e clima impede a consolidação de uma agenda de adaptação como política de Estado.
- Reformas legais, blindagem orçamentária e governança orientada por evidências são fundamentais para garantir a sustentabilidade das políticas públicas hídricas em um contexto de crise climática.

UM CAMINHO A SEGUIR: INTEGRAÇÃO CIÊNCIA - POLÍTICA PARA A SEGURANÇA HÍDRICA

Para enfrentar os desafios apontados, é fundamental adotar modelos integrados de gestão da água, baseados em dados, que conectem estratégias locais, regionais e nacionais. Estes modelos precisam ser flexíveis, capazes de incorporar mudanças climáticas e de uso do solo, e devem fomentar a colaboração entre setores para garantir coerência nas políticas e eficiência no uso dos recursos.

A adoção consciente de soluções “redundantes” pode, nesse contexto, ser uma vantagem, ao garantir alternativas diante de incertezas. Fortalecer o uso de informações climáticas, por meio de ferramentas como o Monitoramento e “Previsão” de Secas no Brasil, é vital para apoiar políticas públicas e melhorar o gerenciamento de riscos. Melhor comunicação, participação dos atores locais e transparência institucional são essenciais para a preparação e resposta a crises, garantindo que os aspectos técnicos e sociais da gestão da água sejam integrados.

Superar os obstáculos estruturais e operacionais exige uma nova abordagem de gestão hídrica que priorize resiliência, adaptabilidade e in-

clusão, indo além da eficiência técnica tradicional. Modelos orientados por dados e apoiados por ampla participação social são fundamentais para construir sistemas hídricos sustentáveis, capazes de enfrentar as incertezas de um clima em transformação e atender às necessidades hidrológicas e humanas.

Responder aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos requer mais do que gerar novos dados ou desenvolver tecnologias: é preciso garantir que o conhecimento científico se traduza em ação concreta, orientando políticas e decisões no tempo certo. Essa aproximação ainda enfrenta barreiras — diferenças de linguagem, ritmos e prioridades — que reduzem o potencial de respostas integradas e efetivas.

Enquanto a ciência oferece diagnósticos sólidos, cenários prospectivos e soluções inovadoras, a gestão opera sob pressões imediatas, restrições orçamentárias e exigências políticas. Reduzir esse descompasso implica investir em canais permanentes de diálogo, consolidar a confiança entre atores e reconhecer o papel estruturante da ciência na formulação de políticas públicas.

A governança adaptativa deve ir além da formalidade institucional e assumir o papel de articulação viva entre diferentes saberes e setores, capaz de lidar com riscos e incertezas. Aproximar ciência e políticas públicas não é apenas uma estratégia técnica, mas um compromisso político e social com a segurança hídrica e com a construção de um futuro mais resiliente.

Integrar evidências científicas ao núcleo das decisões sobre água amplia a capacidade de resposta, potencializa a resiliência dos sistemas de gestão e protege, de forma sustentável, um recurso vital à vida e ao desenvolvimento. O desafio — e também a oportunidade — está em fazer dessa integração uma prática constante, para que a melhor ciência disponível não apenas informe, mas impulse ações concretas na ponta.

Nesse processo, as associações técnicas e científicas desempenham papel estratégico. No Brasil, a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) e a Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID) têm contribuído para a difusão de conhecimento, a formação de profissionais e o diálogo entre ciência, sociedade e políticas públicas. Sua atuação é essencial para fortalecer a governança, promover inovação e ampliar a participação social nas agendas de adaptação e resiliência.

Em escala internacional, iniciativas como a International Association of Hydrological Sciences (IAHS) e sua atual Década Científica HELPING (Hydrology Engaging Local People IN one Global world, 2023-2032), reforçam a necessidade de aproximar ciência e prática, construindo soluções em parceria com comunidades locais. Alinhar os esforços nacionais a esses movimentos globais amplia a capacidade do Brasil de enfrentar os impactos da crise climática sobre a água e de avançar rumo a uma segurança hídrica sustentável.

A relevância conceitual das questões relativas à mitigação de emissões e adaptação tomou uma dimensão de estratégia nacional de planejamento em Ciência, Tecnologia e Inovação. A Conferência Livre “Segurança Hídrica e Sociedade” (2024), com a organização conjunta do INCT ONSEAdapta e a ABRHIDRO, sintetizou uma contribuição relevante voltada às políticas públicas, com a inserção dessa temática na 5a Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (5a CNCTI -<https://5cncti.org.br/>), em 2024, que configurou “*um importante espaço de diálogo entre diferentes atores da sociedade para refletir sobre o papel da CT&I no país e seu rumo nos próximos anos*”.

REFERÊNCIAS

Almeida, C. Water quality management, Governance, and Socio-hydrology: strategies for an Urban Basin. Thesis. Federal University of Parana. 271p. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH). Brasília, 2019a. 112 p.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2022.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2024.

Arias, P.A., et al. (2021). Technical Summary. 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144, doi:10.1017/9781009157896.002.

Benso, M. R., Gesualdo, G. C., Silva, R. F., Silva, G. J., Castillo Rápalo, L. M., Navarro, F. A. R., Marques, P. A. Marengo, J. A., Mendiondo, E M (2023), Review arti-

cle: Design and evaluation of weather index insurance for multi-hazard resilience and food insecurity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*,

Benso, M. R., Silva, R. F., Chiquito Gesualdo, G., Saraiva, A. M., Delbem, A. C. B., Marques, P. A. A., Marengo, J. A., and Mendiondo, E. M. (2025) A data-driven framework for assessing climatic impact drivers in the context of food security, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 25, 1387–1404, <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1387-2025>.

Blöschl, G., Chaffe, P.L.B., Water scarcity is exacerbated in the south. *Science* 382, 512-513 (2023). DOI:10.1126/science.adk8164.

Borges De Amorim, P.; Silva De Souza, K. I.; Chaffe, P. L. B. (2020) A web-based tool for synthesis assessments of the impacts of climate change on water resources. *Environmental Modelling & Software*, v. Online First, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104848>

Borges, PB, Chaffe, P.B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change* 155, 37–57 (2019). <https://bit.ly/429nust>

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2024. 154 p.

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2023. 118 p.

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.-- Brasília : ANA, 2022. 132p.

Brêda, J. P. L. F.; Paiva, R.C.D. et al., (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *CLIMATIC CHANGE*, v. 158, p. 1-20, 2020.

Brêda, J. P. L., de Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619, 129284.

Canamary, E. C.; Reis Junior, Dirceu Silveira; Martins, Eduardo Sávio P. R. Evaluation of ensemble SPI forecasts for Ceará, Northeastern Brazil. In: *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Editors: Joaquin Andreu, Abel Solera, Javier Paredes-Arquiola, David Haro-Monteagudo, Henny van Lanen. CRC Press, DOI: 10.1201/b18077-42, 2015.

Cancelliere, A., Mauro, G. D., Bonaccorso, B., & Rossi, G. Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management*, 21(5), 801–819. <http://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>, 2006.

CEMADEN (2024). Nota Técnica Nº 679/2024/SEI-CEMADEN: Análise das Secas no Brasil: Diagnóstico e Projeções Futuras. Brasília: CEMADEN

Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., and Siqueira, V. A.: CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2075–2096, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020>, 2020.

Chagas, V.B.P., Chaffe, P.L.B. & Blöschl, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nat Commun* 13, 5136 (2022a). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>

Fava, M C, Abe, N, Restrepo-Estrada, C E, Kimura, B, Mendiondo, E M (2018) Flood Modelling Using Synthesized Citizen Science Urban Streamflow Observations, *Journal of Flood Risk Management*, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12498>

Furquim, G., Pessin, G, Faisal, B, Ueyama, J., Mendiondo, E M (2016) Improving the accuracy of a flood forecasting model by means of machine learning and chaos theory, *Neural Computing and Applications* 27(5): 1129–1141, <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1930-z>.

Gesualdo, G. C., M R. Benso, K Sass, E M Mendiondo (2024) Index-based insurance to mitigate current and future extreme events financial losses for water utilities, *Int. J. Dis. Risk Reduction*, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104218>

Gutiérrez, A.P.A.; Engle, N.L.; de Nys, E.; Molejón, C.; Martins, E.S. Drought preparedness in Brazil. *Weather Clim. Extrem.*, 3, 95–106, 2014.

Guzman, D A, Mohor, G S, Mendiondo, E M, (2020) Multi-Year Index-Based Insurance for Adapting Water Utility Companies to Hydrological Drought: Case Study of a Water Supply System of the Sao Paulo Metropolitan Region, Brazil, *Water*, <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/2954>

Hirata, R. e Conicelli, B. P. . Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. *Anais da ABC*, v. 84, n. 2, p. 297-312.

Hirata, R., Goodarzi, L., Rörig, F.S. *et al.* Climate change impacts on groundwater: a growing challenge for water resources sustainability in Brazil. *Robust decision making* 197, 784 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14235-8>.

Horita, F, Albuquerque, J P, Degrossi, L C, Mendiondo, E M, Ueyama, J, (2015) Spatial decision support system for flood risk management in Brazil with volunteered geographic information and wireless sensor networks, *Computers & Geosciences* 80: 84-94, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.001>

Horita, F, Albuquerque, J P, Marchezini, V, Mendiondo, E M (2017) Bridging the gap between decision-making & emerging big data sources: Application of model-based framework to disaster management in Brazil, *Decision Support Systems*, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.03.001>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Dados populacionais e distribuição regional no Brasil. Rio de Janeiro, 2023.

Kozak, Caroline ; Leithold, Juliana ; do Prado, Luciane Lemos ; Knapik, Heloise Garcia ; de Rodrigues Azevedo, Júlio César ; Braga, Sérgio Michelotto ; Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo . Adaptive monitoring approach to assess dissolved organic matter dynamics during rainfall events. ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT, v. 193, p. 423, 2021.

Kreibich, H., Van Loon, A.F., Schröter, K. *et al.* The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. Nature 608, 80–86 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>

Lavaysse, C., Vogt, J., & Pappenberger, F. (2015). Early warning of drought in Europe using the monthly ensemble system from ECMWF. Hydrology and Earth System Sciences, 19(7), 3273–3286. <http://doi.org/10.5194/hess-19-3273-2015>

Martins, Eduardo S. P.R., Vulnerabilidades e desafios para a segurança hídrica (regiões e setores) e arranjos de governança, Em: Mudanças Climáticas: Adaptação, Resiliência e Controle de Riscos, PAINEL – 2º FÓRUM BRASIL DAS ÁGUAS, João Pessoa, 2025.

Martins, Eduardo Sávio P.R. An analysis of past seasonal forecasts for the Northeast Region: Why do we need to change our Climate Forecasting System? (*In Portuguese*). In: XIV International Climate Assessment Workshop for the Northeast Region, Fortaleza, 2012.

Martins, Eduardo Sávio P.R.; Reis Junior, Dirceu Silveira. Drought impacts and policy responses in Brazil: The Case of the Northeast Region. In: GAR Special Report on Drought, 2021, ed.1. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.

Martins, Eduardo Sávio P.R.; Teixeira, Francisco José Coelho; Conejo, João Gilberto Lotufo; Machado, José; Moura, Antônio Divino. Crisis, Opportunity, and Leadership,. In Drought in Brazil: Proactive Management and Policy, CRC Press, 19-26, 2016a.

MCTIC. Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. ENCTI 2016-2022. 2016.

Miranda, P. T., Petry, I., Alves, W. R. G., Fernandez, G. M. R., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Fagundes, H., Rossi, J. B., Kolling Neto, A., Abdalla Araujo, A., & Souza, S. (2024). SACCI-CMIP6: South American Climate Change Impacts on floods and droughts (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15398093>

Mohor, G. S., Mendiondo, E M (2017) Economic indicators of Hydrologic Drought Insurance Under Water Demand & Climate Change Scenarios in a Brazilian Context, Ecol. Economics, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.014>

OMM - Organização Meteorológica Mundial (2023) Early Warnings for All Initiative. Geneva: OMM, <https://wmo.int/activities/early-warnings-all>

Oodarzi, L. ; Hirata, R. ; Andrade, L. C. . Managed aquifer recharge in São Paulo state, Brazil: opportunities for facing global climate change issues. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, p. 666, 2024.

Paiva RCD de, Chaffe PLB, Anache JAA, Fontes AS, Araujo LMN de, Araujo AN de, *et al.*. Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the XXIII Brazilian Water Resources Symposium. RBRH. 2020;25:e50. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200136>

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Fagundes, H.O., W., Kolling, A., Castro, L., Rossi, J., Matte, G., Laipelt, L., Alves, W, Petry, I (2024). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3.

Pereira, José Marcelo Rodrigues; Vasconcelos Júnior, Francisco das Chagas; Martins, Eduardo Sávio P. R.; Reis Júnior, Dirceu Silveira; Noronha, Aurélio Wilson Tavares. Climate Seasonal Forecast and derived Indexes for droughts in Ceará, Brazil. In: *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Editors: Joaquin Andreu, Abel Solera, Javier Paredes-Arquiola, David Haro-Monteagudo, Henny van Lanen. CRC Press, DOI: 10.1201/b18077-53, 2015.

Petry, I., Miranda, P. T., Paiva, R. C. D. D., Collischonn, W., Fan, F. M., Fagundes, H. D. O., ... & Souza, S. (2025). Changes in flood magnitude and frequency projected for vulnerable regions and major wetlands of south America. *Geophysical Research Letters*, 52(5), e2024GL112436. <https://doi.org/10.1029/2024GL112436>

Prudhomme, C., Shaffrey, L., Woolings, T., Jackson, C., Fowler, H, Anderson, B. (2015). IMPETUS: Improving Predictions of Drought for User Decision-Making. In: Andreu et al. (Eds.), *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Taylor & Francis Group, London, p. 273-278.

Prudhomme, C., Shaffrey, L., Woolings, T., Jackson, C., Fowler, H, Anderson, B. (2015). IMPETUS: Improving Predictions of Drought for User Decision-Making. In: Andreu et al. (Eds.), *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Taylor & Francis Group, London, p. 273-278.

Ramirez, S. B., Meerveld, I., Seibert, J. Citizen Science approaches for water quality measurements. *Science of Total environment*, 897, 2023.

Restrepo-Estrada, C. E., Andrade, S., de Albuquerque, J P, Mendiondo, E M (2018_ Geo-social media as a proxy for meteorological data for flood monitoring, *Computer and Geosciences*, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.010>

Ribeiro, N. B.; Formiga-Johnsson, R. M. Discussões sobre governança da água: tendências e caminhos comuns. *Ambiente & Sociedade*, v. 21, 2018.

Sarmiento-Buarque, A C, Souza, C. F., Souza, F. A. A., Mendiando, E M *et al* (2021) Urban flood risk under global changes: a socio- hydrological and cellular automata approach, *Hydrol. Sci. J.*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1977813>

Schroeter, S.A., Orme, A.M., Lehmann, K. *et al.* Hydroclimatic extremes threaten groundwater quality and stability. *Nat Commun* 16, 720 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55890-2>

Scott, C. A.; Meza, F. J.; Varady, R. G.; Tiessen, H.; Garfin, J. M.; Wilder, G. M.; Farfán, L. M.; Pablos, N. P.; Montaña, E. (2013) Water Security and Adaptive Management in the Arid Americas, *Annals of the Association of American Geographers*, 103:2, 280-289.

Shafiee-Jood, M., Cai, X., Chen, L., Liang, X.-Z., & Kumar, P. Assessing the value of seasonal climate forecast information through an end-to-end forecasting framework: Application to U.S. 2012 drought in central Illinois. *Water Resources Research*, 50(8), 6592–6609. <http://doi.org/10.1002/2014WR015822>, 2014.

Silva, R. F.; Benso, M. R.; Gesualdo, G. C.; Mendiando, E M.; Saraiva, A. M.; Marques, P. A. A.; Delbem, A C. B. (2021) Multi-objective methods for crop insurance premiums: framework proposal and a case study in sugarcane. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA (SBIAGRO), 13. , 2021, Anais [...]. Porto Alegre: Soc. Bras. Compt, 2021 . p. 225-233. ISSN 2177-9724. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbiagro.2021.18394>.

Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS. Abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil. Brasília, 2022.

Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., *et al.* (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., *et al.* (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

Souza Filho, F.A., Lall, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm. *Water Resources Research*, 39 (11), 1307, doi:10.1029/2002WR001373, 2003.

Souza, F F A, Bhattacharya-Mis, N., Sarmiento-Buarque, A. C., Taffarello, D, Mendiando, E M *et al*, Blue and grey urban water footprints through citizens' perception and time series analysis of Brazilian dynamics, *Hydrol. Sci. J.*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1879388>

Souza, I. A., Silva, V. A. (2025) Flood prediction in Brazil: A review of trends, gaps and methodological perspectives, *J. S. Am. Earth Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105637>

- Steinemann, A. C. Using climate forecasts for drought management. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), 1353–1361, 2006.
- Sun, L., Moncunill, D. F., Li, H., & Moura, A. D. Climate downscaling over Nordeste, Brazil, using the NCEP RSM97. *Journal of Climate*, 18(4), 2005.
- Taffarello, D, Sass, K., Bittar, M., Mendiondo, E M (2020), Ecosystem Service Valuation Method through Grey Water Footprint in Partially-Monitored Subtropical Watersheds, *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139408>
- Uchôa, J.G.S.M., Oliveira, P.T.S., Ballarin, A.S. *et al.* Widespread potential for streamflow leakage across Brazil. *Nat Commun* 15, 10211 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54370-3>
- UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/279716>
- UNESCO (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. 139 p. ISBN 978-92-3-100264-9.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR (2021). GAR Special Report on Drought 2021. Geneva.
- Vörösmarty, C. J.; Osuna, V. R.; Cak, A. D.; Bhaduri, A.; Bunn, S. E.; Corsi, F.; Uhlenbrook, S. Ecosystem-based water security and the sustainable development goals. *Ecology & Hydrobiology*, v. 18, n.4, p. 317-333, 2018.
- Werner, M, Vermooten, S., Iglesias, A., Maia, R., Vogt, J., Nauman, G. Developing a Framework for Drought Forecasting and Warning: Results of the DEWFORA Project. In: Andreu et al. (Eds.), *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Taylor & Francis Group, London, p. 279-286, 2015.
- Wilhite, D.A., Hayes, M.J., Knutson, C.L., Drought preparedness planning: building institutional capacity. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 93.135, 2005.
- Wood, E. F., Schubert, S. D., Wood, A. W., Peters-Lidard, C. D., MO, K. C., Mariotti, A., & Pulwarty, R. S. Prospects for Advancing Drought Understanding, Monitoring, and Prediction. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1636–1657. 2015.
- WWAP (UN World Water Assessment Programme). The UN World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO, 2015.
- Young, G.; Demuth, S.; Mishra, A.; Cudennec, C. Hydrological sciences and water security: An overview. *PIAHS-366*, pp. 1- 9, 2015.

6. OCEANO E ZONAS COSTEIRAS

Segen Farid Estefen²⁹, Moacyr Cunha de Araujo³⁰, Regina R Rodrigues³¹, Leticia Cotrim da Cunha³¹, Margareth S Copertino³², Beatrice Padovani Ferreira³³, Flavia Lucena Frédou³⁴, Ronaldo Oliveira Cavalli³², Carlos Alberto E. Garcia³², Carla de Freitas Campos³⁵, Alexander Turra³⁶, Jose Luiz Moutinho³⁷, Win Degrave³⁸, Paulo Gadelha³⁸, Leandra Regina Gonçalves³⁸, Ronaldo Christofolletti³⁸, Wania Duleba³⁶, Milena Maltese Zuffo³⁶, Andrei Polejack²⁹

INTRODUÇÃO

O oceano já absorveu 90% do excesso de calor gerado na atmosfera pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂), o principal causador do efeito estufa, além de absorver diretamente em suas águas 30% do próprio CO₂, como veremos na Seção 1 deste capítulo. Apesar disso, sua importância para a regulação do clima e, por consequência, para a vida no planeta, bem como seu potencial de contribuição para a adaptação às

29 Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas, INPO, Rio de Janeiro, RJ.

30 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, PE.

31 Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC.

32 Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Rio Grande, RS.

33 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, PE.

34 Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife, PE.

35 Fundação Osvaldo Cruz, FIOCRUZ, Rio de Janeiro, RJ.

36 Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP.

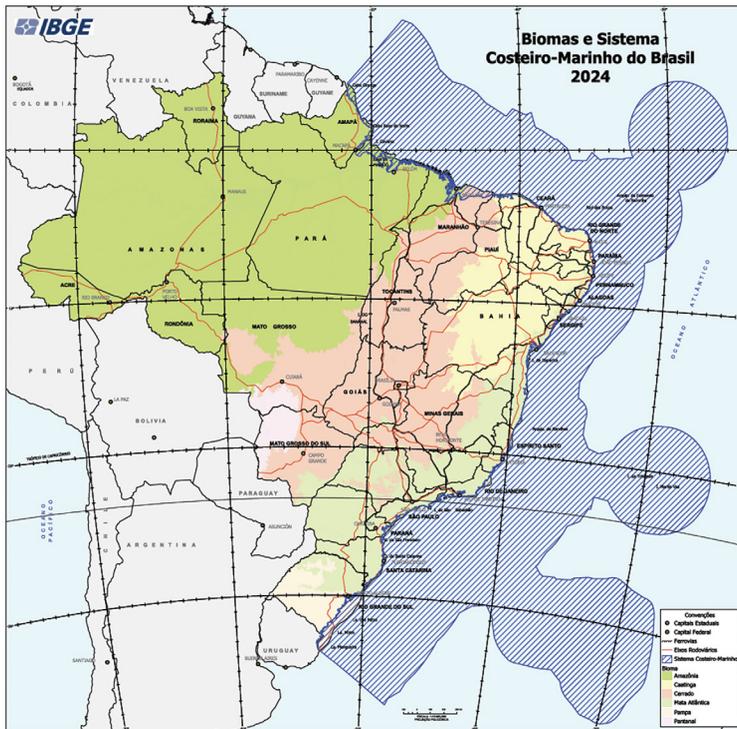
37 Ocean Quest Foundation, Thuwal, Arábia Saudita.

38 Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, Santos, SP.

Autores correspondentes: segen.estefen@inpo.org.br e moa.ufpe@gmail.com

mudanças climáticas têm permanecido pouco conhecidos pela sociedade em geral e suas lideranças políticas, econômicas e sociais.

Com mais de 8.500 quilômetros de linha de costa, o Brasil tem jurisdição sobre um total de 5,7 milhões de quilômetros quadrados de oceano, o que equivale a mais da metade do território nacional. É a chamada Amazônia Azul, que inclui a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) de 4,5 milhões de quilômetros quadrados.



O território continental e a Amazônia Azul (IBGE, 2024)

Se toda a grandeza oferece a oportunidade de aproveitamento dos recursos econômicos marinhos, também significa que o país está especialmente vulnerável aos impactos do aumento de temperatura do oceano, da elevação do nível do mar, da acidificação da água e da redução da concentração de oxigênio. A região costeira e oceânica brasileira abriga uma grande diversidade de ambientes, compreendendo lagoas, baías, enseadas, deltas de rios, planícies, manguezais, restingas, recifes de corais, pradarias de gramas marinhas e áreas de ressurgência, entre

outros. Esses ecossistemas apresentam diferentes níveis de vulnerabilidades às mudanças climáticas, como mostrado nas Seções 2 e 3.

A ciência brasileira já detectou alterações na abundância das espécies e na estrutura das comunidades de costões rochosos, praias, baías e lagoas costeiras, manguezais, bancos de macroalgas e pradarias de gramas marinhas. Especialmente impactados estão os manguezais e recifes de corais brasileiros, temas tratados nas Seções 3, 4 e 5. Embora ocupem apenas 0,1% do fundo do oceano, os recifes abrigam cerca de 25% a 30% de todas as espécies marinhas conhecidas, incluindo 65% dos peixes. São comparáveis em diversidade às florestas tropicais, sustentam comunidades humanas, fornecem alimento através da pesca, movimentam o turismo, produzem compostos bioativos com potencial farmacêutico e protegem o litoral contra a erosão causada pelas ondas. Daí os repetidos alertas da ciência para os eventos de branqueamento e morte de corais, que se intensificaram nas últimas duas décadas, afetando mais de 26 espécies. Além de seu papel na biodiversidade marinha, os recifes de corais reduzem a energia das ondas, assim protegendo a costa da erosão e das inundações.

Já no limite entre terra e mar, as florestas de manguezais, além de funcionarem como barreiras físicas à erosão, acumulam em seu solo até três vezes mais carbono do que as florestas tropicais terrestres. Além dos impactos diretos do aquecimento, estão expostas a outros estressores, como o desmatamento para a urbanização.

Se, de um lado, perdem espaço pelo desmatamento e a urbanização, de outro lado os manguezais estão sofrendo reconfigurações provocadas pelas mudanças climáticas, que os levam a tomar o espaço de outros ambientes costeiros.

O deslocamento de espécies tropicais para regiões extratropicais, em busca de águas menos quentes, é uma das consequências mais comuns do aumento da temperatura da água do mar. Na costa brasileira, tal deslocamento de espécies, das águas quentes do Nordeste para as águas mais temperadas do Sul, tem sido observado para invertebrados, peixes, macroalgas e gramas marinhas. Além do aquecimento gradual das águas, as ondas de calor marinhas no Atlântico Sudoeste (entre Cabo Frio e Argentina) vêm afetando a disponibilidade de larvas de invertebrados e reduzindo a quantidade de pescado. As consequências das mudanças climáticas para a pesca industrial e artesanal e para o setor de aquicultura estão descritas na Seção 6.

Já na Seção 7, vemos que a ciência brasileira tem uma razoável infraestrutura de monitoramento e observação oceânica e costeira; ferramentas de modelagem para previsão de tendências e uma extensa rede de cooperação nacional e global de pesquisas essenciais para compreender as mudanças no clima e no oceano, proteger os ecossistemas e apoiar políticas públicas. Mas persistem lacunas de cobertura e integração para dar conta das especificidades locais da nossa vasta Amazônia Azul.

Uma boa notícia é que, nas próprias águas costeiras e oceânicas, há oportunidades para o enfrentamento das mudanças climáticas, através de medidas de mitigação, de adaptação e mesmo uma combinação dos dois tipos. Na Seção 4, por exemplo, são destacadas as chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SBNs), que, como o nome indica, utilizam ou se inspiram em processos naturais, dos próprios ecossistemas, para enfrentar problemas ambientais. Já a Seção 8 descreve as múltiplas fontes de energia renovável disponíveis no mar – entre as quais o movimento das ondas e marés, o gradiente térmico, o vento e a possibilidade de gerar produtos a partir dessas fontes, como hidrogênio verde e água dessalinizada – para que façamos a transição energética baseada em fontes renováveis.

As quatro últimas seções desenvolvem aspectos relativamente recentes no campo das ciências do mar e das mudanças climáticas, que vão além dos aspectos físicos, biológicos e tecnológicos. Trata-se da necessidade imperativa de uma mudança de visão, de cultura e de comportamento nas instituições de Estado, no setor produtivo e na sociedade em geral. A Seção 9 mostra que é imprescindível compreendermos a relação entre oceano e saúde, lembrando que o mar é, ao mesmo tempo, fonte de bem-estar físico e mental e vetor de doenças. Por isso deve ser incorporado nas políticas de saúde pública.

O desenvolvimento de uma justiça climática, capaz de levar em conta as disparidades dos impactos das mudanças do clima, que afetam com mais intensidade as populações mais frágeis do ponto de vista econômico e social, é o tema da Seção 10. Por sua vez, a Seção 11 descreve esforços numa área em que o Brasil é protagonista: a disseminação, através de ações de educação e comunicação, de uma cultura oceânica – ou seja, a compreensão de como o oceano está presente e afeta nossas vidas, mesmo para quem vive longe dele, e de como nossas ações também o afetam.

Finalmente, a Seção 12 mostra que, para que as ideias, tecnologias e ações propostas para o enfrentamento dos impactos da crise climática

no oceano sejam implementadas e funcionem, é fundamental estabelecer uma governança oceânica e costeira, com a estruturação de normas, instituições, políticas e práticas voltadas à mitigação dos impactos e à adaptação. A interseção dos regimes de governança do oceano e do clima representa não apenas uma necessidade ambiental urgente, mas também uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática do Brasil no cenário internacional.

6.1 Clima e oceano

Regina R. Rodrigues

Cobrindo 70% da superfície da Terra, o oceano desempenha um papel crucial na regulação do clima do planeta e é essencial para nossa resposta ao aquecimento global, causado pelos gases de efeito estufa gerados pelas atividades humanas, e suas conseqüentes mudanças climáticas. Em seu papel de regulador do clima, o oceano já absorveu 90% do excesso de calor gerado na atmosfera (1) pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂), o maior causador do efeito estufa, além de absorver diretamente em suas águas 30% do próprio CO₂.

O aquecimento provoca a elevação do nível do mar, devido à expansão térmica da água do oceano e ao derretimento acelerado das camadas de gelo do planeta. Além disso, o aumento da temperatura da água também significa a redução da concentração de oxigênio e nutrientes presentes no mar e essenciais à manutenção da vida marinha. Esta ainda é prejudicada pelo CO₂ absorvido pela água, que fica mais ácida. A combinação de aquecimento, desoxigenação e acidificação do oceano tem um impacto devastador para os ecossistemas marinhos, principalmente em áreas de alta produtividade biológica e importância econômica.

Se, de um lado, o oceano ajuda a reduzir a concentração de carbono na atmosfera, mitigando o aquecimento do ar, por outro lado contribui, com suas águas mais quentes, para os eventos climáticos extremos, como secas, excesso de chuvas e furacões, que se tornaram mais frequentes e intensos.

O conteúdo de calor na água do mar tem aumentado constantemente desde o início das medições em 1955, quebrando recordes em 2023, conforme mostrado na Figura 1. A maior parte da energia adicional é armazenada em uma camada superficial, de 0 a 700 metros de profundidade. E desde pelo menos o século 19, quando a temperatura de suas águas começou a ser medida, os últimos 10 anos foram a década mais quente do oceano. O recorde foi registrado em 2024.

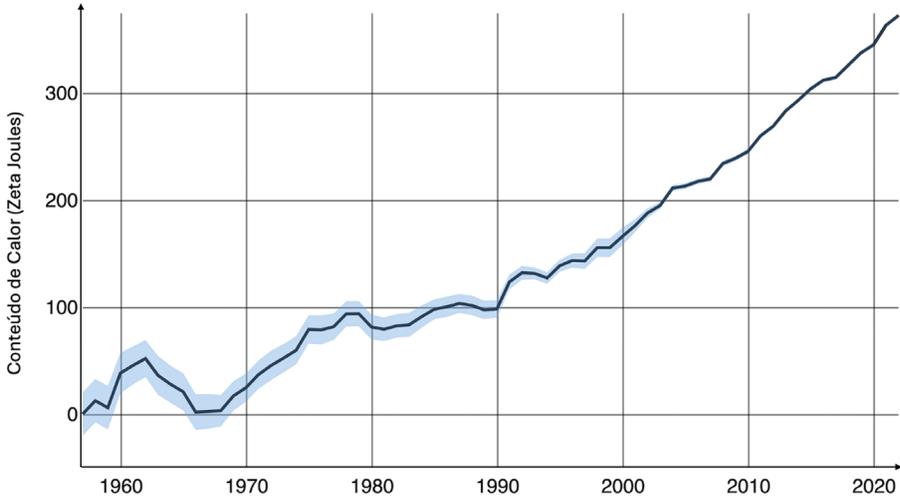


Figura 1: Estimativas anuais de conteúdo de calor para os primeiros 2.000 metros de profundidade do oceano em Zeta Joules (1021 Joules). Cada ponto representa uma média de cinco anos. A região sombreada em azul indica a margem de incerteza dentro do intervalo de confiança de 95%. Fonte: *Climate NASA*.

Todo esse calor adicional leva a mais eventos de temperatura extrema no oceano, chamados de ondas de calor marinhas. Estudos recentes, de caráter global, mostram um aumento significativo na frequência, duração e intensidade das ondas de calor marinhas em todo o planeta (2,3). Outras pesquisas foram conduzidas para eventos específicos que ocorreram no Pacífico Norte, Atlântico Norte, Austrália Ocidental e Mar Mediterrâneo (4,5).

As ondas de calor marinhas podem ser causadas por processos atmosféricos ou oceânicos, dependendo do evento e da localidade (6). Têm um impacto devastador para ecossistemas marinhos (7). Por exemplo, o evento que ocorreu no Mediterrâneo em 2003 causou uma mortalidade em massa de pelo menos 25 espécies de invertebrados de costões rochosos (8). Já a onda de calor marinha que ocorreu no noroeste do Oceano Atlântico em 2012 teve um impacto nos pescados de grande importância comercial (9). As ondas de calor podem ter efeitos negativos até em aves e outros animais marinhos (10).

Um estudo em nível global avaliou os impactos das ondas de calor marinhas para as sociedades humanas. Os danos ecológicos, que variaram desde proliferação de algas nocivas e eventos de mortalidade

em massa até reconfigurações de ecossistemas inteiros, resultaram em custos econômicos superiores a US\$ 800 milhões em perdas diretas e US\$ 3,1 bilhões em perdas indiretas de serviços ecossistêmicos por vários anos (11).

O nível do mar já subiu mais de 101 milímetros desde o início das medições em 1992, aumentando as inundações costeiras em alguns locais. De um terço a metade dessa elevação é atribuído à expansão da água pelo calor armazenado (12). Mas esta não é a única razão. O calor adicional no ar e no oceano também está derretendo as camadas de gelo e geleiras do planeta, o que adiciona água doce ao oceano e eleva ainda mais o nível do mar (13).

O gelo marinho também se derrete e, embora não afete o nível do mar, impacta as temperaturas globais: o gelo marinho tem coloração clara e reflete a luz solar de volta para o espaço; já as águas abertas são mais escuras e absorvem mais luz solar. O aquecimento das águas oceânicas derrete o gelo marinho por baixo; o ar mais quente ajuda a derretê-lo por cima. À medida que a camada de gelo se afina e encolhe, mais oceano fica exposto e menos luz solar é refletida, aquecendo ainda mais a água e o ar.

As correntes oceânicas são transportadoras vitais de calor ao redor do planeta. À medida que as camadas de gelo da Groenlândia e da Antártida derretem, o excesso de água doce que corre para o oceano pode perturbar o equilíbrio de temperatura e salinidade que impulsiona as correntes oceânicas profundas. A circulação profunda do oceano pode ficar mais lenta.

Quanto mais quente estiver o oceano, mais energia e umidade ele fornece para a atmosfera. Por isso é capaz de alimentar tempestades extremas, como furacões, tufões, ciclones tropicais ou extratropicais. Essas tempestades precisam de água quente para se formar e se fortalecer. Pesquisas recentes apontam para o aumento das temperaturas oceânicas como um fator-chave para a rápida intensificação de furacões (14). Além disso, níveis mais altos do mar agravam as inundações causadas por marés de tempestade quando esta se desloca sobre o litoral.

O oceano também atua como uma esponja que absorve dióxido de carbono da atmosfera. O aumento das emissões de CO₂ pelas atividades humanas e sua absorção pelo oceano faz com que a água se torne mais ácida, o que está acontecendo agora a uma taxa mais rápida do que em qualquer outro momento nos últimos 300 milhões de anos.

À medida que o oceano se torna mais ácido, os corais e outros organismos marinhos têm dificuldade para formar suas estruturas e sua velocidade de crescimento diminui. Isso ocorre porque os esqueletos de coral são feitos de um tipo de carbonato de cálcio. Quando o dióxido de carbono vindo da atmosfera é adicionado à água, ocorrem reações químicas que levam à ligação de íons carbonato com o excesso de íons de hidrogênio em vez de íons de cálcio. Isso prejudica a calcificação dos esqueletos de diversos animais marinhos. Se a água se tornar muito ácida, pode até dissolver essas estruturas. As ondas de calor marinhas estão complicando a situação, tornando a água quente demais para a sobrevivência de muitos corais. As previsões atuais para as emissões de gases de efeito estufa colocam quase todos os corais de recife em um caminho de quase extinção, se não houver intervenção humana. Tomar medidas urgentes para atingir os níveis de emissão pré-industriais permitirá que os corais e outras formas de vida se recuperem.

No Brasil, a pesquisa sobre oceano e clima tem avançado. Estudos recentes identificaram a ocorrência de extremos oceânicos no Atlântico Sul, não só de ondas de calor marinhas e sua ligação com extremos de precipitação sobre o Brasil (15), mas também de acidificação e baixa concentração de clorofila (16), com seus impactos no branqueamento dos corais (17). Outros estudos mostram que ondas de calor marinhas estão impactando espécies ao longo da costa brasileira, podendo reduzir a ocorrência de espécies de interesse comercial (18).

À medida que aumentam os desafios dos extremos oceânicos para as áreas costeiras, medidas de mitigação (redução das emissões de gases do efeito estufa, para não agravar as mudanças climáticas) e de adaptação às mudanças já instaladas (para aumentar a resiliência dos ecossistemas e das populações costeiras), devem ser objetivos-chave no planejamento e implementação de políticas públicas nas zonas costeiras. O oceano oferece muitas oportunidades de mitigação e adaptação.

Para impedir um aumento ainda maior do aquecimento, da acidificação e da desoxigenação da água do mar, é imprescindível uma redução nas emissões dos gases do efeito estufa. Para tal, o Brasil deve fazer uma transição para energia renovável. E o oceano oferece grandes oportunidades, como implementação de energia eólica offshore e energia das marés. O Brasil deve desenvolver pesquisas para avançar nessas áreas de grande potencial. Além disso, ambientes marinhos e costeiros têm grande capacidade de sequestro de carbono. Portanto, a preservação e restaura-

ção desses ambientes pode contribuir com a redução das emissões. Essas medidas baseadas na natureza também são eficientes em proteger as zonas costeiras contra tempestades e ressacas, ou seja, são igualmente medidas de adaptação.

A adaptação bem-sucedida baseia-se em uma ampla gama de recursos, desde a modelagem baseada na ciência até o conhecimento da comunidade local e abrange muitos tipos de intervenções, desde estruturas projetadas até as chamadas Soluções Baseadas na Natureza. Em particular, os modelos climáticos da próxima geração fornecerão detalhes sem precedentes sobre os impactos climáticos locais. Estes ajudarão a melhorar os sistemas de alerta precoce e podem ser integrados na preparação para desastres e na adaptação a longo prazo. O investimento em plataformas de observação *in situ* é necessário para melhorar as condições iniciais de previsão e fornecer a chamada “verdade do terreno” para previsões e projeções de modelos. As soluções que se adaptam às mudanças climáticas podem gerar vários cobenefícios, incluindo o progresso em direção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. A pesquisa interdisciplinar é essencial para identificar os cobenefícios e as compensações das estratégias de adaptação para otimizar seu planejamento e implementação.

REFERÊNCIAS

1. K. Von Schuckmann et al., Heat stored in the earth system: Where does the energy go? The GCOS earth heat inventory team. *Earth System Science Data Discussions*, 1-45 (2020).
2. E.C. Oliver et al., Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications* 9, 1-12 (2018).
3. J. Terhaar, F.A. Burger, L. Vogt, L., T.L. Frölicher, T.F. Stocker, Record sea surface temperature jump in 2023–2024 unlikely but not unexpected. *Nature* 639(8056), 942-946 (2025).
4. H.A. Scannell, A.J. Pershing, M.A. Alexander, A.C. Thomas, K.E. Mills, Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950. *Geophysical Research Letters* 43, 2069–2076 (2016).
5. A.J. Hobday et al., A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 141, 227-238 (2016).
6. N.J. Holbrook et al., A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nature Communications* 10, 2624 (2019).

7. D.A. Smale et al., Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change* 9, 306 (2019).
8. J. Garrabou et al., Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology* 15, 1090-1103 (2009).
9. K.E. Mills et al., Fisheries management in a changing climate: lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic. *Oceanography* 26, 191-195 (2013).
10. L.M. Cavole et al., Biological impacts of the 2013–2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: winners, losers, and the future. *Oceanography* 29, 273-285 (2016).
11. K.E. Smith et al., Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities. *Science* 374(6566), eabj3593 (2021).
12. R.J. Nicholls et al., A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change* 11(4), 338-342 (2021).
13. E. Rignot, Observations of grounding zones are the missing key to understand ice melt in Antarctica. *Nature Climate Change* 13(10), 1010-1013 (2023).
14. K.T. Bhatia et al., Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications* 10(1), 635 (2019).
15. R.R. Rodrigues, A.S. Taschetto, A.S. Gupta, G.R. Foltz, Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nature Geoscience* 12(8), 620-626 (2019).
16. R.R. Rodrigues et al., Extreme compound events in the equatorial and South Atlantic. *Nature Communications* 16(1), 3183 (2025a).
17. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Communications Earth & Environment* 6(1), 208 (2025b).
18. J.A.A. Perez, R. Sant'Ana, Tropicalization of demersal megafauna in the western South Atlantic since 2013. *Communications Earth & Environment* 3(1), 227 (2022).

6.2 Vulnerabilidade e resiliência costeira e oceânica

Moacyr Cunha de Araujo Filho

O oceano aquece mais lentamente do que a atmosfera, mas também esfria mais lentamente. A manutenção do calor acumulado na água do mar por mais tempo que o da atmosfera torna o aquecimento do oceano um processo permanente e quase irreversível. Em consequência do aumento contínuo de suas temperaturas, observado principalmente nos últimos 100 anos, a capacidade do mar de absorver o excesso de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera se reduz. Estamos perdendo progressivamente um importante aliado na luta pela redução do carbono atmosférico.

De fato, a ciência tem alertado que a “saúde” do oceano está pior do que se pensava e que o tempo para proteger os ecossistemas marinhos está se esgotando rapidamente. Duas consequências do excesso de carbono absorvido pelo mar são a acidificação (aumento da acidez) e a desoxigenação (redução do oxigênio) em suas águas, com impactos negativos para a vida marinha.

A acidificação, por exemplo, apelidada de “gêmea maligna” da crise climática, ocorre quando o dióxido de carbono é absorvido pela água do mar. O excesso de CO_2 absorvido reduz a concentração de carbonato de cálcio na água do mar, prejudicando a vida em recifes de coral e outros habitats marinhos. Em casos graves, até as conchas de moluscos marinhos, como ostras e mariscos, que dependem dessas estruturas calcificadas para sobreviver, podem se dissolver.

Até há pouco tempo, não se considerava que a acidificação houvesse ultrapassado sua “fronteira planetária”, mas um novo estudo revelou que esse limite foi atingido em 2020 e até ultrapassado em algumas regiões (1). As fronteiras planetárias representam limites naturais de sistemas globais essenciais, como o clima e a biodiversidade, além dos quais a capacidade de manter um planeta saudável pode ser comprometida. No caso da acidificação do oceano, foi constatado que em 2020 as condições médias globais estavam muito próximas do limite aceitável de redu-

ção da concentração de carbonato de cálcio nas águas do mar: não mais que 20% em relação aos níveis existentes antes da Revolução Industrial. Em algumas regiões, já haviam até ultrapassado esse limite, resultando em declínios significativos em habitats importantes, como recifes de coral tropicais e subtropicais.

Os especialistas destacam que a única maneira de lidar com a acidificação globalmente é reduzir as emissões de CO₂.

A situação na zona costeira não é menos crítica, uma vez que se trata do local onde ocorrem majoritariamente as ações humanas. Essa região tem se tornado o palco em que os efeitos das mudanças do clima são exibidos quase diariamente. Ondas de calor fortalecidas por um oceano excessivamente quente atingem nossas cidades e a saúde das populações costeiras; eventos extremos de precipitação produzem inundações e deslizamentos de encostas; e, não menos grave, o aumento contínuo do nível do mar corrói progressivamente nossa linha de costa, com uma ampla gama de consequências negativas.

Todos esses processos têm causado mortes e perdas irreversíveis e se devem em muito à elevada vulnerabilidade da nossa zona costeira, entendendo-se vulnerabilidade como a combinação entre a ação atípica de forças da natureza e a capacidade de enfrentarmos essas novas forças.

Considerando a tendência inequívoca de continuarmos aquecendo o planeta para além do 1,5°C idealizado pelo Acordo de Paris, é de se esperar que forças naturais atípicas se tornem cada vez mais frequentes e intensas até o final do século. A questão principal passa a ser, então, como podemos reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência de nossa zona costeira.

O aumento observado do nível do mar pode, por exemplo, aumentar a erosão das linhas de costa, contribuir para inundações e aumentar o fluxo de água salgada para estuários e aquíferos subterrâneos próximos do litoral, tornando a infraestrutura costeira mais vulnerável a danos causados por eventos climáticos extremos.

A verdade é que não só os níveis globais do mar estão subindo, mas a velocidade em que isso ocorre está aumentando. Esse incremento se dá, sobretudo, pela ação combinada de dois processos principais: a expansão térmica da água, à medida que ela se aquece, e a adição de água doce ao oceano por meio do derretimento de camadas de gelo terrestres e geleiras.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (2), a taxa média de elevação do nível do mar, que foi de 1,3 mm ao ano entre 1901 e 1971, subiu para 3,7 mm ao ano entre 2006 e 2018. Ou seja, a velocidade média de aumento do nível do mar praticamente triplicou nos últimos 10 anos, quando comparada ao registrado no século passado inteiro. E ainda: em 2024, com o oceano superaquecido, o nível global do mar subiu ainda mais rapidamente do que o esperado, principalmente devido à expansão da água do mar. Nos últimos anos, cerca de dois terços da elevação do nível do mar foram devidos ao derretimento de camadas de gelo e geleiras, e cerca de um terço veio da expansão térmica da água do mar. Mas em 2024 essas contribuições se inverteram, com dois terços da elevação do nível do mar vindos da expansão térmica. De acordo com a análise liderada pela NASA, a agência espacial dos Estados Unidos, a velocidade de aumento do nível médio do mar em 2024 foi de 5,9 mm por ano, superando a expectativa de que ficaria em 4,3 mm ao ano.

A ciência brasileira vem contribuindo intensamente para o entendimento do tema das vulnerabilidades e resiliência das regiões oceânicas e costeiras às mudanças climáticas. Cerca de 180 artigos científicos, livros e capítulos de livros, realizados principalmente nos últimos 15 anos, foram produzidos por equipes de pesquisadores(as) lotados(as) em instituições nacionais de ciência e tecnologia, com destaque para as equipes das universidades públicas e das sub-redes Oceanos e Zonas Costeiras da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima) e do Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas (SIMACLIM).

Os principais pontos são relacionados à ampliação do conhecimento sobre:

1. A variabilidade do fenômeno El Niño no Pacífico Sul (El Niño Southern Oscillation) e sua influência remota nos padrões de precipitação no Brasil, bem como as consequências socioeconômicas associadas.
2. A biogeoquímica marinha dos ciclos do carbono e do oxigênio, com destaque para os estudos de fluxos de CO₂, em estuários, plataformas e região oceânica, e os processos de acidificação e de redução de concentração de oxigênio dissolvido decorrentes do aquecimento da água do mar.

3. A variabilidade da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC), a principal corrente oceânica de regulação do clima. O foco das pesquisas brasileiras é a região oceânica adjacente à borda oeste do Atlântico Tropical e Sul.
4. As variações observadas no Amazon River Ocean Continuum (AROC), a região de interface do rio Amazonas com o Oceano Atlântico. Os estudos brasileiros investigam o balanço de quantidade de movimento, sal, nutrientes e calor no Atlântico tropical decorrentes das mudanças do clima.
5. A variabilidade de ocorrência e de intensidade das ondas de calor oceânicas e de suas consequências nas cidades brasileiras.
6. As alterações na variabilidade das trocas oceano-atmosfera de calor no Atlântico Tropical e Sul, derivadas das mudanças climáticas.
7. O papel do oceano Atlântico Tropical, Atlântico Sul e Antártico no aumento de intensidade e frequência de eventos climáticos extremos (excessos de precipitação e de secas) nas diferentes regiões do Brasil e da América do Sul.
8. A variação do aumento do nível do mar na borda oeste do Atlântico, com foco na análise de cenários futuros climáticos e na elevada vulnerabilidade da região costeira brasileira.
9. A perda de biodiversidade marinha brasileira derivada das mudanças do clima, e seus impactos socioeconômicos e nos serviços ecossistêmicos associados.
10. A utilização de Soluções Baseadas na Natureza como estratégia de adaptação na região costeira do Brasil, com foco na criação de Áreas Marinhas Protegidas associadas aos sistemas coralíneos e aos manguezais.
11. O papel, a importância e a viabilidade tecnológica e econômica da implantação de energias oceânicas renováveis (eólica inshore e off-shore, conversão térmica, correntes, ondas e marés) como parte do processo de transição energética em curso no Brasil.

Destaca-se também a participação de cientistas marinhos brasileiros no Capítulo de Oceano do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2021), além da elaboração da 3ª, e da 4ª Comunicação do Brasil à Convenção-quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change). Esses docu-

mentos incluíram a avaliação dos Inventários Nacionais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, cenários de projeção climática atualizados e reavaliação das vulnerabilidades e das medidas de adaptação para o país.

No que diz respeito às políticas públicas, houve participação ativa da comunidade científica marinha brasileira na coordenação dos trabalhos do GT 1 Base Científica das Mudanças Climáticas do PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2016-2017); na Rede Clima – Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (2014-2025); no CONAPA – Comitê Nacional de Pesquisas Antárticas - 2023-2025); e mais recentemente, na criação e implantação do INPO – Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (2023-2024).

Internacionalmente, destacam-se as contribuições brasileiras no processo de elaboração do Atlantic Ocean Observing System Blueprint (2018-2019); do Tropical Atlantic Observing System - TAOS Review (2018-2021); do Atlantic Ocean Observing System Blueprint (2018-2019); e no Life Science Group do Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), assim como na coordenação do Projeto PIRATA - Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (2014-2022).

Por fim, algumas obras mais recentes que trazem o estado da arte da ciência oceânica e climática nacional merecem destaque. Essas produções trazem contribuições para a identificação das áreas onde as políticas podem ter maior impacto na promoção da sustentabilidade oceânica, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODS) relevantes, como o ODS 14 - Vida na Água (3, 4, 5). Há também contribuições para o entendimento da Economia Azul como vetor para o desenvolvimento do Brasil (6, 7); para a identificação dos impactos das mudanças climáticas nos ambientes marinhos brasileiros e uma revisão sobre circulação, biogeoquímica e fluxos de CO₂ entre o oceano e a atmosfera no Oceano Atlântico tropical (8). Acrescente-se a isso o diagnóstico brasileiro marinho-costeiro de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (9, 10, 11); e a síntese dos pontos relevantes ao Brasil contidos no 6º Relatório de Avaliação do IPCC, que aborda vários aspectos do conhecimento mais atualizado sobre o desafio que a mudança do clima representa para o país (6, 12).

REFERÊNCIAS

1. H.S. Findlay, R.A. Feely, L.Q. Jiang, G. Pelletier, N. Bednarsek, Ocean Acidification: Another Planetary Boundary Crossed. *Global Change Biology* (2025), doi 10.1111/gcb.70238.
2. IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2021), doi:10.1017/9781009157896.
3. L.C. Da Cunha, L.Q. Pinho, G.A.O Moser, C. Russi, “Por Um Oceano Sustentável” in Políticas Públicas e os ODS da Agenda 2030, A. C. Warpechowski, H.H.A.M. Godinho, S.N. locken, Eds. (Fórum, 2021).
4. C. Cunha, “Coastal Nutrient Supply and Global Ocean Biogeochemistry” in Life Below Water. *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, W. Leal Filho, A.M. Azul, L. Brandli, A.L. Salvia, T. Wall, Eds. (Springer, Cham, 2022). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98536-7_115 [Acessado em 25 de junho de 2025].
5. M. Araujo et al., “Circulation, Biogeochemical Cycles and CO₂ Flux Variability in the Tropical Atlantic Ocean” in *Tropical Marine Environments of Brazil: Spatio-Temporal Heterogeneities and Responses to Climate Changes*, J. M. L. Dominguez, R. K. P. Kikuchi, M. Araujo, R. Schwamborn, H. Vital, Orgs. (Springer Nature 2023), v. 1, pp. 231-264.
6. M. Araujo, L.C. Cunha, G.A. Hounsou-Gbo, R.R. Rodrigues, C.A. D. Lentini, “Oceano e Clima: Novos Desafios Advindos com as Mudanças Climáticas” in *Economia Azul: Vetor para o Desenvolvimento do Brasil*, T. Santos, A. P. Beirão, M. C. Araujo, A. B. Carvalho, Orgs. (Essential Idea Editora Ltda, 2022), v. 1, pp. 397-430.
7. T. Santos, A.P. Beirão, M.C. Araujo, A.B. Carvalho, *Economia Azul: Vetor para o desenvolvimento do Brasil* (Essential Idea Editora, 2022). Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/all/modules/livro_economia_azul/arquivo.pdf [Acessado em 25 de junho de 2025].
8. J.M.L. Dominguez, R.K.P. Kikuchi, M. Araujo, R. Schwamborn, H. Vital, *Tropical Marine Environments of Brazil* (Springer, 2023), 266 p., doi 10.1007/978-3-031-21329-8.
9. M.S. Copertino et al., “Histórico de Mudança e o Estado Atual da Biodiversidade da Zona Marinha-Costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023), pp. 62-127, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.

10. W.C. de Sousa Júnior WC et al., “Cenários de Transformação da Zona Mari-nha-Costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversida-de e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Platafor-ma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023), cap. 04, pp. 170-217, doi 10.4322/978-65-01-27749-3.

11. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira de Biodi-versidade e Serviços Ecossistêmicos e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023).

12. C.A.W. C. Coelho et al., *Mudança do Clima no Brasil: Síntese Atualizada e Perspectivas para Decisões Estratégicas* (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024), 106 p. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompa-nhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil_v2025.pdf [Acessa-do em 25 de julho de 2025].

AGRADECIMENTOS

Um reconhecimento especial aos/às cientistas da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais – Rede Clima e do Cen-tro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas – SIMACLIM, por sua dedicação e compromisso público.

6.3 Acidificação do oceano

Leticia Cotrim da Cunha

Já sabemos que as mudanças climáticas são inequivocamente provocadas pela emissão antropogênica de gases de efeito estufa. Além do aumento da temperatura média na superfície terrestre, alterações climáticas e no ciclo hidrológico, o oceano também é afetado em sua totalidade (1).

Cerca de 90% do excesso de calor provocado pelo acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera já foi absorvido pelo oceano, e todos os anos cerca de 1/4 das emissões antropogênicas de CO_2 também é absorvido. Esses impactos já são perceptíveis, e infelizmente são irreversíveis na escala de tempo da vida humana (2). É importante lembrar que, apesar de termos registros sedimentares de mudanças climáticas no passado do planeta, não há nada comparável com as mudanças provocadas pelo homem nos últimos 150 anos. Os registros do passado geológico (na escala de tempo acima de dezenas de milhares de anos) indicam que processos de mudança, incluindo a acidificação, levaram alguns milhares de anos (3).

A absorção pelo oceano do CO_2 em excesso na atmosfera leva a uma reação com a água do mar, que por sua vez leva à formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido sofre dissociação química e o resultado é a diminuição do pH da água do mar, com redução na disponibilidade de íons carbonato (CO_3^{2-}). Os íons carbonato são importantes para muitos organismos, desde o microscópico fitoplâncton, até organismos construtores de recifes, como os corais (4) e outros animais marinhos, como os moluscos, que têm estruturas de carbonato de cálcio (CaCO_3 , Figura 1).

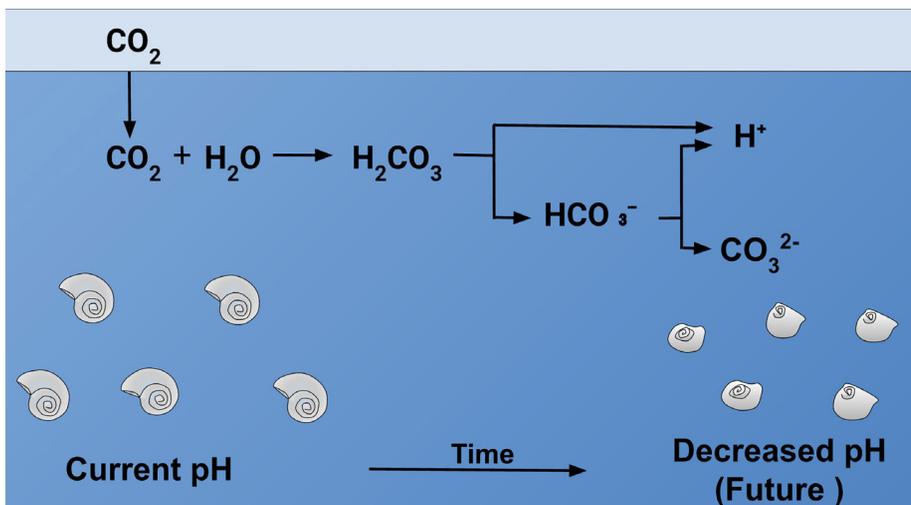


Figura 1: Esquema da reação química da água do mar com o CO_2 atmosférico: produção de ácido carbônico e sua dissociação. Fonte: By Elizajans, Own work, CC BY-SA 4.0. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79625305> [Acessado em 25 de julho de 2025].

Na Amazônia Azul, ainda não temos a dimensão total dos impactos da acidificação do oceano: esse processo precisa de observações contínuas de longo prazo, especialmente nas áreas mais próximas ao litoral. Já sabemos, no entanto, que a porção equatorial oeste do Atlântico apresenta uma tendência de diminuição do pH de -0.001 unidades de pH ano^{-1} na superfície (5), estimada através de dados coletados pela rede de boias PIRATA (Prediction and Moored Array in the Atlantic), um projeto que existe há mais de 25 anos de colaboração entre Brasil, França e Estados Unidos (6).

Mais ao sul no oceano Atlântico Oeste (7) já foi registrada diminuição no pH de cerca de -0.17 ± 0.07 (nas profundidades sob influência da Água Central do Atlântico Sul – ACAS, por volta de 200 m) e -0.10 ± 0.06 (nas profundidades sob influência da Água Intermediária Antártica – AIA, por volta de 700 m), desde o início da Revolução Industrial.

Sob o ponto de vista do oceano global, a análise mais recente (8) dos dados disponíveis sobre a acidificação aponta que já ultrapassamos os limites planetários que marcam mudanças ambientais graves ou mesmo irreversíveis na escala de tempo da vida humana (9). Cerca de 40% da superfície do oceano já está abaixo do limite planetário seguro para

a disponibilidade de íons carbonato (8) (Ver Figura 1) e cerca de 60% da camada subsuperficial do oceano (até 200 m de profundidade) já está abaixo deste limite, em comparação com o estado do oceano no período pré-industrial. As regiões mais críticas são as altas latitudes, tanto no Sul (o Oceano Austral, faixa de oceano que circunda o continente antártico), quanto no Norte (o Ártico).

No Brasil, o tema “ciclo do carbono marinho” e suas vertentes vem sendo estudado há muitos anos por diversos grupos de pesquisa. No entanto, a partir de 2012, a comunidade científica organizou-se em torno do tema “acidificação do oceano”, com a criação da Rede BrOA – Rede Brasileira de Pesquisa em Acidificação do Oceano, que integra a rede global de pesquisa sobre acidificação, a GOA-ON. A Rede BrOA atua em diversos ecossistemas marinhos brasileiros com pesquisadores de mais de 16 instituições de pesquisa nacionais, e também no oceano Austral (10). Além da pesquisa em si, a Rede BrOA dedica-se a assegurar a excelência de seus resultados com vistas a aplicar as melhores práticas da comunidade científica internacional nas análises necessárias para o estudo da acidificação (11).

A rede BrOA identificou na Amazônia Azul os recifes de corais e as regiões de plataforma carbonática – ou seja, aquelas onde há predomínio de carbonato de cálcio nos sedimentos de fundo – como áreas sensíveis à acidificação. Exemplos são a região dos rodolitos, um tipo de macroalga que tem partes formadas por carbonato de cálcio, e o banco Royal-Charlotte, ao largo do litoral do Espírito Santo e do sul da Bahia. Outras áreas sensíveis são os estuários e ecossistemas costeiros, que sofrem com a eutrofização. Esta exacerba o efeito do excesso de CO_2 na coluna d’água, pois os micro-organismos degradam a matéria orgânica contida nos efluentes lançados ao mar, o que resulta em consumo do oxigênio (O_2) e aumento da concentração de CO_2 na água (10).

A existência de iniciativas de longa duração, como o programa nacional PELD (Pesquisa Ecológica de Longa Duração) e a presença de observatórios costeiros e boias fundeadas (o sistema SIMCosta) é essencial para a realização do diagnóstico da acidificação e a detecção de tendências (12). Esse tipo de iniciativa é importante também para a detecção e fornecimento de dados para o desenvolvimento de modelos de previsão para eventos, isolados ou combinados, de ondas de calor e desoxigenação, tanto costeira (13) quanto em regiões oceânicas no Atlântico Sul (14).

Para a adaptação a esses eventos, a comunidade científica vem, há muito, apontando para a importância do conhecimento dos processos físicos e químicos da acidificação (dentre outros problemas relacionados à mudança climática) e da biodiversidade, bem como o uso de modelagem numérica e sistemas de alarme como formas de adaptação (15).

A diminuição das emissões de gases de efeito estufa, mesmo a nível regional, deve ser buscada, assim como o controle de poluição e eutrofização, processos que podem exacerbar a acidificação (16). Estão em curso estudos para medidas de mitigação da acidificação que compreendem a conservação de ecossistemas costeiros e as chamadas estratégias “mCDR” (do inglês Marine Carbon Dioxide Removal) que compreendem a remoção de carbono marinho através do cultivo de macroalgas (17); a promoção da produção primária de fitoplâncton em áreas oceânicas, uma vez que a fotossíntese “captura” CO_2 , convertendo-o em biomassa e exportando-o para o interior do oceano (18); ou a adição de alcalinidade ao oceano (19, 20).

Claramente, todas as medidas de adaptação e/ou mitigação precisam de políticas públicas a nível nacional e regional de combate à mudança climática, incluindo o planejamento espacial marinho, já que a Amazônia Azul brasileira é bastante heterogênea e apresenta especificidades regionais.

Como exposto, a acidificação do oceano é um problema grave e com consequências duradouras, que ultrapassam a escala de vida do ser humano (21). No Brasil, a comunidade científica apontou a vulnerabilidade de ecossistemas costeiros e está organizada para estudar esse tema (10-12). Já apontou inclusive tendências de acidificação em massas de água que atingem a margem continental brasileira (-0.10 a -0.17 unidades de pH) (7); o oceano Atlântico Sul, em eventos provocados por ondas de calor marinho (14); e Equatorial (-0.001 unidades de pH por ano) (5). E está apontando caminhos para a mitigação e a adaptação. Além da necessidade de redução rápida e consistente das emissões de dióxido de carbono, há medidas de mitigação e adaptação que podem ser mais facilmente implementadas, como estratégias de redução da eutrofização, conservação, aplicação de modelagem aliada à observação de ecossistemas a longo prazo e as estratégias mCDR: cultivo de biomassa de macroalgas, incremento da produção de fitoplâncton ou adição de alcalinidade ao oceano. Mas é necessária também a implementação de ações em diferentes níveis nos programas de Estado, incluindo o planejamento

espacial marinho, para que as especificidades e a extensão da Amazônia Azul sejam contempladas.

REFERÊNCIAS

1. IPCC, “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*, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2021), pp. 3–32.
2. H.O. Pörtner et al., *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2022)*, pp. 1–756. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157964> [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. J.G. Canadell et al., “Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks” in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2023), pp. 673–816.
4. S.C. Doney, V.J. Fabry, R.A. Feely, J.A. Kleypas, *Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem*. *Ann Rev Mar Sci* 1, 169–192 (2009).
5. C.A.M. de Assis, L.Q. Pinho, A.M. Fernandes, M.Araujo, L.C.da Cunha, Reconstruction of the marine carbonate system at the Western Tropical Atlantic: trends and variabilities from 20 years of the PIRATA program. *Front Mar Sci* 11, 1286960 (2024).
6. B. Bourlès et al., PIRATA: A Sustained Observing System for Tropical Atlantic Climate Research and Forecasting. *Earth and Space Science* 6, 577–616 (2019).
7. M. de Carvalho-Borges, I.B.M. Orselli, M.L. de C. Ferreira, R. Kerr, Seawater acidification and anthropogenic carbon distribution on the continental shelf and slope of the western South Atlantic Ocean. *Journal of Marine Systems* 187, 62–81 (2018).
8. H.S. Findlay, R.A. Feely, L.Q. Jiang, G. Pelletier, N. Bednaršek, *Ocean Acidification: Another Planetary Boundary Crossed*. *Glob Chang Biol* 31, e70238 (2025).
9. J. Rockström et al., A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009).
10. R. Kerr et al., The Western South Atlantic Ocean in a High-CO₂ World: Current Measurement Capabilities and Perspectives. *Environ Manage* 57, 740–752 (2016).

11. A.R. Perretti, A.C.R. de Albergaria-Barbosa, R. Kerr, L.C. da Cunha, Ocean acidification studies and the uncertainties relevance on measurements of marine carbonate system properties. *Braz J Oceanogr* 66, 234–242 (2018).
12. G. Franz et al., Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives. *Front Mar Sci* 8, 681619 (2021).
13. K.M. Brauko et al., Marine Heatwaves, Sewage and Eutrophication Combine to Trigger Deoxygenation and Biodiversity Loss: A SW Atlantic Case Study. *Front Mar Sci* 7 (2020).
14. R.R. Rodrigues et al., Extreme compound events in the equatorial and South Atlantic. *Nature Communications* 16, 1–15 (2025).
15. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Commun Earth Environ* 6, 208 (2025).
16. E.A. Wolters et al., Shellfisheries' adaptation to ocean acidification in OR and CA: Linking strategies to strategic policy action. *Mar Policy* 171, 106484 (2025).
17. I. Eswar et al., Seaweed responses to ocean acidification: global impacts on growth, biochemical composition, and CO₂ mitigation potential. *Discover Oceans* 2, 19 (2025).
18. K.O. Buesseler et al., Next steps for assessing ocean iron fertilization for marine carbon dioxide removal. *Frontiers in Climate* 6, 1430957 (2024).
19. A.A. Anschütz et al., Direct effects of ocean alkalinity enhancement in the Baltic Sea—results from in-silico experiments. *Frontiers in Climate* 7, 1450468 (2025).
20. W. Yao et al., Exploring Site-Specific Carbon Dioxide Removal Options With Storage or Sequestration in the Marine Environment – The 10 Mt CO₂ yr⁻¹ Removal Challenge for Germany. *Earths Future* 13, e2024EF004902 (2025).
21. N.L. Bindoff et al., “Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities” in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, N.M.W.H.O. Pörtner et al., Eds. (2019).

6.4 Biodiversidade

Margareth S. Copertino

O aquecimento global recente está entre as maiores ameaças à vida no oceano. Os ecossistemas marinhos e costeiros estão expostos a quase todos os impactos das mudanças climáticas que ocorrem no oceano e na costa. O oceano cada vez mais quente, ácido e sem oxigênio afeta o metabolismo, o desenvolvimento e as interações dos organismos marinhos, expondo-os a condições ambientais que ultrapassam seus limites de tolerância e aclimatação. Os danos à biodiversidade e às funções ecológicas impactam, por sua vez, os bens e serviços providos pelo oceano à sociedade.

O Atlântico Sudoeste, a parte do oceano que banha o Brasil, é uma das regiões do planeta mais afetadas pelo aquecimento global (1). A intensificação e o deslocamento da Corrente do Brasil para sul (2), causada pelo aumento médio da temperatura superficial do mar (3) e o aquecimento em águas profundas (4), provocam deslocamento de espécies tropicais para o sul – em busca de águas menos quentes – e alterações nas rotas de animais migratórios. Os recentes extremos de temperatura e ondas de calor intensificaram o branqueamento de corais e a frequência de florações de algas oportunistas e nocivas. A acidificação das águas, observada em regiões de ressurgência costeira (Cabo Frio, RJ; Cabo de Santa Marta, SC) e no litoral do Nordeste, ameaça bancos de rodólitos e recifes de corais (5,6). Em boa parte do litoral brasileiro, a elevação do nível do mar (entre 1,8 a 4,2 mm por ano desde 1950, para uma média global de 4,7 mm entre 2015 e 2024) (7, 8) causa aumento na energia das ondas e na frequência e intensidade dos eventos oceanográficos extremos, acentuando processos de erosão e inundação.

O Diagnóstico Marinho Costeiro da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (DMC-PBBSE) evidenciou transformações marcantes ao longo dos últimos 30 anos, como a perda de habitats vegetados, redução na abundância de espécies fundadoras (aquelas

que têm papel fundamental na formação do ecossistema) e alterações na estrutura das comunidades (9).

Os impactos das mudanças climáticas no Atlântico Sudoeste, em sinergia com outros fatores antropogênicos, estão modificando a biodiversidade marinha-costeira brasileira desde áreas emersas até a plataforma continental (10, 11). Houve alterações na abundância das espécies e na estrutura das comunidades de costões rochosos, praias arenosas, baías e lagoas costeiras, manguezais, bancos de macroalgas e pradarias de gramas marinhas. Além das mudanças climáticas, estuários e grandes baías apresentam alterações rápidas e intensas causadas por múltiplos outros impactos, como destruição de habitats, poluição, pesca predatória, turismo e expansão portuária (12, 13).

O deslocamento de espécies tropicais para regiões extratropicais é uma das consequências mais comuns do aumento de temperatura. Na costa brasileira, a ampliação do limite de distribuição para o sul tem sido registrada para espécies de invertebrados, peixes, macroalgas e gramas marinhas (11). Além do aquecimento gradual das águas, as ondas de calor marinhas no Atlântico Sudoeste (entre Cabo Frio e Argentina) vêm afetando o recrutamento de larvas de invertebrados e reduzindo a quantidade de pescado (3, 13).

Eventos de branqueamento de corais se intensificaram nas últimas duas décadas, afetando mais de 26 espécies de corais brasileiros. No evento de 2019-2020 a mortalidade chegou a 50% em Abrolhos e no Atol das Rocas (14, 15), lançando um alerta sobre o futuro desses ecossistemas.

No limite entre terra e mar, os ecossistemas estão expostos a estressores múltiplos, aumentando a vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas. Entre 2000 e 2020, os manguezais brasileiros perderam 2% de sua cobertura arbórea (taxa média anual de - 0,13%), além de 12% dos apicuns (áreas planas e de pouca vegetação, entre manguezais e a terra firme) (16). As perdas são atribuídas principalmente à erosão costeira, eventos climáticos extremos, aquicultura e salicultura. No Pará, com a elevação do nível do mar, os manguezais avançam sobre o continente, particularmente sobre as áreas de apicuns e alagados (17). No Nordeste, os manguezais avançam para dentro dos estuários devido à redução de chuvas e à intrusão salina (18), além de sofrerem com urbanização, carcinicultura e exploração de recursos (19, 20). No Sudeste, os manguezais estão comprimidos entre o oceano e a Serra do Mar e limitados por rodovias e urbanização, o que impedirá sua migração em direção

ao continente. Mas no limite de sua distribuição (Laguna, SC), o mangue avança sobre campos e marismas (áreas em estuários, cobertas por gramíneas) em resposta ao aquecimento global (21, 22).

As mudanças climáticas têm gerado comunidades biológicas alteradas, menos complexas, colonizadas por espécies oportunistas, exóticas, com potencial invasor. O declínio na cobertura de corais pétreos e algas calcáreas, seguido pelo aumento de macroalgas filamentosas e foliosas, é um exemplo típico de tais mudanças nos recifes tropicais do Nordeste, reduzindo a complexidade estrutural do sistema e abrindo espaço para a colonização do coral-sol invasor (*Tubastraea* spp).

Agregações de animais gelatinosos, como medusas, têm aumentado no mundo e no Brasil, causando prejuízos à pesca e acidentes com banhistas (23, 24). Grandes medusas alteram o equilíbrio das cadeias tróficas ao consumir muita quantidade de zooplâncton e peixes (25).

A formação de um grande cinturão de sargaço no Oceano Atlântico Central que se estende desde o oeste da África até o Caribe e o Golfo do México é um exemplo típico de mudança, considerada um novo normal desde 2011 (26). A formação desse cinturão está relacionada a mudanças oceanográficas e ao aumento no aporte de nutrientes provenientes da bacia Amazônica e da ressurgência costeira do Oeste da África. Quase todo ano, grandes biomassas de algas se formam, transportadas até a costa das Américas, causando inundações e encalhes de Sargassum nas praias do Atlântico tropical, incluindo o litoral Norte e Nordeste brasileiro, com impactos ecológicos, estéticos e turísticos (27).

Proteger, conservar e restaurar ecossistemas marinho-costeiros aumenta a resiliência climática, contribuindo com medidas de adaptação e mitigação. Barreiras naturais formadas por recifes, dunas costeiras, manguezais e marismas dissipam a energia das ondas, reduzindo o risco de erosão e inundações. A presença de recifes ao longo da costa pode amortecer em 46% os impactos de aumento de ondas em um cenário com subida de 1 metro no nível do mar, enquanto a sua ausência elevaria esse risco para 76%. Os manguezais podem reduzir em 20% os níveis de vulnerabilidade, ao mesmo tempo que protegem a população exposta.

A manutenção de sumidouros de carbono e barreiras naturais costeiras é um exemplo das chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SBNs). A conservação e a restauração de manguezais, ao mesmo tempo que removem o excesso de carbono da atmosfera e contribuem com a regulação do clima, garantem a manutenção de inúmeros bens e servi-

ços ecossistêmicos, com benefícios sociais e econômicos. À medida que o desenvolvimento costeiro e as alterações climáticas se intensificam, a relação custo-benefício das medidas de mitigação e adaptação torna-se mais urgente. Nesse aspecto, as SBNs são mais econômicas e eficientes, atendendo objetivos múltiplos: conservação da biodiversidade, manutenção dos recursos pesqueiros, restauração da qualidade ambiental, sequestro de gases de efeito estufa e redução do risco de inundação e erosão costeira. A implementação de um combo de medidas “cost-effective” (razão custo-benefício), combinando SBNs e soluções de engenharia, pode reduzir em mais de 50% o risco de perdas.

A costa brasileira tem mais de 2 milhões de quilômetros quadrados de ecossistemas costeiros vegetados, como manguezais, marismas e pradarias de gramas marinhas (28). Esses ecossistemas são grandes sumidouros de carbono, reconhecidos como ecossistemas de “carbono azul”. Além de removerem o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, as folhas e raízes capturam e fixam sedimento e matéria orgânica. Quando não perturbado, o carbono soterrado pode ser preservado por longos períodos no solo aquoso. Os manguezais brasileiros detêm 8,4% do total de carbono dos manguezais do planeta (28, 29). Medições de fluxos líquidos de CO_2 na interface solo-vegetação-atmosfera comprovam a eficácia de manguezais e marismas brasileiros na mitigação de gases de efeito estufa (30, 31). A degradação e perda desses ambientes, além de reduzir a capacidade de sequestro de carbono, causa emissões de gases de efeito estufa (32, 33). Portanto, a restauração e reabilitação dos manguezais tem o potencial de gerar sequestro adicional de carbono e/ou evitar emissões. No setor de mercado de carbono internacional, o Brasil tem grande oportunidade para obter recursos através da conservação e restauração de manguezais. Mas ainda é necessário estabelecer modelos regulatórios entre os setores público e privado, para atrair investimentos no carbono azul e avançar na restauração dos manguezais brasileiros.

Como vimos, alterações drásticas e graves na biodiversidade marinha e costeira brasileira vêm acontecendo nas últimas décadas, impulsionadas pelas mudanças climáticas e agravadas por outros estressores antropogênicos, entre eles a poluição do mar por esgotos. Compreender as diferentes respostas na escala espacial, diversidade e heterogeneidade do mar brasileiro permanece um grande desafio, que deve ser enfrentado para nos prepararmos para as mudanças futuras. Apesar dos avanços nas pesquisas, inúmeras lacunas dificultam as avaliações e atribuições dos

impactos. Recomenda-se ampliar e fortalecer os programas de monitoramento contínuo e integrado da biodiversidade, a integração de dados climáticos e oceanográficos, modelagem ecológica preditiva, avaliação da resiliência dos ecossistemas e estudos sobre interações entre espécies invasoras e comunidades nativas. Grandes lacunas no conhecimento, nos níveis local e nacional, exigem investigação de como as alterações da biodiversidade afetam as funções ecológicas, incluindo a quantificação dos fluxos dos processos e a valoração dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo mar.

REFERÊNCIAS

1. E. Popova *et al.*, From global to regional and back again: common climate stressors of marine ecosystems relevant for adaptation across five ocean warming hotspots. *Glob Change Biol* 22, 2038–2053 (2016).
2. H. Yang *et al.*, Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate. *Geophys Res Lett* 47, e2019GL085868 (2020).
3. B.C. Franco *et al.*, Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review. *Clim Change* 162, 2359–2377 (2020).
4. C.S. Meinen, R.C. Perez, S. Dong, A.R. Piola, E. Campos. Observed ocean bottom temperature variability at four sites in the northwestern Argentine Basin: Evidence of decadal deep/abyssal warming amidst hourly to interannual variability during 2009–2019. *Geophys Res Lett* 47, e2020GL089093 (2020).
5. A. Piñango *et al.*, Ocean acidification and long-term changes in the carbonate system properties of the South Atlantic Ocean. *Glob Biogeochem Cycles* 36, e2021GB007196 (2022).
6. R.T. de Carvalho *et al.*, Global assessment of coralline algae mineralogy points to high vulnerability of Southwestern Atlantic reefs and rhodolith beds to ocean acidification. *Sci Rep* 12, 9589 (2022).
7. WMO, *World Meteorological Organization State of the Global Climate*, (2025). 55 p.
8. A. Bella-Manley, R.S. Nerem, B.D. Hamlington. Extrapolation of the satellite altimeter record to understand regional variations in future sea level change. *J Geophys Res Oceans* 130(5), e2024JC022094 (2025).
9. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira

de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024).

10. A. Turra, M.R. Denadai, Linking biodiversity and global environmental changes in Brazilian coastal habitats. *Braz J Oceanogr* 64, 3–4 (2016).
11. M.S. Copertino et al., “Histórico de mudança e o estado atual da biodiversidade da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 62–127, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap02.
12. L. Travassos et al., “Vetores de mudança da biodiversidade e serviços ecossistêmicos da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 128–169, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap03.
13. W.C. de Sousa Júnior et al., “Cenários de transformação da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 170–217, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap04.
14. L.C.L. Ferreira et al., Different responses of massive and branching corals to a major heatwave at the largest and richest reef complex in South Atlantic. *Mar Biol* 168(54), (2021).
15. T.L. Gaspar et al., Severe coral bleaching of *Siderastrea stellata* at the only atoll in the South Atlantic driven by sequential marine heatwaves. *Biota Neotrop* 21(2), e20201131 (2021)
16. MapBiomas, *Projeto MapBiomas. Mapeamento anual de cobertura e uso da terra na zona costeira*, (Coleção 7, 2022). Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2022/11/18/radiografia-da-costa-brasileira-nos-ultimos-37-anos-manguezais-estaveis-praias-e-dunas-em-retracao/> [Acessado em 11 de novembro de 2024].
17. M.C. Cohen, A.V. de Souza, D.F. Rossetti, L.C. Pessenda, M.C. França, Decadal-scale dynamics of an Amazonian mangrove caused by climate and sea level changes: Inferences from spatial-temporal analysis and digital elevation models. *Earth Surf Process Landf* 43(14), 2876–2888 (2018).
18. T.C. Jennerjahn et al., “Mangrove ecosystems under climate change” in *Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective: Structure, Function, and Services*. Cham: (Springer, 2017), pp. 211–244.

19. L. Pelage, G. Domalain, A.S. Lira, P. Travassos, T. Frédo. Coastal land use in Northeast Brazil: mangrove coverage evolution over three decades. *Trop Conserv Sci* 12, 1940082918822411 (2019).
20. D.N. Bryan-Brown *et al.*, Global trends in mangrove forest fragmentation. *Sci Rep* 10, 7117 (2020).
21. A.E. Torres *et al.*, A 1500-year multi-proxy record of subtropical mangrove dynamics in relation to sea level and climate changes on Babitonga Bay, Southern Brazil. *Holocene* 34, 387–399 (2024).
22. M.C. França *et al.*, Late-Holocene subtropical mangrove dynamics in response to climate change during the last millennium. *Holocene* 29, 445–456 (2019).
23. C. Resgalla *et al.*, Outbreaks, coexistence, and life cycle of jellyfish species in relation to abiotic and biological factors along a South American coast. *Hydrobiologia* 839, 87–102 (2019), doi:10.1007/s10750-019-03998-0.
24. V. Haddad Junior, A.C. Morandini, L.E. Rodrigues. Jellyfish blooms causing mass envenomations in aquatic marathonists: report of cases in S and SE Brazil (SW Atlantic Ocean). *Wilderness Environ Med* 29, 142–145 (2018), doi:10.1016/j.wem.2017.09.012.
25. R.M. Nagata, A.C. Morandini. Diet, prey selection, and individual feeding rates of the jellyfish *Lychnorhizalucerna* (Scyphozoa, Rhizostomeae). *Mar Biol* 165, 1–17 (2018), doi:10.1007/s00227-018-3445-5.
26. N.F. Putman *et al.*, Systems to monitor and forecast pelagic Sargassum inundation of coastal areas across the North Atlantic: present tools and future needs. *Harmful Algae* 123, 102933 (2025).
27. M.N. Sissini *et al.*, The floating Sargassum (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean – Likely scenarios. *Phycologia* 56, 321–328 (2017), doi:10.2216/16-92.1.
28. V. Hatje *et al.*, Vegetated coastal ecosystems in the Southwestern Atlantic Ocean are an unexploited opportunity for climate change mitigation. *Commun Earth Environ* 4, 160 (2023), doi:10.1038/s43247-023-00828-z.
29. A.S. Rovai, R.R. Twilley, T.A. Worthington, P. Riul. Brazilian mangroves: blue carbon hotspots of national and global relevance to natural climate solutions. *Front For Glob Change* 4, 787533 (2022), doi:10.3389/ffgc.2021.787533.
30. R.B. Souza *et al.*, Salt marsh-atmosphere CO₂ exchanges in Patos Lagoon Estuary, southern Brazil. *Front Mar Sci* 9, 892857 (2022).
31. A.S.C. Freire, M.I. Vitorino, A.M.L. de Souza, M.F. Germano, Analysis of the energy balance and CO₂ flow under the influence of the seasonality of climatic elements in a mangrove ecosystem in Eastern Amazon. *Int J Biometeorol* 66, 647–659 (2022).

32. J.B. Kauffman et al., Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. *Ecol. Evol.* 8, 5530–5540 (2018).

33. L.D. Lacerda et al., 20-years cumulative impact from shrimp farming on mangroves of Northeast Brazil. *Front. For. Glob. Change* 4, 653096 (2021).

6.5 Recifes de corais

Beatrice Padovani Ferreira

Os recifes de corais são ecossistemas marinhos diversos e complexos, cuja estrutura é formada principalmente pela atividade de corais e outros animais construtores que produzem esqueletos calcários, os quais, ao serem secretados, se fundem e acumulam, formando estruturas complexas distribuídas nas zonas tropicais do oceano. Embora ocupem apenas 0,1% do fundo oceânico, estimativas indicam que os recifes abrigam cerca de 25% a 30% de todas as espécies marinhas conhecidas (1). São comparáveis em diversidade às florestas tropicais e sua importância vai muito além da biodiversidade: sustentam comunidades humanas, fornecem alimento através da pesca, movimentam o turismo, produzem compostos bioativos com potencial farmacêutico e protegem o litoral contra a erosão causada pelas ondas. Estimativas para o Brasil indicam que os recifes de coral geram até R\$ 167 bilhões ao Brasil em proteção e turismo (2).

Apesar de sua importância ecológica e econômica, os recifes enfrentam sérias ameaças. Estas incluem degradação por ações humanas já observadas há décadas e crescente intensificação dos efeitos das mudanças climáticas (3). Desde a década de 1980, o aumento da temperatura da superfície do mar devido ao aquecimento global tem provocado um branqueamento sem precedentes dos corais, o que ameaça sua existência e os bens e serviços associados (4). Quatro eventos globais de branqueamento em massa já foram registrados, sendo dois deles nos últimos 10 anos (5).

Além disso, a acidificação dos oceanos, impulsionada pela maior absorção de CO₂ atmosférico pela água do mar, compromete a calcificação dos esqueletos dos corais, afetando negativamente o crescimento e a resistência das estruturas recifais (6). Interações sinérgicas entre estresse térmico, acidificação, eutrofização, sobrepesca e poluição aumentam a vulnerabilidade dos recifes e dificultam sua recuperação (7).

O Brasil abriga os únicos recifes de coral rasos do Atlântico Sul (8). Formações recifais rasas são encontradas em ilhas oceânicas e ao longo da costa brasileira desde o Maranhão até o sul da Bahia (8,9) e incluem ainda formações recentemente descritas no Espírito Santo (10). Os recifes da costa brasileira apresentam baixa diversidade, porém com altos níveis de endemismo – de até 50% – e formas únicas, já extintas em outras partes do mundo, e por isso são considerados “reliquias” (9). Além dos corais, estudos têm revelado a expressiva contribuição de outros organismos construtores, como as algas calcárias (11) e os briozoários, pequenos invertebrados com surpreendente dominância na formação do Banco de Abrolhos, ao largo da costa da Bahia, elevando ainda mais a peculiaridade das formações recifais brasileiras (12).

Além dos recifes rasos, que são os mais estudados e acessíveis, recifes mesofóticos ocorrem em profundidades maiores, geralmente entre 30 e 150 metros. Presentes na plataforma continental média e externa desde a região Norte (13), costa Nordeste (14, 15) e Leste (9), essas formações, que se desenvolveram na época do último glacial, não acompanharam a subida do nível do mar no final do Pleistoceno e são chamadas de *give up reefs* (8,14). Os chamados Recifes Amazônicos são exemplos de recifes mesofóticos, que se conectam ecologicamente com outros sistemas recifais ao longo da margem da plataforma continental nordeste (15), resultando num corredor de biodiversidade profundo (16) que se formou e evoluiu em resposta a dinâmicas de nível do mar e condições oceanográficas específicas.

Os recifes brasileiros têm sido historicamente impactados pela remoção direta de corais e pelo aumento de sedimentação provocado pelo desmatamento da Mata Atlântica e pela agricultura, bem como pela pesca e turismo não regulados (8). Nas últimas décadas, apesar dos esforços de conservação, os impactos de origem terrestre com o desenvolvimento costeiro acelerado, maior aporte de esgotos e contaminantes e a invasão de espécies exóticas, têm se somado às pressões sobre esses ambientes.

As mudanças climáticas, porém, representam a ameaça mais grave. A ocorrência de temperaturas anômalas persistentes tem se intensificado em frequência e duração (17) com ondas de calor cinco vezes mais frequentes (18). Esta intensificação tem levado a eventos de branqueamento que causam mortalidades elevadas de espécies mais sensíveis de coral, incluindo espécies endêmicas e ameaçadas (19, 18).

Os corais têm simbiose – relação na qual ambos os organismos participantes se beneficiam – com um tipo específico de organismo dinoflagelado conhecido como zooxantela, que vive no interior de suas células. Por meio da fotossíntese, as zooxantelas fornecem energia e recebem do hospedeiro dióxido de carbono e nutrientes. Estimativas sugerem que essa relação simbiótica existe há milhões de anos (20). O aumento da temperatura da água faz com que os corais expulsem as zooxantelas — responsáveis por sua coloração e principal fonte de energia, levando ao seu branqueamento e possível morte. Desde 2023, o mundo enfrenta o quarto e mais severo episódio de branqueamento em massa de recifes já registrado. Segundo a International Coral Reef Initiative (ICRI), até março de 2025 84% dos recifes globais já haviam sido afetados. De acordo com o IPCC, com um aumento de 1,5 °C na temperatura média global, entre 70% e 90% dos recifes podem desaparecer. Com 2 °C de aumento, a perda pode atingir 99% (21).

A ciência brasileira sobre recifes de coral tem raízes em estudos pioneiros realizados a partir das décadas de 1960 e 1970 (9). Um marco decisivo ocorreu em 1997 com o evento Workshop Sobre os Recifes de Coral Brasileiros: Pesquisa, Manejo Integrado e Conservação, que reuniu especialistas de todo o país e fortaleceu a articulação entre ciência, políticas públicas e conservação (22). Esse esforço influenciou também a legislação ambiental. Desde então, a mobilização científica e institucional tem sido crescente, com novas tecnologias permitindo o avanço do mapeamento de regiões rasas e profundas (23,24); descoberta de formações recifais (25); descrições detalhadas de áreas pouco conhecidas e já ameaçadas (26,13); sínteses de conhecimento de pesca e restauração (27,28); avaliação de cenários recentes de aquecimento e perspectivas para o Atlântico Sul Tropical (29,18); e estudos sobre alterações na composição dos simbiontes (30,31). Além disso, ações de monitoramento contínuo têm promovido a participação brasileira nos relatórios da rede global de monitoramento de recifes de coral GCRMN (32), ligada à ICRI, com ponto focal do Ministério do Meio Ambiente.

Os eventos de ondas de calor no Atlântico tropical aumentaram em frequência, intensidade, duração e extensão espacial (19), previsão comprovada pelo evento extremo de 2024. Este cenário ocorre num momento de intensificação também de outros impactos oriundos de atividades desenvolvidas sem as devidas considerações ambientais. Perante o cenário global, é de suma importância compreender essas interações,

visando aumentar a resiliência dos recifes e orientar ações de conservação e restauração.

Nesse sentido, muitos avanços científicos têm sido impulsionados por ações de programas governamentais como os dos ministérios do Meio Ambiente e da Ciência, Tecnologia e Inovação, e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Destacamos o Programa Ecológico de Longa Duração PELD/CNPq, com vários sítios em áreas de ocorrência de recifes de coral, que fazem monitoramento e pesquisas de longo prazo, e os institutos nacionais de ciência e tecnologia (INCTs) com abrangência nacional em biodiversidade, como o INCT Amb Trop e Biodiversidade da Amazônia Azul, e o de SinBiose. Fortalecer esses e outros programas, bem como a ciência integrada e colaborativa, é essencial para embasamento das ações de conservação e adaptação no presente cenário.

A Estratégia Nacional para a Conservação e o Uso Sustentável dos Recifes de Coral (ProCoral), decretada em 2025, busca implementar, orientar, articular e coordenar políticas públicas integradas para a conservação, o uso sustentável e a recuperação dos recifes de coral. A criação e gestão eficaz de unidades de conservação marinha, para a proteção de áreas sensíveis e o estímulo à regeneração natural dos ecossistemas, também é importante, bem como promover o engajamento das comunidades costeiras, valorizando seus conhecimentos e resiliência. A educação ambiental e a ciência cidadã também desempenham papel fundamental na conservação a longo prazo.

O futuro dos recifes de coral depende das medidas que tomarmos agora. É urgente reduzir as emissões de carbono, combater a poluição, restaurar ecossistemas costeiros e fortalecer a governança marinha. Proteger os recifes é proteger a biodiversidade marinha, os meios de vida de quem depende dos recursos do mar e o equilíbrio climático do planeta. Ainda é possível evitar o colapso desses ecossistemas extraordinários — desde que ciência, política e sociedade atuem juntos.

REFERÊNCIAS

1. R. Fisher *et al.*, Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates. *Current Biology* 25(4), 500-505 (2015).

2. Fundação Boticário, Oceano sem mistérios – Desvendando os recifes de corais, (Fundacao Grupo Boticario, 2024). Disponível em https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2024/11/OsM_outubro-3_leve31-10-23.pdf [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. T.P. Hughes *et al.*, Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543(7645), 373-377 (2017).
4. O. Hoegh-Guldberg, E.S. Poloczanska, W. Skirving, S. Dove, Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in marine science* 4, 252954 (2017).
5. J.D. Reimer *et al.*, The fourth global coral bleaching event: where do we go from here? *Coral Reefs* 43(4), 1121-1125 (2024).
6. J.S. Kikstra *et al.*, The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures. *Geoscientific Model Development* 15(24), 9075-9109 (2022).
7. T.P. Hughes *et al.*, Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543(7645), 373-377 (2017).
8. M. Maida, B. Ferreira, “Coral Reefs of Brazil: Overview and field guide” in Proc. 8th Int Coral Reef Sym., (1), 263-274 (1997).
9. Z.M. Leão *et al.*, Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Brazilian Journal of Oceanography* 64(spe2), 97-116 (2016).
10. E.F. Mazzei *et al.*, Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Marine pollution bulletin* 114(1), 123-133 (2017).
11. M.A. Oliveira de Figueiredo, M. Abreu, P.A. Horta, A.G. Pedrini, J.M.C. Nunes, Benthic marine algae of the coral reefs of Brazil: a literature review. *Oecologia Brasiliensis* 2(12), 7-11 (2008).
12. L.V. Ramalho *et al.*, Bryozoan framework composition in the oddly shaped reefs from Abrolhos Bank, Brazil, southwestern Atlantic: taxonomy and ecology. *Zootaxa* 4483(1), 155-186 (2018).
13. R.L. Moura *et al.*, An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Science Advances* 2(4), e150125 (2016).
14. J.M.R. Camargo, T.C.M. Araújo, B.P. Ferreira, M. Maida, Topographic features related to recent sea level history in a sediment-starved tropical shelf: Linking the past, present and future. *Regional Studies in Marine Science* 2, 203-211 (2015).
15. M.O. Soares, T.C.L. Tavares, P.B.M. Carneiro, Mesophotic ecosystems: Distribution, impacts and conservation in the South Atlantic, *Diversity and Distributions* 25.2, 255-268 (2019).

16. G. Olavo, P.A. Costa, A.S. Martins, B.P. Ferreira, Shelf edge reefs as priority areas for conservation of reef fish diversity in the tropical Atlantic. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems* 21(2), 199-209 (2011).
17. G.L.X. da Silva, M. Kampel, T. Nakamura, Thirty years of coral bleaching in the Southwestern Atlantic Ocean: a historical assessment based on degree heating week indices. *Coral Reefs*, 1-15 (2025).
18. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Communications Earth & Environment* 6(1), 208 (2025).
19. T.J. Vidal *et al.*, Mortality patterns and recovery challenges in *Millepora alcicornis* after mass bleaching event on Northeast Brazilian reefs. *Marine Environmental Research* 204, 106864 (2025).
20. T.C. LaJeunesse *et al.*, Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology* 28(16), 2570-2580 (2018).
21. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), International Coral Reefs Initiative (ICRI), 2024. Disponível em: <https://icriforum.org/news-4gbe/>. [Acessado em 28 de julho de 2025].
22. B.P. Ferreira, M. Maida, Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil. Situação Atual e Perspectiva. *MMA* (1), 120 (2006).
23. A.P.L. Prates, *Atlas dos recifes de coral nas unidades de conservação brasileiras* (Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2003).
24. C.B.L. da Silveira, G. M. R. Strenzel, M. Maida, B.P. Ferreira, Pushing satellite imagery to new depths: Seascape feature mapping in a tropical shelf. Remote Sensing Applications: *Society and Environment* 19, 100345 (2020).
25. E.F. Mazzei *et al.*, Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Marine Pollution Bulletin* 114(1), 123-133 (2017).
26. R.B. Francini-Filho *et al.*, Perspectives on the Great Amazon Reef: extension, biodiversity, and threats. *Frontiers in Marine Science* 5, 142 (2018).
27. L. Eggertsen *et al.*, Complexities of reef fisheries in Brazil: a retrospective and functional approach. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 34(1), 511-538 (2024).
28. M. Mies *et al.*, Challenges for coral restoration in Southwestern Atlantic reefs: guidelines for ethical and sustainable practices. *Biodiversity and Conservation*, 1-27 (2025).

29. G.L.X. da Silva, M. Kampel, T. Nakamura, Thirty years of coral bleaching in the Southwestern Atlantic Ocean: a historical assessment based on degree heating week indices. *Coral Reefs*, 1-15 (2025).
30. L.B. Villela *et al.*, Bacterial and Symbiodiniaceae communities' variation in corals with distinct traits and geographical distribution. *Scientific Reports* 14(1), 24319 (2024).
31. L.B. Villela, Y.R. Aiube, A.W. Silva-Lima, R.L. Moura, P.S. Salomon. Climate-driven introduction of an opportunistic symbiont in the most extensive reef system of the Southwestern Atlantic Ocean (2024).
32. B.P. Ferreira *et al.*, «Status and trends of coral reefs of the Brazil region» in D. Souter *et al.*, Eds. *Status of coral reefs of the world: 2020 Report* (International Coral Reef Initiative, 2021).

6.6 Pesca e aquicultura

Flávia Lucena Frédou, Ronaldo Olivera Cavalli

A produção brasileira de pescado é uma atividade estratégica para o desenvolvimento socioeconômico, a segurança alimentar e o desenvolvimento regional. No entanto, os efeitos das mudanças climáticas impõem desafios crescentes ao setor, como o desenvolvimento de tecnologias e sistemas de gestão mais eficientes e sustentáveis, que contribuam para a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas.

A pesca e a aquicultura são importantes fontes de alimento, trabalho e renda para centenas de milhões de pessoas em todo o mundo. Ao contrário do que muitos pensam, a proteína animal mais produzida, consumida e comercializada no mundo não é a de frango, suínos ou bovinos, mas o pescado. Em 2022, a produção mundial de pescado (soma da pesca com a aquicultura), foi estimada em 185,4 milhões de toneladas (1). Nos últimos anos, a produção global de pescado tem sido dividida igualmente entre a pesca e a aquicultura. Mas, considerando o crescimento da população humana e a estagnação no volume da pesca, espera-se que o fornecimento de pescado para alimentação proveniente da aquicultura precise aumentar ainda mais para atender à demanda global futura.

No Brasil, a situação estatística é menos clara, pois desde 2011, quando foi publicado o último boletim do Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA), não há dados oficiais. A precariedade das estatísticas atinge sobretudo a pesca, com suas modalidades (pesca industrial, pesca artesanal) e muitos pontos de desembarque ao longo do extenso litoral brasileiro e na grande malha de rios da região Norte, a de maior produção continental de pescado.

A pesca é uma atividade tradicional no Brasil, com importância histórica, cultural, econômica e alimentar. Apesar de representar uma pequena fração do PIB nacional, é essencial para a segurança alimentar de milhões de brasileiros, especialmente em comunidades tradicionais. Em 2018, o consumo brasileiro de pescado foi estimado em 9,75 kg/pessoa/ano.

A pesca é praticada em uma grande variedade de ecossistemas – do ambiente continental ao mar profundo - utilizando mais de 70 modalidades, como redes de emalhar, linhas e armadilhas, para capturar peixes, crustáceos (como camarões, siris, lagostas e caranguejos) e moluscos (como ostras, berbigões e sururus). O último boletim do MPA apontava uma produção nacional total de 1.431.974,4 t, sendo a pesca extrativa marinha responsável por 553.670,0 t (38,7% do total de pescado), seguida pela aquicultura continental (544.490,0 t; 38,0%), a pesca extrativa continental (249.600,2 t; 17,4%) e a aquicultura marinha (84.214,3 t; 5,9%). A pesca artesanal dominava, produzindo mais da metade de todo o pescado nacional (2), com destaque para os pescadores do Nordeste, que chegaram a alcançar 31,7% da captura.

Na aquicultura, o panorama estatístico é mais atualizado. Desde 2013, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fornece estatísticas oficiais sobre o setor. No período de 2013 a 2023, a produção aquícola aumentou 66,6% - de 488,6 mil t para 813,7 mil t (3). A aquicultura representa, portanto, uma das fronteiras mais promissoras, sobretudo no Brasil, que dispõe de cerca de 8.500 km de litoral com diversos estuários e uma Zona Econômica Exclusiva (ZEE), grande biodiversidade, grande mercado consumidor e uma sólida comunidade científica para apoiar a exploração sustentável dos ecossistemas marinhos (4).

Os números parecem indicar que o Brasil está seguindo a tendência mundial da produção da pesca ser ultrapassada pela da aquicultura. Mas a carência estatística da primeira recomenda cautela na comparação. Como não temos dados atualizados e confiáveis sobre o volume de pescado capturado no Brasil nos últimos anos, é difícil estimar a participação proporcional da pesca e da aquicultura no país.

Nos dois casos, porém, os efeitos das mudanças climáticas têm suscitado preocupações quanto à estabilidade e viabilidade da atividade de produção de pescado. O aumento da temperatura das águas, alterações no regime de chuvas, a acidificação dos oceanos, o aumento do nível do mar e a ocorrência de eventos extremos põem em risco a qualidade da água, assim como a produtividade e a saúde dos organismos aquáticos (5).

O aumento da temperatura e a alteração dos padrões de chuva podem diminuir o crescimento das espécies e conseqüentemente a produtividade, tanto nas fazendas aquícolas quanto na natureza. Por serem pecilotérmicos (a temperatura corporal varia com a do ambiente), os pei-

xes, crustáceos e moluscos têm uma faixa ideal de temperatura para seu desenvolvimento, alimentação, metabolismo e reprodução. Assim, temperaturas mais altas podem acelerar o crescimento, mas também afetar negativamente o sistema imunológico e aumentar a vulnerabilidade a doenças e parasitas (6). Variações de salinidade devidas a inundações, estresse hídrico ou aumento do nível do mar podem levar ao estresse osmótico e também afetar o desempenho das espécies.

Da mesma forma, as alterações climáticas podem afetar a dinâmica dos ecossistemas marinhos. O aumento da temperatura favorece a floração de algas nocivas e pode levar à acumulação de biotoxinas em moluscos, o que cada vez mais frequentemente provoca interdições de comercialização nas principais áreas de produção do país (7). O aquecimento resulta também em menor concentração de oxigênio dissolvido, o que agrava as condições para o desenvolvimento das espécies; e a acidificação da água causada pela absorção do excesso de CO₂ na atmosfera afeta processos fisiológicos essenciais em peixes, crustáceos e moluscos, como a calcificação do esqueleto e a formação das carapaças e valvas.

No caso da aquicultura, onde é mais fácil observar os efeitos das mudanças climáticas, já se sabe que mudanças nos padrões de precipitação e no escoamento superficial comprometem a qualidade da água para a atividade. Períodos de seca prolongada e enchentes afetam diretamente os estuários, onde é criada parcela significativa do camarão e das ostras de mangue no Brasil. A ocorrência de ciclones e enchentes causadas por precipitações acima das médias históricas também pode afetar estruturas fixas, como viveiros para criação de camarões, mesas e espinheis para ostras, causando prejuízos consideráveis a produtores em diversas regiões do país, com perdas estruturais, morte de animais e impactos na cadeia logística.

Os impactos das mudanças climáticas podem afetar a produção de pescado, atingindo milhões de trabalhadores, principalmente os mais vulneráveis. No setor da pesca são registrados quase 2 milhões de pescadores, destacando-se os estados do Maranhão, Pará, Bahia e Amazonas como os que têm mais pessoas ocupadas nessa atividade (2). Em relação ao gênero, mulheres representam 50,17% do total, mas dominam na região Nordeste. Em termos de embarcações, pouco mais de 28 mil embarcações (2), principalmente de pequeno porte, são registradas. Estima-se que haja um número muito maior de embarcações na pesca costeira/marinha no Brasil. Para a pesca continental, não há sequer um

programa de cadastro de frota. Portanto, o montante de embarcações é desconhecido no Brasil.

Em 2023 houve um avanço na disponibilidade de dados sobre a pesca, com a publicação de estudos de pesquisadores que avaliaram os estoques de 70 dos 135 pesqueiros marinhos brasileiros (8). Para driblar a carência de dados, os pesquisadores utilizaram uma nova família de modelos chamados “pobres em dados”, que conseguem modelar estoques de uma forma que requer poucas informações. O trabalho mostrou que as regiões Sul e Sudeste concentram o maior número de pescarias marinhas e as mais plenamente ordenadas, em comparação com as regiões Norte e Nordeste. Embora os estoques avaliados só representem pouco mais de 50% do total, esse avanço foi considerado um salto de conhecimento, após um longo período de escassez, uma verdadeira “cegueira” sobre os recursos marinhos. O principal resultado é que, dos estoques avaliados, mais de 60% estão em situação crítica de sobrepesca, ou seja, a biomassa atual está menor do que a biomassa necessária para manter o estoque em níveis sustentáveis.

O MPA anunciou ações para a retomada da estatística pesqueira marinha no Brasil, com a reconstrução histórica de dados de desembarque de 1950 a 2022, e a retomada da estatística pesqueira marinha em regiões com lacunas temporais e espaciais críticas. Adicionalmente, desde 2023, o MPA vem realizando o recadastramento de pescadores (marinhos e continentais) e lançou o Programa Nacional de Regularização de Embarcação de Pesca (PROPESQ), com a finalidade de regularizar e atualizar as informações das embarcações de pesca.

O resultado do hiato no levantamento de dados sobre a pesca no país é uma fragilidade no gerenciamento dos recursos marinhos brasileiros. Menos de 10% dos estoques avaliados têm plano de gestão e pouco mais da metade têm medidas de regulamentação, como quotas (limites), período de fechamento da estação de captura e limite de tamanho [8]. Além disso, é preciso salientar que várias dessas regulamentações são apenas para as chamadas espécie-alvo, ou seja, as que são de interesse na pescaria. Há uma grande quantidade da chamada “fauna acompanhante”, que são espécies capturadas incidentalmente – por não serem desejadas ou por não terem valor comercial. Isso inclui baleias, golfinhos, tubarões e outras espécies que não são comercializadas. Apenas 12% das pescarias são obrigadas a adotar medidas para redução ou mitigação das capturas incidentais, ou seja, da fauna acompanhante (5).

A capacidade dos ambientes aquáticos de responder às mudanças ambientais, preservar as funções do ecossistema e manter a sustentabilidade dos recursos explorados pela pesca é limitada. Além da ameaça da sobrepesca, essa atividade vem sendo ameaçada por diversos impactos como a poluição por pesticidas, metais pesados e plásticos. O aquecimento do oceano e as consequentes mudanças climáticas vêm se somar a esse panorama, afetando sobremaneira a atividade pesqueira. Regiões tropicais, como o Brasil, poderão apresentar uma redução de até 40% nas suas capturas até a década de 2050 (9).

A redução da disponibilidade de determinadas espécies tanto pode ser consequência da sobrepesca, como das mudanças climáticas. Ou mesmo uma combinação dos dois fatores. Isso já está comprovado no Brasil para o camarão (10). No Nordeste, com a intensificação das secas reduz-se a quantidade de lama, que é o aporte de nutrientes para os camarões. Modelos simularam um aumento do esforço de pesca e um aumento da seca, para ver a reação da biomassa e da captura, comprovando que o efeito conjugado dos dois fatores é ainda pior que o de cada um isoladamente.

Os recursos pesqueiros podem ser impactados também por deslocamentos das espécies em busca de temperaturas ideais para seu funcionamento, ocasionando mudanças do potencial de um determinado local (11). Um exemplo já detectado: uma espécie de pequeno atum, tradicionalmente pescada no Nordeste, está aumentando sua área de expansão, indo para o sul em busca de águas menos aquecidas. Logo estará chegando ao Uruguai e à Argentina, o que vai requerer a negociação de um gerenciamento compartilhado entre os três países.

Há, ainda, os impactos sociais, pois a distribuição dos impactos ambientais não é igualitária entre a população, sendo a parcela marginalizada e historicamente invisibilizada a mais afetada. No caso, as pequenas comunidades tradicionais, praticantes da pesca artesanal.

A manutenção dos recursos pesqueiros depende de um projeto estruturado de estatística pesqueira e avaliação dos recursos marinhos e continentais, estes últimos praticamente invisíveis em termos de políticas públicas. As ações existentes são muito frágeis para serem a base de um projeto de longo prazo, uma vez que são iniciativas descontinuadas a cada fim de ciclo de financiamento ou mudança de governo. A instabilidade institucional e as lacunas na estatística pesqueira ocasionam uma pesca mal gerenciada. Onde não há gerenciamento apropriado, há riscos.

Isso também se aplica aos demais impactos, principalmente aos relacionados com as mudanças climáticas.

Com exceção de alguns poucos estudos específicos, a comunidade científica brasileira vem se dedicando de forma ainda tímida ao estudo dos impactos das mudanças climáticas na pesca e na aquicultura. Em decorrência disso, o conhecimento técnico-científico específico para as condições brasileiras é limitado. Isso se aplica também ao caso da aquicultura, uma atividade mais recente e, por sua natureza, com mais facilidade de gerenciamento e captação de dados para embasar pesquisas e ações. Embora alguns estudos sobre tolerância térmica, salina e de manejo adaptativo estejam disponíveis, se desconhece a existência de mapas de vulnerabilidade climática por região e espécie. São inexistentes os sistemas de monitoramento climático locais integrados à produção. A ausência de dados em tempo real e de modelos de previsão limita a capacidade de resposta dos aquicultores frente a variações bruscas do clima. Ainda se observam importantes lacunas em políticas públicas, pois, embora o Brasil possua uma Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (12), a integração da aquicultura e da pesca em estratégias de adaptação ainda é limitada.

Para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, são necessárias diversas medidas de adaptação e mitigação, as quais devem ser ajustadas de acordo com as circunstâncias regionais, pois ameaças diferentes exigem opções de adaptação diferentes. No caso da aquicultura, o aprimoramento das práticas de manejo é o primeiro passo para a adaptação da atividade ao clima, especialmente o aprimoramento da biossegurança, considerando densidades de estocagem menores e garantindo a localização adequada das áreas de produção. Nesse sentido, a implementação das melhores práticas de manejo – BMPs (do inglês Best Management Practices) em todos os aspectos da produção aquícola melhorará a resiliência geral. A suscetibilidade a doenças e parasitas tende a aumentar com as mudanças climáticas, principalmente em animais estressados. Garantir a saúde de peixes e camarões por meio da implementação de BMPs reduzirá os riscos sanitários.

Ainda no setor aquícola, o desenvolvimento de sistemas fechados de produção, com nenhuma ou pouca troca de água, como os de recirculação - RAS (*Recirculating Aquaculture Systems*) ou de bioflocos - BFT (*Biofloc Technology*), são algumas estratégias promissoras, uma vez que, com exceção da demanda por energia, são menos dependentes de recur-

mentos ambientais externos. A aquicultura multitrófica integrada - IMTA (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture*), ao utilizar espécies de diferentes níveis tróficos (peixes, camarões, moluscos, algas marinhas e/ou plantas halófitas), cria um sistema mais eficiente e ecologicamente correto. No IMTA, resíduos de uma espécie são utilizados por outra, otimizando o uso de recursos e minimizando o desperdício. Além do menor impacto ambiental, o IMTA oferece benefícios adicionais como maior eficiência de produção e diversificação de produtos.

Outras estratégias importantes são a diversificação de espécies, o que pode ajudar a mitigar o risco de perdas, pois algumas espécies podem ser mais resistentes a mudanças climáticas do que outras; e o melhoramento genético de espécies com maior resistência aos diferentes fatores de estresse ambiental. Ambas estratégias podem ajudar a garantir a segurança da produção e a sustentabilidade do setor de aquicultura. Ao se afastar das águas costeiras e, portanto, reduzir a pressão sobre os ecossistemas costeiros, a aquicultura em mar aberto (ou *offshore*) pode ser uma opção para reduzir o impacto dos eventos climáticos nessas regiões, mas seu desenvolvimento no Brasil requer avanços tecnológicos, logísticos e de legislação (13).

A produção de rações sustentáveis, principalmente pela redução da dependência de farinha e óleo de pescado, por meio da migração para ingredientes à base de plantas, insetos ou biomassa microbiana é outro caminho. A dependência de rações comerciais aumenta a vulnerabilidade do setor, pois as mudanças climáticas afetam a produção de insumos, como, por exemplo, a soja e o milho. Por isso, é recomendável priorizar a aquicultura de espécies de base da cadeia trófica, que não necessitam de rações. A criação de moluscos e o cultivo de algas e plantas halófitas devem ser priorizados, pois têm menor potencial de impacto ambiental, menor demanda por tecnologia e capital e, ao mesmo tempo, grande potencial de geração de renda e trabalho.

A capacitação técnica de aquicultores para práticas sustentáveis e adaptativas, através de programas de extensão focados em adaptação climática, é essencial para promover a adoção de boas práticas e o manejo preventivo. A inclusão da aquicultura em planos de adaptação, acesso a crédito climático, seguros agrícolas específicos e programas de apoio técnico são fundamentais para garantir a sustentabilidade do setor.

Já no caso da pesca, as necessidades mais urgentes são muito básicas: o país necessita de um programa perene de estatística pesqueira e

gestão da pesca. É fundamental garantir estabilidade institucional e continuidade das ações de gestão e pesquisa, antecipando e compreendendo os potenciais efeitos dos impactos ambientais, auxiliando os gestores na formulação de planos e tomada de decisão.

A adaptação às mudanças climáticas está intimamente relacionada com a capacidade de antecipar e compreender essas mudanças. As pesquisas atuais podem prever os efeitos e conseqüentemente auxiliar os gestores na formulação de planos e tomada de decisão. O tempo urge.

REFERÊNCIAS

1. FAO, *The state of world fisheries and aquaculture 2024*. Blue transformation in action (FAO, 2024).
2. BRASIL, Ministério da Pesca e Aquicultura, *Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura – Ano 2011* (Ministério da Pesca e Aquicultura, 2011).
3. IBGE, *Pesquisa da Pecuária Municipal 2013, e 2023*. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3940> [Acessado em 02 de junho de 2025].
4. W.C. Valenti et al., Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports* 19, 100611 (2021).
5. S.S. De Silva, D. Soto, “Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation” in *Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge*, K. Cochrane, C. De Young, D. Soto, T. Bahri. Eds. (FAO, 2009), pp. 151-212.
6. S. Zeng et al., Warming-driven migration of enterotypes mediates host health and disease statuses in ectotherm *Litopenaeus vannamei*. *Communications Biology* 8, 126, 2025.
7. L.F.N. Vianna, R.V. de Souza, M.A. Schramm, T.P. Alves, Using climate reanalysis and remote sensing-derived data to create the basis for predicting the occurrence of algal blooms, harmful algal blooms and toxic events in Santa Catarina, Brazil. *Science of the Total Environment* 880, 163086 (2023).
8. Oceana Brasil. *Auditoria da Pesca Brasil 2023* (Oceana Brasil, agosto 2024).
9. V.W.Y. Lam et al., Climate change, tropical fisheries and prospects for sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 440–454 (2020).
10. A.S. Lira, F.L. Frédou, F. Le Loc’h, How the fishing effort control and environmental changes affect the sustainability of a tropical shrimp small scale fishery. *Fisheries Research* 235, (March 2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105824> [Acessado em 25 de julho de 2025].

11. L.G. Cardoso et al., Poleward catch displacement of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* in the southwestern Atlantic Ocean: Possible effect of increasing water temperatures. *Fisheries Management and Ecology* 31(4), (2024).
12. Brasil, MMA, *Plano Nacional sobre Mudança do Clima* (MMA, 2008).
13. R.O. Cavalli, Ed. *Aquicultura do beijupirá (*Rachycentron canadum*) no Brasil* (Editora da FURG, 2021).

6.7 Observação oceânica e costeira

Carlos Alberto Eiras Garcia

O oceano cobre 70% da superfície da Terra, regula o clima, absorve cerca de 90% do calor excedente e, segundo o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1), captura 25% do CO₂ emitido anualmente. Sustenta ecossistemas, regula o ciclo hidrológico e garante alimento, energia e subsistência para bilhões de pessoas. A observação oceânica e costeira é, portanto, atividade essencial para a proteção de ecossistemas e a produção de informações para os formuladores e executores de políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Mais de 40% da população mundial vive nas zonas costeiras, que são altamente vulneráveis a impactos como elevação do nível do mar, tempestades, erosão, salinização de aquíferos, alteração de regimes hidrológicos, acidificação, ondas de calor marinhas e perda de biodiversidade. Além dessas vulnerabilidades, a urbanização desordenada e a baixa capacidade adaptativa de muitas comunidades provocam degradação de habitats e agravam as desigualdades sociais.

Nas últimas décadas, a observação oceânica e costeira global evoluiu com a criação e fortalecimento de redes como o GOOS (*Global Ocean Observing System*, ou Sistema Global de Observação do Oceano, coordenado pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO) e o GLOSS (*Global Sea Level Observing System*, ou Sistema Global de Observação do Nível do Mar, que mantém marégrafos distribuídos mundialmente). Contam-se ainda nessas redes internacionais o Argo, programa global de boias autônomas que monitoram temperatura e salinidade nos primeiros 2.000 metros de profundidade do oceano; o CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*), serviço europeu de monitoramento do ambiente marinho, que fornece dados e previsões oceânicas; e a OceanSITES, rede internacional de observações em locais fixos e profundos, que cobre o oceano global.

Os equipamentos utilizados por tais redes, sistemas, projetos e serviços incluem satélites, boias, radares e gliders (veículos autônomos su-

baquáticos), que captam dados essenciais para o entendimento do clima e dos ecossistemas e para a formulação de políticas públicas. Além disso, a Inteligência Artificial e a tecnologia do Gêmeo Digital – uma réplica virtual que reproduz as condições do oceano em detalhe e em tempo real – têm ampliado a capacidade de análise e previsão.

No Brasil, iniciativas como o GOOS-Br, versão nacional do GOOS, e a ReNOMO (Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico), ampliam nossa capacidade de observação, oferecendo dados em tempo real sobre variáveis essenciais para a gestão costeira e a segurança climática.

Focado na observação do Atlântico Sul e Tropical, o GOOS-Br faz a integração de diferentes projetos e serviços: o PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*, projeto de cooperação Brasil–EUA–França que mantém boias no Atlântico Tropical; o GLOSS-Br, seção brasileira do GLOSS; o MOVAR, que utiliza termógrafos descartáveis para monitorar o transporte de calor na camada superficial do oceano entre o Rio de Janeiro e a Ilha de Trindade; a REMObs (Rede de Modelagem e Observação Oceânica), que monitora as condições meteorológicas e oceanográficas na região oceânica adjacente ao território brasileiro; o SIMCosta, maior sistema de monitoramento da costa brasileira, constituído por boias e estações meteo-maregráficas para monitoramento em tempo real; o SAMOC/SAMBAR (*South Atlantic Meridional Overturning Circulation/South Atlantic MOC Basin-wide Array*), que mede a circulação meridional do Atlântico Sul; a Rede Dados; as estações costeiras do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e do CHM (Centro de Hidrografia da Marinha); e o iMePrO (Instrumentação e Melhores Práticas em Oceanografia), para padronizar a coleta e processamento dos dados observacionais no Brasil.

Já a ReNOMO foi criada em 2022, em edital do MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) e o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), para fazer a integração das diferentes redes, ampliar a cobertura observacional e qualificar os dados para aplicações como previsões climáticas e segurança marítima. A ReNOMO utiliza plataformas fixas (Figura 1), móveis, remotas e autônomas, e adota padrões internacionais na coleta, processamento e distribuição dos dados em um portal digital.

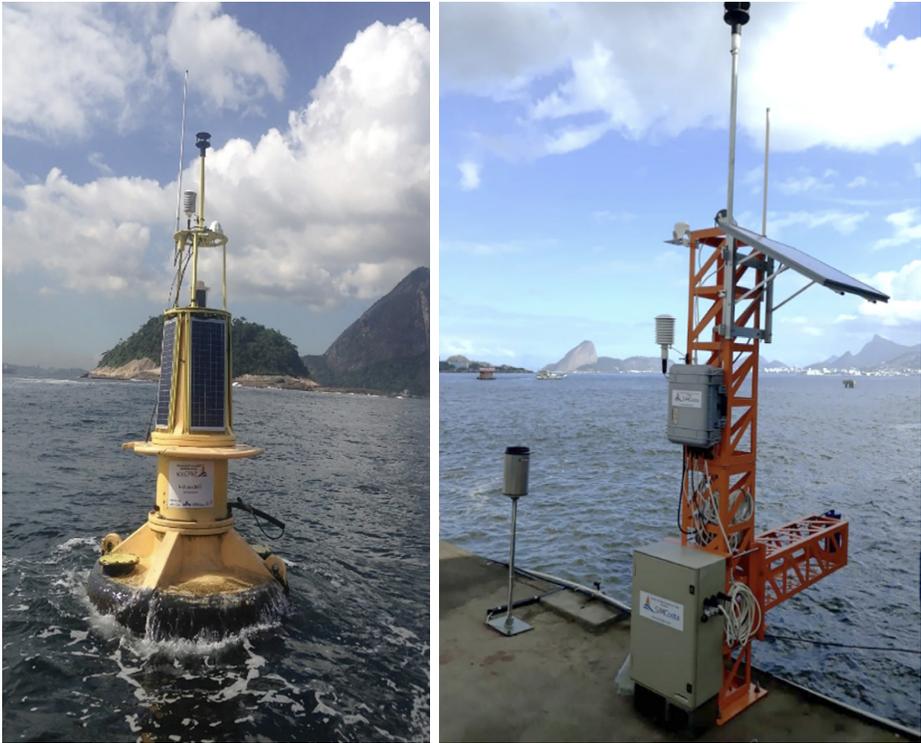


Figura 1: Plataformas fixas do SiMCosta. A boia instrumentalizada (esq.) e o meteo-maregráfico (dir.) estão instalados na cidade do Rio de Janeiro.

A ReNOMO identificou lacunas importantes na capacidade brasileira de observação costeira e oceânica: ausência de cobertura nas regiões Norte e Nordeste e na chamada Margem Equatorial, a região da plataforma continental entre o Amapá e o Rio Grande do Norte; falta de dados sobre variáveis críticas (nível do mar, ondas de calor marinhas, CO₂, oxigênio, acidificação); além de fragilidades em manutenção e calibração dos equipamentos e na interoperabilidade de dados.

Três avanços importantes para as atividades de observação oceânica e costeira no Brasil foram registrados recentemente. Em 2024, foi criado o Centro Nacional Multiusuário (CNM) em edital da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), uma iniciativa do SiMCosta e do CEOCEAN (Centro de Estudos dos Oceanos e Clima, do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande). Seu objetivo é fortalecer o compartilhamento de infraestrutura, a inovação tecnológica, a ciência colaborativa e a capacitação de recursos humanos. Em 2025, a ReNOMO entrou em

nova fase, com a criação do INCT-ReNOMO (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da ReNOMO), uma estrutura cooperativa nacional, voltada ao desenvolvimento tecnológico, monitoramento, capacitação e geração de produtos aplicados, com foco em modelagem e inteligência artificial. O novo INCT se organiza em quatro áreas: Tecnologia, Observação, Ciência/Educação e Produtos/Ferramentas, buscando impacto em setores como pesca, portos, energia e mitigação/adaptação climática.

Também em 2025, a Petrobras anunciou um investimento de R\$ 100 milhões para expandir a rede REMObs, em parceria com a Marinha e universidades. O objetivo é aumentar a segurança offshore e fornecer dados em tempo real sobre as condições meteo-oceanográficas na plataforma continental. Parte dos dados será aberta à comunidade científica.

Contudo, apesar dos avanços, persistem muitas lacunas de observação. Há também necessidade de integração transdisciplinar dos dados. Nesse sentido, a governança e o financiamento são prioridades, pois há grande defasagem entre os recursos necessários e os obtidos. Faltam ainda muitas ações estruturantes, a começar pela expansão geográfica para regiões críticas e a padronização de protocolos. Outra necessidade é garantir a interoperabilidade de dados, isto é, nossa capacidade de integrar diferentes sistemas de observação para garantir que as informações sejam compatíveis e acessíveis em tempo real ou quase real, dentro dos princípios FAIR – um conjunto de diretrizes para tornar o dado científico Findable (encontrável), Accessible (acessível), Interoperable (interoperável) e Reusable (reutilizável).

São necessários também mais investimentos em sensores autônomos, radares e tecnologias nacionais. A assimilação dos dados em modelos numéricos e a criação de um repositório nacional de dados abertos são fundamentais. É igualmente urgente fortalecer a formação técnica e acadêmica e estabelecer centros regionais. Por fim, é essencial garantir financiamento contínuo, combinando recursos públicos, parcerias privadas e mecanismos inovadores como os chamados títulos azuis – papéis negociados no mercado financeiro para financiar projetos de proteção e restauração do oceano.

O fortalecimento da observação oceânica e costeira é estratégico para o enfrentamento das mudanças climáticas, a proteção dos ecossistemas marinhos e a formulação de políticas públicas baseadas em evidências observacionais.

O agravamento dos impactos ambientais em regiões costeiras e oceânicas reforça a necessidade urgente de ampliar e consolidar os sistemas de observação no Brasil. Apesar dos avanços com redes como o GOOS-Br e a ReNOMO, persistem lacunas importantes em cobertura geográfica, variáveis monitoradas e integração de dados. A criação do INCT-ReNOMO marca um avanço estratégico, mas, para enfrentar os desafios climáticos e assegurar a sustentabilidade marinha, é fundamental garantir financiamento contínuo para as redes de observação oceânica e costeira, a padronização dos dados e o alinhamento com iniciativas globais.

REFERÊNCIAS

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC» (Cambridge University Press, 2021).

6.8 Transição energética

Segen Farid Estefen

A transição para as energias renováveis, em particular a energia renovável no oceano, contribui para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e, portanto, combater as mudanças climáticas. A energia eólica offshore tem tido avanços significativos na última década, impulsionada por inovações tecnológicas e investimentos. Proporciona maior rendimento energético devido a ventos mais fortes e constantes no oceano, além de evitar disputas pela ocupação da zona costeira. A maior maturidade tecnológica em relação a outras fontes renováveis do oceano indica que a implantação de parques eólicos offshore de grande porte abre a possibilidade de terem sua infraestrutura utilizada também para as demais fontes renováveis, o que significará ganho de competitividade para todas. Deve-se registrar, também, o crescente interesse pela energia solar offshore, principalmente os sistemas flutuantes com painéis solares, que podem ocupar grandes áreas no espaço marinho. Embora em estágio inicial de desenvolvimento, demonstram grande capacidade para atender regiões costeiras e setores sustentáveis da economia do oceano, a economia azul.

A energia renovável no oceano pode ser classificada em dois grupos. Um deles engloba as fontes renováveis oriundas da água salgada, tais como onda, corrente, maré, gradiente de temperatura e gradiente de salinidade. O outro grupo é composto por fontes renováveis de outras origens, que podem ser captadas no espaço marinho, como a energia eólica offshore e a solar flutuante. Além da conversão dessas fontes em eletricidade, outros produtos podem ser obtidos, como, por exemplo, a água dessalinizada e um combustível de baixa emissão, o hidrogênio verde. Este é obtido da eletrólise da água do mar, um método que utiliza eletricidade para separar o hidrogênio do oxigênio. Se a eletricidade for obtida de fontes renováveis, o resultado será a produção de um combustível sem emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, ao contrário do que acontece com os combustíveis fósseis.

A identificação das regiões mais promissoras em termos de potencial energético das fontes renováveis é feita por medições locais e por sensoriamento remoto. Estudos para a Zona Econômica Exclusiva do Brasil indicam as principais áreas de interesse para a conversão das fontes renováveis (1). As tecnologias adequadas para os recursos potenciais das regiões mais promissoras são baseadas em estudos de viabilidade técnica e econômica para estimar a confiabilidade do sistema de conversão e o custo da energia gerada e dos produtos obtidos.

As fontes renováveis necessitam de estruturas adequadas para a instalação dos equipamentos de conversão. Análises hidrodinâmicas e estruturais são desenvolvidas na avaliação dos conceitos propostos. A depender da região e dos recursos potenciais disponíveis, deve-se também avaliar a efetividade do denominado *Hub* de Energia, a combinação de fontes renováveis a serem convertidas, utilizando infraestrutura comum que incorpora a transmissão elétrica e o sistema de armazenamento. Tendo em vista o maior grau de maturidade tecnológica e a competitividade econômica, a energia eólica offshore atualmente desponta como a mais adequada para viabilizar as demais fontes, estas selecionadas de acordo com o potencial energético disponível para complementar a geração eólica.

A otimização com base em sistemas avançados de controle e o emprego de técnicas de Inteligência Artificial (IA) têm contribuído para os avanços tecnológicos e maior competitividade das fontes renováveis no oceano, podendo se constituir num diferencial positivo para o uso sustentável do oceano, característica da economia azul, que harmoniza preservação com desenvolvimento econômico e social.

A energia eólica offshore está se consolidando como uma das soluções mais promissoras para a transição energética global. A instalação de turbinas eólicas no ambiente marinho garante maior eficiência na conversão do potencial energético em eletricidade, em razão da maior intensidade e constância dos ventos, que propicia o uso de turbinas de alta potência (2,3). A infraestrutura para a implementação desses parques pressupõe a utilização de turbinas eólicas fixas, com a utilização de estacas ou jaquetas para profundidades de até 60 metros, e subestruturas flutuantes em maiores profundidades. Os avanços tecnológicos têm sido significativos, especialmente para as aplicações de subestruturas flutuantes (4,5). A exploração desse recurso oferece grande potencial para a geração de eletricidade renovável em larga escala e a produção de hidrogênio verde.

Os impactos sobre a vida marinha, aves e biodiversidade, assim como nas comunidades da zona costeira nas fases de construção e operação exigem monitoramento regional para o desenvolvimento de soluções adequadas (6). Outra questão relevante é o aprimoramento das previsões de ondas, correntes e vento, que possibilitará otimizar os sistemas de geração e propiciar maior segurança nas operações.

Na Zona Econômica Exclusiva brasileira o potencial eólico offshore é da ordem de 5.833 GW (7), com predominância do Nordeste em termos de potencial e qualidade do vento (velocidade e fator de capacidade), embora potenciais significativos sejam também encontrados nas regiões Sudeste e Sul. O potencial técnico é substancialmente menor, embora ainda relevante, considera as limitações tecnológicas e outros usos do espaço marinho.

Outra fonte renovável é o movimento das ondas. Consequência da transferência de energia dos ventos na superfície oceânica, o movimento das ondas pode ser convertido em energia mecânica e em eletricidade. Com o avanço da engenharia e dos materiais, várias tecnologias foram desenvolvidas, associadas a centenas de patentes registradas. Apesar dos desafios técnicos relativos a concepções eficientes e economicamente competitivas, as tecnologias de conversão de energia das ondas representam alternativas promissoras em nichos específicos de aplicação nas áreas em que essa fonte apresenta altura de onda e frequência de ocorrência adequadas, visto que o potencial energético é proporcional ao quadrado da altura de onda e ao período. Tendo em vista os padrões cíclicos relativamente constantes, é possível prever a disponibilidade desse recurso. Estima-se que o potencial teórico global de energia das ondas seja de aproximadamente 32.000 TWh/ano (8).

Como a maior parte do recurso energético das ondas está concentrada em áreas de águas profundas e ultraprofundas, essas regiões tornam-se cruciais para o aproveitamento eficiente. As condições climáticas em ambientes offshore tendem a ser mais constantes, com ondas que apresentam maior regularidade em altura e período, fatores essenciais para a operação contínua e previsível dos conversores de energia de ondas.

Os principais tipos de dispositivos utilizados para a conversão da energia das ondas são: Coluna de Água Oscilante (OWC), Corpo Oscilante (OB) e Overtopping (OT). As patentes registradas, em geral, estão baseadas nesses conceitos. No caso do OWC, a conversão ocorre por meio da compressão pneumática numa câmara de ar em contato com a su-

perfície do mar, propiciando que a massa de ar expulsa da câmara pela variação da altura de onda impulse uma turbina bidirecional, a qual continuará operando no mesmo sentido quando o ar retornar à câmara. Para o conceito OB, o processo envolve geralmente um sistema hidráulico ou mecânico, que converte o movimento relativo de dois corpos com deslocamento relativo para produzir energia elétrica ou mecânica. No conceito OT, a água armazenada pela ação das ondas em um reservatório aciona uma turbina hidráulica de baixa queda posicionada no fundo do reservatório, convertendo a energia potencial em energia cinética para a produção de eletricidade.

As pesquisas sobre energias renováveis oceânicas se iniciaram no Brasil, de forma mais consistente, na COPPE/UFRJ em 2001, com foco nas fontes de onda e de maré. Quinze anos depois, com o interesse de outros grupos de pesquisa, foi constituído o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Energias Renováveis Oceânicas e Fluviais (INEOF). Atualmente, dois projetos de conversores de energia de ondas estão em andamento no Grupo de Energia Renovável no Oceano (GERO) da COPPE/UFRJ: o conversor hiperbárico de ondas (9), que teve um protótipo instalado no Porto do Pecém, no Ceará, de 2010 a 2014, e outro, do tipo corpo oscilante, em fase de testes laboratoriais.

Já a energia das marés, também conhecida como energia maremotriz, é uma forma de geração de eletricidade que aproveita as variações cíclicas do nível do mar e a velocidade do fluxo da água, resultantes do movimento da Terra em relação à Lua e ao Sol, bem como da interação das respectivas forças gravitacionais. Fatores como a inclinação axial da Terra, sua rotação e a interação entre forças gravitacionais e rotacionais influenciam a dinâmica das marés, fazendo com que suas condições variem ao longo do tempo. Essas variações são mais intensas em regiões costeiras, especialmente em canais estreitos, onde o confinamento da água amplifica o fluxo e aumenta a densidade de energia disponível para conversão.

Existem dois fenômenos principais associados à geração de energia a partir das marés: amplitude e corrente de maré. A amplitude refere-se à diferença de altura entre as marés alta e baixa. Quanto maior essa variação, maior o potencial energético disponível. A conversão de energia é a transformação da energia potencial em energia elétrica. Já a corrente de maré é gerada pelo fluxo da água durante os ciclos de maré; a energia cinética daí resultante pode ser convertida em energia elétrica.

A Usina de La Rance, na França, foi a primeira instalação maremotriz de grande porte, com capacidade instalada de 240 MW, tendo iniciado sua operação em 1966. A Usina de Sihwa, na Coreia do Sul, com capacidade instalada de 252 MW, iniciou a operação em 2012. Conceitos inovadores de turbinas submersas têm sido testados e protótipos instalados, principalmente no Reino Unido. A energia das marés tem alta previsibilidade, permitindo projeções sobre a geração de energia a longo prazo.

Estima-se que os recursos globais de energia das marés totalizam 3 TW [8]. Deve ser enfatizada a importância do sensoriamento remoto com o tratamento das imagens de satélites para complementar as medições in-situ (10). No Brasil os recursos mais significativos se encontram na Baía de São Marcos, no Maranhão, e na costa amazônica da região Norte (11,12).

Outra fonte renovável de energia disponível na água do mar é o gradiente térmico, a diferença de temperaturas na superfície e na profundidade do oceano. Essa diferença pode ser convertida em eletricidade tendo por base o Ciclo de Rankine e utilizando o processo denominado Conversão da Energia Térmica do Oceano (OTEC, do inglês Ocean Thermal Energy Conversion).

O sistema OTEC tem o maior potencial teórico entre as fontes oceânicas oriundas da água salgada, cerca de 44.000 TWh/ano, e é preponderante nas regiões tropicais (8). Nessas regiões, a temperatura da superfície do mar pode ultrapassar 25°C, enquanto a mil metros de profundidade cai para valores próximos de 5°C. Para fins de geração elétrica, recomenda-se valores do gradiente térmico iguais ou superiores a 20°C. A grande vantagem da OTEC é poder ser usada como energia de base, sem a intermitência que caracteriza a maioria das fontes renováveis.

A tecnologia é promissora para países em regiões tropicais, oferecendo uma alternativa sustentável e inovadora. O desafio atual é que o desenvolvimento tecnológico possibilite a redução dos custos dos componentes do sistema OTEC e, conseqüentemente, maior competitividade quanto ao custo da energia gerada. No caso de sistemas flutuantes operando em grandes profundidades, o desafio tecnológico adicional é o dimensionamento dos dutos de captação da água fria (13).

O sistema OTEC pode operar em circuito aberto, fechado ou híbrido, o primeiro utilizado principalmente para o processo de dessalinização da água do mar, o segundo empregando fluidos com menor taxa de va-

porização, como a amônia, para maior eficiência na geração elétrica, e o terceiro explorando ambos os processos para a otimização do sistema.

Existem duas plantas de demonstração de OTEC, uma no Havaí (EUA) e outra em Okinawa (Japão), cada qual com capacidade instalada de 100 kW. O Brasil tem excelentes condições para instalações de OTEC nas regiões Nordeste e Norte, onde o gradiente mínimo de temperatura de 20 graus Celsius está disponível o ano todo. Uma localização de interesse científico para a instalação de um protótipo é a Ilha de Fernando de Noronha, que poderia se beneficiar da OTEC para geração de eletricidade e dessalinização da água do mar, assim como de laboratório para pesquisas científicas visando a otimização da tecnologia para instalação em outros pontos da Zona Econômica Exclusiva.

Do que foi exposto, conclui-se que o Brasil tem um imenso potencial de recursos energéticos renováveis no oceano, o que o posiciona como um importante ator na transição energética global. Com uma vasta costa e condições favoráveis para a exploração de energia eólica offshore, ondas, marés e gradientes térmicos, o país pode não apenas atender às suas demandas internas, mas também contribuir robustamente para a comunidade internacional. A transferência de conhecimento em avaliação de recursos e tecnologias de conversão permitirá ao Brasil compartilhar suas experiências e inovações, fortalecendo sua relevância no setor e ajudando a promover a descarbonização global, bem como a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

1. M. Shadman et al., Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. *Energies* 12, 3658-3695 (2019).
2. E.C. Nogueira, R.C. Morais, A.O. Pereira Junior, Offshore wind power potential in Brazil: Complementarity and synergies. *Energies* 16, 5912 (2023).
3. L.F. de Assis et al., Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. *Energy* 196, 117097 (2020).
4. A.A. Shittu et al., Reliability assessment of a hybrid floating wind turbine concept based on coupled aero-hydro-structural dynamics. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* 15, 100 (2025).
5. M.M. Amiri, M. Shadman, S.F. Estefen, A review of physical and numerical modeling techniques for horizontal-axis wind turbine wakes. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 193, 114279 (2024).

6. O.M. Hernandez C. *et al.*, Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 144, 110994 (2021).
7. EPE, Roadmap Eólica Offshore Brasil, NT-EPE-PR-001/2020-r2 (2020).
8. A. Lewis, S.F. Estefen, Eds. “Ocean Energy” in *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, IPCC SRREN, Org. (Cambridge University Press, 2012), v. 01, pp. 497-534.
9. P.B. Garcia-Rosa *et al.*, Wave-to-Wire Model and Energy Storage Analysis of an Ocean Wave Energy Hyperbaric Converter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 39, 1-12 (2014).
10. R.M. Ferreira, S.F. Estefen, R.Romeiser, Under What Conditions SAR Along-Track Interferometry is Suitable for Assessment of Tidal Energy Resource. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 1, 1-12 (2016).
11. A. Aguiar, M. M. Almeida, M. Cirano, J. Pereira, L. Cotrim da Cunha, Numerical assessment of tidal potential energy in the Brazilian Equatorial Shelf. *Renewable Energy* 220, 119684 (2024).
12. R.W.Q. Farias, M. El-Robrini, O.R. Saavedra, Assessment of tidal current potential in the Amapá’s inner continental shelf (Eastern Amazonia - Brazil). *Ocean Dynamics* 1, 1-15 (2024).
13. J. Tan *et al.*, Stability analysis on internal flow-induced cold-water pipe with non-uniform and variable cross-section for OTEC subject to multiple clump weights. *Ocean Engineering* 330, 121191 (2025).

6.9 Saúde e oceano

**Carla de Freitas Campos, Wim Degrave,
Alexander Turra, José Luiz Moutinho, Paulo Gadelha**

O aquecimento e a acidificação do oceano, a erosão costeira e eventos extremos são uma realidade. Esse desequilíbrio ambiental traz importantes riscos para a saúde humana, animal e dos ecossistemas, com ameaças de aparecimento de novas zoonoses e pandemias. Agentes patogênicos novos ou reemergentes e a ocupação de novos nichos por insetos vetores e reservatórios são uma ameaça direta à saúde pública.

As mudanças climáticas representam atualmente um dos maiores desafios globais enfrentados pela humanidade. Seus impactos se manifestam em diversos sistemas naturais e sociais, sendo o oceano e as zonas costeiras particularmente sensíveis e vulneráveis. Há que se considerar que a saúde humana, a dos animais, dos ecossistemas e do ambiente como um todo são interligadas e interdependentes. Essa compreensão, consolidada ao longo das últimas décadas, fundamenta a abordagem de “Uma Só Saúde”, que propõe a atuação integrada entre diferentes setores, instituições e territórios para lidar com os desafios de saúde contemporâneos. Trata-se de uma estratégia que articula conhecimentos e práticas de forma transdisciplinar, multiprofissional e colaborativa, reconhecendo que soluções sustentáveis e efetivas dependem do diálogo entre diferentes saberes e da cooperação entre áreas de conhecimento, instituições e regiões geográficas (1).

A abordagem “Uma Só Saúde” adota a determinação social e ambiental da saúde como eixo central e é norteadada pelo conceito ampliado de saúde – definida como o resultado de condições de alimentação, habitação, educação, renda, meio ambiente, trabalho, transporte, emprego, lazer, liberdade, acesso e posse da terra e acesso a serviços de saúde (2). Nesse contexto, o ambiente, incluindo o oceano, deve ocupar lugar estratégico nas políticas públicas de saúde.

O Brasil, com mais de 8 mil quilômetros de costa, dezenas de milhões de pessoas vivendo em regiões costeiras e ecossistemas marinhos

de alta biodiversidade, ocupa uma posição estratégica nesse panorama. Além disso, é um país com importante tradição científica na área ambiental, com contribuições significativas para a compreensão dos efeitos do clima sobre os sistemas oceânicos e costeiros.

Apesar de sua importância vital, o oceano ainda é pouco reconhecido como determinante da saúde. É ele que regula o clima, armazena carbono, modula os ciclos da água e influencia diretamente a produção de alimentos, mesmo em regiões afastadas do litoral (3). Contraditoriamente, a saúde do oceano é pouco conhecida e frequentemente negligenciada; e suas contribuições para o bem-estar humano e manutenção da vida na Terra permanecem invisíveis em muitas tomadas de decisão e estratégias que deveriam incluí-lo. Por outro lado, diversas iniciativas de pesquisa no Brasil devem ser destacadas, como o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), o Projeto de Monitoramento do Litoral (Projeto MARE) e muitos trabalhos que são realizados por universidades e centros de pesquisa, como a Fiocruz, focando na relação Saúde e Ambiente.

Consciente das lacunas, a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) e instituições parceiras iniciaram, em 2023, um movimento para ampliar o reconhecimento do oceano no campo da saúde, dando origem à proposta de “Uma Só Saúde Azul (*Blue One Health*)”. A iniciativa busca integrar explicitamente a saúde do oceano à abordagem “Uma Só Saúde”, considerando os impactos recíprocos entre sistemas marinhos e a vida terrestre — humana e não humana. Nesse sentido, as redes e colaborações regionais, nacionais e internacionais são cruciais, visando parcerias intersetoriais, multiprofissionais e transdisciplinares.

O Brasil tem demonstrado protagonismo na agenda de “Uma Só Saúde”, com a elaboração, em andamento, de um Plano de Ação Nacional. Esse plano deve refletir as diretrizes estabelecidas pelo Painel de Especialistas de Alto Nível em Uma Só Saúde - OHHLEP (4). A incorporação do oceano e das águas continentais ao plano representa uma oportunidade estratégica para traduzir em políticas públicas robustas e transformadoras o conhecimento científico acumulado e enfatizar a intrínseca relação entre a saúde do oceano e a saúde humana, destacando como a preservação marinha impacta diretamente nosso bem-estar físico e mental. Além de fornecer alimentos, oxigênio e regular o clima, o oceano oferece oportunidades de recreação e promove a saúde mental, oportunidade ainda pouco valorizada no país.

Por outro lado, o oceano é, também, um vetor de transporte de agentes patogênicos, com infecções virais, bacterianas, fúngicas e parasitárias em aves e animais marinhos, em microalgas com suas toxinas, bem como de contaminação química orgânica, inorgânica, de fertilizantes, plásticos, pesticidas, hormônios, fármacos e drogas. Mas há grande promessa e oportunidade para que estudos científicos desvendem o potencial de organismos marinhos, através da bioprospecção, visando à descoberta de novos processos biotecnológicos, fármacos, moléculas e enzimas com aplicação industrial. No entanto, a biodiversidade marinha é seriamente ameaçada pela pesca ilegal, não reportada e não regulamentada e pela acidificação da água do mar. A pesquisa científica e o desenvolvimento biotecnológico podem ajudar a enfrentar os efeitos das mudanças climáticas sobre a distribuição de espécies marinhas e a disponibilidade de recursos pesqueiros.

Além da promoção da pesquisa, é crucial também promover a conscientização sobre a importância da saúde do oceano, a necessidade de práticas sustentáveis para a proteção dos ecossistemas marinhos e a implementação de medidas para reduzir a poluição, proteger habitats e instaurar o uso sustentável dos recursos oceânicos.

As ações de adaptação e mitigação precisam considerar as desigualdades históricas entre populações e territórios. Grupos em vulnerabilidade social e ambiental serão os mais afetados — e, provavelmente, os primeiros a sofrer os impactos das mudanças climáticas de forma mais evidente (5). Urge fortalecer os sistemas de saúde (humana e animal), ampliar os mecanismos de proteção ambiental e garantir acesso equitativo a condições dignas de vida. Respostas eficazes também requerem o fortalecimento do agenciamento comunitário e adoção de uma ecologia de saberes que inclua a interação entre conhecimento científico e saberes tradicionais e locais, valorizando experiências, práticas e percepções de populações que habitam e cuidam dos territórios.

São parte dos pilares essenciais dessa resposta integrada o estudo e restauração de ecossistemas costeiros; a formalização de grandes áreas costeiras e oceânicas como unidades de proteção ambiental; a proibição de pesca predatória e de arrasto, com fiscalização adequada; a redução das emissões de gases de efeito estufa; a transição energética para fontes renováveis; o consumo consciente e a pesquisa e proteção da biodiversidade, entre outros.

Entre as metas internacionais, destaca-se o compromisso de proteger ao menos 30% das áreas marinhas, terrestres e de águas interiores até 2030, conforme o Marco Global da Biodiversidade de Kunming-Montreal (6). Para que esse objetivo se concretize, será necessário que os países, Brasil incluído, fortaleçam os sistemas de governança e garantam investimentos em ciência, inovação e infraestrutura resiliente. Ações como a implantação de sistemas de alerta precoce, a requalificação urbana e a regulação do uso de poluentes, como agrotóxicos e plásticos, também são componentes indispensáveis. Em termos de políticas públicas no Brasil, o Zoneamento Ecológico-Econômico costeiro tem sido uma ferramenta relevante, mas ainda subutilizada. A integração de dados científicos em planos de adaptação climática em nível municipal e estadual permanece como um desafio.

Os próximos anos serão decisivos para a consolidação de uma governança costeira climática no Brasil. É fundamental fortalecer redes de pesquisa interdisciplinar e interinstitucional, ampliar o financiamento de longo prazo para séries históricas de dados costeiros e investir na formação de recursos humanos em ciências do mar.

Mas nenhuma transformação será possível sem um processo contínuo de educação, comunicação e engajamento social. É preciso promover uma mudança cultural na forma como nos relacionamos com o planeta, com os outros seres vivos e uns com os outros. Pesquisar, conhecer e cuidar do oceano, dos animais e do ambiente é, em última instância, cuidar de nós mesmos. A saúde deve ser compreendida como direito universal e dever do Estado, com base em sua determinação socioambiental e interdependência com todas as formas de vida. Nesse sentido, a criação e implementação de Planos Nacionais em Uma Só Saúde — que incluam explicitamente o oceano — são passos fundamentais para a construção de um futuro mais justo, equilibrado e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. WHO Media Team, *Tripartite and UNEP support OHHLEP's definition of "One Health"*. Joint Tripartite (FAO, OIE, WHO) and UNEP Statement (2021). Disponível em: <https://www.who.int/news/item/01-12-2021-tripartite-and-unep-support-ohhlep-s-definition-of-one-health> [Acessado em 25 de junho de 2025].
2. Conferência Nacional de Saúde, 8, *Anais...* (Centro de Documentação do Ministério da Saúde, Brasília, 1987).

3. L.E. Fleming, B. Maycock, M.P. White, M.H. Depledge, Fostering human health through ocean sustainability in the 21st century. *People and Nature* 1, 276–283 (2019).
4. FAO, UNEP, WHO, WOA, *One Health Joint Plan of Action (2022–2026)* (FAO, 2022).
5. K. Iskandar, A. Anas, S. Bahri, F. Menec, T. Baharuddin, Social vulnerability and climate change: a bibliometric analysis. *Cogent Social Sciences* 10(1), (2024).
6. Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD), *Marco Global de Biodiversidade de Kunming-Montreal*. COP-15, Montreal, Canadá (2022).

6.10 Justiça climática e comunidades costeiras tradicionais

Leandra Regina Gonçalves

As mudanças climáticas têm provocado impactos severos nas zonas costeiras, como a elevação do nível do mar, acidificação do oceano e aumento da frequência de eventos extremos, que comprometem ecossistemas sensíveis como manguezais e recifes de coral e afetam a disponibilidade de recursos naturais essenciais à subsistência (1). Essas regiões são vitais para habitantes de regiões costeiras, especialmente comunidades tradicionais que nelas constroem suas identidades, modos de vida e laços ancestrais com o território (2).

As populações costeiras vulnerabilizadas enfrentam desproporcionalmente, em relação a outros grupos, os efeitos da crise climática, mesmo sendo historicamente pouco responsáveis por sua origem. Aos impactos ambientais somam-se desigualdades sociais e institucionais, o que resulta em vulnerabilidades múltiplas (3). A pesca artesanal, por exemplo, é altamente sensível às mudanças nos parâmetros oceanográficos, à erosão, à salinização de aquíferos e à perda de biodiversidade. Tudo isso afeta diretamente a segurança alimentar e a estabilidade econômica das comunidades costeiras (4).

Nesse contexto, a justiça climática surge como um campo fundamental para integrar dimensões éticas, sociais e territoriais aos debates sobre adaptação e mitigação. Reconhecer os saberes locais, os direitos territoriais e o protagonismo das populações afetadas é essencial para a construção de respostas mais justas e eficazes (5). Ampliar espaços de escuta e coconstrução e superar práticas extrativas de produção de conhecimento são passos fundamentais para promover uma governança climática e oceânica sensível às desigualdades (6). Isso significa evitar práticas como a retirada de informações, saberes ou dados de comunidades locais ou tradicionais sem que haja retorno, reconhecimento ou benefício direto para essas populações. Um exemplo é a abordagem de pesquisadores que visitam comunidades costeiras para levantar dados sobre

pesca artesanal, mas não compartilham os resultados ou não envolvem os pescadores na interpretação e uso das informações coletadas.

A literatura sobre justiça climática tem se expandido significativamente nas últimas décadas, com ênfase crescente em abordagens interseccionais que reconhecem a vulnerabilidade diferenciada de grupos historicamente marginalizados, como povos indígenas, comunidades quilombolas e populações ribeirinhas e costeiras (7,2). No contexto das zonas costeiras e marinhas, os estudos demonstram que os impactos das mudanças climáticas — como a elevação do nível do mar, eventos climáticos extremos e acidificação do oceano — agravam desigualdades sociais já existentes e colocam em risco modos de vida sustentáveis e profundamente conectados ao território (4,8).

Novos estudos têm demonstrado que as comunidades costeiras, altamente dependentes de recursos naturais, estão na linha de frente das mudanças climáticas (8, 10). A produtividade da pesca e da agricultura tem diminuído e infraestruturas críticas enfrentam crescente vulnerabilidade frente ao avanço do mar e à intensificação de eventos como o branqueamento de corais, fenômenos que afetam gravemente populações dependentes de recifes para alimentação, renda e proteção costeira. A intensidade dos impactos varia para cada região e comunidade, conforme a exposição aos riscos, o grau de dependência dos ecossistemas afetados e a capacidade adaptativa dos grupos.

Apesar do crescente reconhecimento da necessidade de fortalecer a capacidade adaptativa, ainda são escassas as orientações práticas sobre como desenvolvê-la efetivamente (2,3). Estudos recentes sugerem que a adaptação não depende apenas da disponibilidade de recursos financeiros, humanos ou sociais, mas também da disposição e capacidade de converter esses recursos em ações eficazes (3). Além disso, a ausência de dados desagregados, ou seja, de detalhamento dos dados em categorias como gênero, idade, renda, localidade ou pertencimento étnico-cultural, que oculta desigualdades estruturais, dificulta o direcionamento de políticas eficazes e impede que grupos mais vulneráveis sejam priorizados nos planos de adaptação. Isso favorece a exclusão das populações vulneráveis dos processos decisórios e limita o avanço de soluções justas e sustentáveis (5).

A ciência brasileira tem desempenhado papel relevante na análise das vulnerabilidades socioambientais associadas às mudanças climáticas, mas os contextos costeiros e marinhos ainda precisam de mais

atenção. Iniciativas como o PAINEL Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) e a Rede Clima vêm promovendo a aproximação entre ciência, políticas públicas e justiça ambiental – uma iniciativa essencial para a integração entre saberes acadêmicos e conhecimentos tradicionais na formulação de respostas mais justas e eficazes para o enfrentamento da crise climática.

Projetos como o MARETÓRIOS Amazônicos (FAPESP, FAPESPA, Fundação Araucária e CNPq) e o Vozes do Mar (British Council) exemplificam abordagens metodológicas participativas e transdisciplinares, que buscam articular o conhecimento científico com as percepções, experiências e práticas das comunidades costeiras. Essas iniciativas contribuem não apenas para a produção de dados mais contextualizados, mas também para o fortalecimento do protagonismo comunitário na governança ambiental (2).



Figura 1: Comunidade de pesca artesanal em Jubim (Ilha de Marajó – PA) e suas práticas tradicionais. Foto: Lara Sartorio/Projeto MARETÓRIOS.

É igualmente necessário reconhecer o papel ativo que comunidades tradicionais vêm exercendo na construção de respostas aos impactos climáticos, por meio de sua participação em conselhos gestores, audiências públicas, redes de pesquisa-ação e espaços de consulta territorial. Esses processos reforçam a centralidade do diálogo de saberes na formulação de políticas públicas que respeitem os direitos territoriais e culturais dessas populações.

Experiências brasileiras demonstram que medidas de adaptação eficazes devem ser baseadas em soluções territorializadas e culturalmente sensíveis (10) (Figura 2). Trata-se de propor soluções que considerem as especificidades de cada território (como clima, geografia e modo de vida local) e os valores culturais das populações envolvidas. Uma estratégia de adaptação que incentive, por exemplo, o cultivo de espécies nativas em manguezais caiçaras, respeitando tanto o conhecimento tradicional quanto o ecossistema, é mais eficaz e legitimada socialmente do que uma intervenção externa padronizada.

Fortalecer a soberania alimentar, a gestão comunitária dos recursos naturais e a proteção de ecossistemas estratégicos, como os manguezais, recifes e restingas, são ações fundamentais para promover a resiliência socioecológica frente às mudanças climáticas. Já no campo da mitigação, é essencial reconhecer e apoiar práticas tradicionais de uso sustentável, que contribuem tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o sequestro de carbono azul.

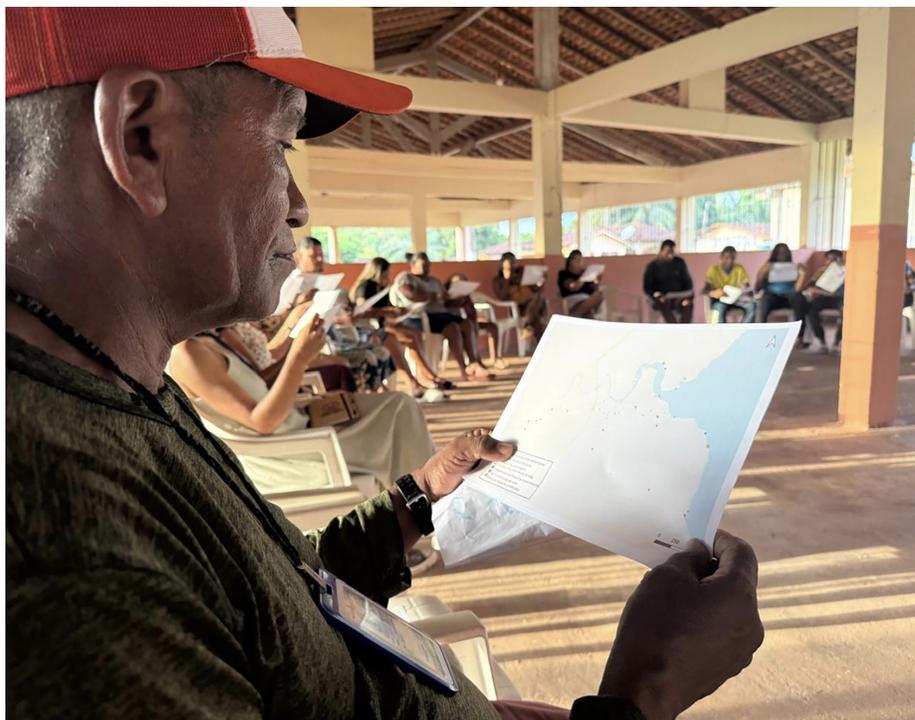


Figura 2: Oficina de coconstrução na comunidade de Jubim, Ilha do Marajó (PA). Foto: Projeto Maretórios.

Contudo, para que essas estratégias ganhem escala e efetividade, é necessário ampliar mecanismos de escuta ativa e fomentar a ciência cidadã, em que as comunidades colaboram ativamente em todas as etapas da pesquisa científica: coleta de dados, análise, monitoramento e disseminação dos resultados. Exemplo disso são projetos em que as comunidades, usando aplicativos ou protocolos simples, ajudam a alimentar bancos de dados com informações sobre variações no nível da maré ou de espécies marinha.

Para que tais estratégias e ações se realizem, é essencial garantir financiamento público continuado para as pesquisas comprometidas com a justiça ambiental e, dentro desta, a justiça climática. Isso implica também fortalecer arranjos institucionais inclusivos e colaborativos, capazes de articular diferentes escalas e formas de conhecimento. A construção de uma justiça climática costeira passa, portanto, pela valorização das experiências locais, pela promoção da capacidade adaptativa

e pela reorientação das agendas científicas e políticas rumo à equidade socioambiental.

A promoção da justiça climática nas zonas costeiras exige o reconhecimento das especificidades territoriais, sociais e culturais das comunidades tradicionais que ali vivem. Esses grupos não apenas enfrentam de forma desproporcional os efeitos das mudanças climáticas, como também oferecem conhecimentos, práticas e estratégias que podem contribuir significativamente para soluções sustentáveis e equitativas. A literatura e as experiências brasileiras demonstram avanços importantes nesse campo, com iniciativas que articulam saberes locais e acadêmicos, promovem a gestão participativa e reivindicam o reconhecimento dos direitos territoriais. Dois exemplos: na Reserva Extrativista de Canavieiras, litoral sul da Bahia, pescadores e marisqueiras usam práticas tradicionais de manejo do caranguejo-uçá que incluem períodos voluntários de defeso (interrupção da pesca) baseados em observações do ciclo reprodutivo da espécie. Essas práticas ajudaram a manter populações saudáveis do caranguejo e foram incorporadas às regras da reserva. Já na comunidade da Jureia, litoral sul de São Paulo, os caiçaras combinam sistemas tradicionais de roçado, a chamada agricultura de coivara, e de pesca artesanal com o conhecimento sobre os ciclos da maré, das chuvas e da reprodução das espécies. Essa sabedoria vem sendo integrada em iniciativas de comanejo e em planos de conservação costeira naquela região.

No entanto, os desafios persistem. É urgente fortalecer capacidades adaptativas locais, ampliar a representatividade desses grupos nos processos decisórios e garantir a continuidade de políticas e financiamentos que apoiem abordagens transdisciplinares e baseadas em justiça ambiental e social. A resposta à crise climática não pode prescindir da escuta ativa e do protagonismo das comunidades costeiras tradicionais. Investir em sua resiliência é, ao mesmo tempo, um imperativo ético e uma estratégia eficaz para a construção de um futuro mais justo e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. IPCC, “IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” in H.O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2019), doi:10.1017/9781009157964.
2. L.R. Gonçalves, M.T. Arruda Filho, P.H.C. Torres, *Justiça Climática em Regiões Costeiras no Brasil* (Paco Editorial, 2022), ISBN: 9788546227846.

3. P.H.C. Torres, G.P. de Araújo, I.C. Cavaco, M.T. Arruda Filho, L.R. Gonçalves, Políticas de Estado e Políticas de Governo: A Justiça Climática e as Estratégias de Resposta para a Zona Costeira Brasileira em Face à Emergência Climática. *Redes* 29, (2024).
4. I.M. Martins, M.A. Gasalla, Adaptive Capacity Level Shapes Social Vulnerability to Climate Change of Fishing Communities in the South Brazil Bight. *Front Mar Sci.* 7, 481 (2020), doi:10.3389/fmars.2020.00481.
5. J. Claudet, J. Blythe, D. Gill, N. Bennett, G. Gurney, Advancing Ocean Equity at the Nexus of Development, Climate and Conservation Policy. *Nat Ecol Evol.* (2024), doi:10.1038/s41559-024-02417-5.
6. 6.N.M. Dawson et al., The Role of Indigenous Peoples and Local Communities in Effective and Equitable Conservation. *Ecol Soc.* 26(3), 19 (2024), doi:10.5751/ES-12625-260319.
7. K.F. Strange, M. Satorras, H. March, Intersectional Climate Action: The Role of Community-Based Organisations in Urban Climate Justice. *Local Environ.* 29(7), 865–885 (2024), doi:10.1080/13549839.2024.2345678.
8. R.D. Pereira et al., Traditional and Local Communities as Key Actors to Identify Climate-Related Disaster Impacts: A Citizen Science Approach in Southeast Brazilian Coastal Areas. *Front Clim* 5, 124300 (2023), doi:10.3389/fclim.2023.1243008.
9. IPCC, *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, 2022).
10. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024).

6.11 Cultura oceânica

Ronaldo Christofolletti

Em um mundo marcado por rápidas transformações climáticas, compreender o oceano e nossa relação com ele tornou-se essencial. Ocupando mais de 70% da superfície do planeta, o oceano regula o clima e sustenta a vida. Desempenha, assim, um papel central na mitigação dos impactos das mudanças climáticas. No Brasil, essa conexão é especialmente relevante: mais da metade da população vive a menos de 150 km do litoral, o que torna o vínculo com o oceano uma realidade cotidiana.

Mesmo quem vive longe do mar é impactado diretamente por ele. Ao regular a temperatura e o ciclo das chuvas, o oceano afeta o bem-estar humano, a produção agrícola e os recursos hídricos até de regiões como o Centro-Oeste brasileiro. Por isso, desenvolver a cultura oceânica — ou seja, a compreensão de como o oceano influencia nossas vidas e como nossas ações o afetam — é fundamental. Essa consciência fortalece escolhas individuais e coletivas, promove mudanças de comportamento e embasa políticas públicas eficazes voltadas à mitigação e à adaptação frente à crise climática.

A cultura oceânica tem evoluído de um enfoque restrito à educação formal para ser reconhecida como uma construção social coletiva e multidimensional. Consolidou-se em quatro dimensões interdependentes: educação, comunicação, conexões culturais e sistemas de conhecimento (1). Essa abordagem permite refletir sobre como diferentes setores da sociedade se relacionam com o oceano e mobilizar transformações rumo à sustentabilidade.

Na educação, destacam-se avanços globais como o chamado da UNESCO para o Currículo Azul (2) — a inserção da cultura oceânica nos currículos escolares mundialmente — e ações que promovem aprendizagens participativas e conectadas ao território, como o Programa Escola Azul, que promove projetos interdisciplinares e inclusivos para promover o protagonismo juvenil e vincular o oceano à justiça climática e ambiental.

Na comunicação, pesquisas indicam que o acesso à informação científica, embora necessário, não é suficiente para gerar engajamento público. A integração entre cultura oceânica e comunicação estratégica tem sido essencial para promover mudanças de comportamento. Iniciativas globais como as campanhas “The Ocean is Us” (3) e a plataforma “EU-ceano” (4) exemplificam como narrativas visuais e emocionais aumentam a mobilização social.

Quanto às conexões culturais, cresce o reconhecimento da centralidade do oceano em expressões culturais, práticas espirituais, rituais tradicionais e saberes ancestrais, diversas e ricas em todo o planeta. A cultura oceânica precisa dialogar com essa diversidade, reconhecendo os múltiplos modos de conhecer e vivenciar o oceano e valorizando a pluralidade de territórios e experiências (1, 5).

Nos sistemas de conhecimento, a transdisciplinaridade e a coprodução têm se consolidado como caminhos para responder a desafios socioambientais complexos. Diferentes projetos no mundo mostram como parcerias entre ciência, comunidades e gestão pública podem gerar soluções contextualizadas e duradouras (5).

Outro avanço significativo é a geração de evidências sobre a percepção pública. Pesquisas como a brasileira Oceano sem Mistérios (7) e a internacional Ocean & Society Survey (8) revelam lacunas de conhecimento e indicam caminhos para ações mais eficazes. Também cresce o entendimento da cultura oceânica como suporte à conservação marinha. Estudos demonstram que áreas protegidas têm mais chances de sucesso quando as populações costeiras compreendem a importância dos ecossistemas marinhos (9).

Esses elementos reforçam que a cultura oceânica é um campo emergente e estratégico, com potencial para apoiar transformações estruturais frente às mudanças climáticas. Para isso, é necessário integrar suas dimensões às políticas públicas, com abordagens baseadas em evidências, justiça social e inclusão de vozes diversas.

O Brasil tem protagonizado ações pioneiras em cultura oceânica lideradas pela academia, por organizações da sociedade civil e por escolas. É o líder da produção científica sobre cultura oceânica entre os países do Sul Global (10) e o líder mundial em projetos sobre cultura oceânica (11). Essas ações multissetoriais e que retratam as diferentes realidades brasileiras tornaram o Brasil referência mundial em cultura oceânica, com destaque para a atuação multissetorial e interinstitucional coordenada

pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), em parceria com a UNESCO e a Universidade Federal do Estado de São Paulo (UNIFESP) e envolvendo diferentes plataformas de ação nacional. Essa mobilização vem estruturando políticas e estratégias voltadas a resiliência climática, segurança alimentar, economia azul sustentável, proteção da biodiversidade e integração de saberes científicos e tradicionais.

Na dimensão educacional, o país, por meio da parceria entre Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Ministério da Educação (MEC), foi o primeiro a responder ao chamado da UNESCO e se comprometer com o Currículo Azul. A implementação se dá em quatro frentes: políticas públicas multiníveis (com 24 municípios e quatro estados já tendo produzido leis específicas); formação de professores (com apoio da CAPES, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior); produção de materiais didáticos e engajamento comunitário. O Programa Escola Azul está presente em todas as regiões do país, promovendo projetos escolares conectados aos desafios globais (12). A Olimpíada do Oceano, com alcance nacional e internacional, atinge milhões de pessoas com atividades integradas de ciência, arte, cultura e inclusão (13).

Na comunicação, diferentes projetos de pesquisa financiados pelo MCTI e organizações da sociedade civil têm ampliado o acesso a informação de qualidade. Por exemplo, a Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica tem lançado, desde a COP-28, relatórios técnicos que sistematizam evidências sobre as relações oceano-clima. Esses relatórios têm alcançado ampla repercussão midiática, com milhares de inserções nas mídias nacionais, regionais e locais abordando os temas de gestão de cidades costeiras (14), soluções baseadas na natureza (15), eventos extremos de temperatura (16) e degelo marinho recorde (17).

A pesquisa nacional de percepção pública (7) identificou que 89% dos brasileiros apoiam a inclusão da cultura oceânica nas escolas. Em 2025, sua nova edição mostrou crescimento no reconhecimento do oceano como parte da solução climática. Essa pesquisa fundamenta estratégias de comunicação e formulação de políticas públicas e se integra à rede internacional Ocean & Society Survey (8).

Nos sistemas de conhecimento, o Brasil vem consolidando práticas de coprodução. A elaboração participativa do Plano Nacional da Década do Oceano (18) é um exemplo de articulação entre academia, sociedade civil, povos indígenas e comunidades tradicionais. Projetos financiados

pelo CNPq e universidades reforçam essa abordagem, valorizando saberes diversos para guiar ações de adaptação climática costeira.

A dimensão cultural tem sido abordada em festivais, produções artísticas, exposições, materiais educativos e projetos comunitários. Tais ações reconhecem o oceano como parte do imaginário, da espiritualidade e da identidade coletiva de muitos povos e são essenciais para o engajamento social no longo prazo.

A cultura oceânica é um dos pilares do enfrentamento da crise climática de forma justa, integrada e transformadora. Vai além da produção de conhecimento, pois promove o uso do conhecimento para a mudança necessária na adaptação climática. Ao promover o entendimento da nossa interdependência com o oceano, fortalece ações individuais e coletivas rumo à sustentabilidade. O Brasil tem papel de liderança global, com iniciativas reconhecidas pela ONU e pela UNESCO. Cabe agora consolidar esse protagonismo e inspirar cada vez mais políticas públicas que articulem oceano, clima e sociedade rumo a futuros mais resilientes e inclusivos. Para isso, é necessário:

- Ampliar o financiamento público e privado com foco em cultura oceânica, justiça social e equidade territorial, desde a produção ao uso do conhecimento.
- Incluir a cultura oceânica nos planos de adaptação climática e políticas nacionais de educação.
- Fortalecer redes de formação de educadores e produção de recursos pedagógicos contextualizados.
- Promover campanhas de comunicação baseadas em dados e narrativas socialmente relevantes a partir dos impactos da mudança do clima.
- Estimular redes de cooperação entre países do Sul Global.
- Valorizar o papel de jovens, artistas, povos indígenas e comunidades locais na construção de soluções.

REFERÊNCIAS

1. UNESCO-IOC, Ocean Decade Vision 2030 – A Theory of Change for the Ocean Decade Challenge 10 (2025-2030). *The Ocean Decade Series*, 51, 11 (2025).

2. UNESCO-IOC, Um Novo Currículo Azul – Um Guia Prático para Formuladores de Políticas. *Manuais e Guias da COI 90*, (2022). Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380544_por [Acessado em 30 de junho de 2025].
3. The Ocean is Us campaign. *How On Earth Radio* (2024). Disponível em: <https://howonearthradio.org/archives/category/episodes/the-ocean-is-us> [Acessado em 30 de junho de 2025].
4. Home. *EUceano*. Disponível em: <https://www-euceano-org.rds.land/euceano> [Acessado em 30 de junho de 2025].
5. UNESCO-IOC, Cultura Oceânica para todos: Kit Pedagógico. *Manuais e Guias da COI 90* (2017). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449> [Acessado em 30 de junho de 2025].
6. N.G.R. Mello et al., P Ways forward in transdisciplinary research: insights from case studies on marine and coastal conflict transformations, *Sustainable Futures* 9, 100768 (2025).
7. Fundação Grupo Boticário, UNIFESP/Maré de Ciência e UNESCO, *Oceano sem Mistérios - A Relação dos Brasileiros com o Mar: Evolução de Cenários (2022-2025)*. Fundação Grupo Boticário (2025). Disponível em: <https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2025/06/Oceano-sem-Misterios-A-Relacao-dos-Brasileiros-com-o-Mar-Evolucao-de-Cenarios-2022-2025.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].
8. J. McRuer et al., Co-designing the Ocean & Society Survey – a global tool for understanding people-ocean connections and mobilizing ocean action. *Ocean & Society* (in press).
9. J. McRuer, E. McKinley, D. Glithero, R. Christofolletti, D. Payne, Human-ocean relationships: exploring alignment and collaboration between ocean literacy research and marine conservation. *Marine Policy* 171, 106418 (2025).
10. UNESCO-IOC, “State of the Ocean Report”, pilot edition. *IOC Technical Series* 173, (2022). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381921.locale=en> [Acessado em 30 de junho de 2025].
11. UNESCO-IOC, “State of the Ocean Report”. *IOC Technical Series* 190 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.25607/4wbg-d349>. [Acessado em 30 de junho de 2025].
12. Home, *Programa Escola Azul Brasil*. Disponível em: <https://escolaazul.maredeciencia.eco.br/> [Acessado em 30 de junho de 2025].
13. Home, *Olimpíada do Oceano*. Disponível em: <https://olimpiada.maredeciencia.eco.br/> [Acessado em 30 de junho de 2025].
14. Fundação Grupo Boticário e Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica, *Oceano sem mistérios. Construindo Cidades Azuis*. Fundação Grupo Boticário

rio (2023). Disponível em: https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2024/11/Oceano-sem-Misterios_-Construindo-Cidades-Azuis.pdf [Acessado em 30 de junho de 2025].

15. A.S. Martinez, *Cidades Azuis: soluções baseadas na natureza para a resiliência climática costeira* (Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica UNIFESP-UNESCO-MCTI/FGB, 2024). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/Ebook-Cidades-Azuis-Solucoes-Baseadas-na-Natureza-para-a-Resiliencia-Climatica-Costeira.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].

16. A.S. Martinez, R.A. Christofolletti, *Brasil em transformação: o impacto da crise climática - 2024: o ano mais quente da história* (Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (UNIFESP-UNESCO-MCTI)/FGB, 2024). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil-em-transformacao-1-2024-o-ano-mais-quente-da-historia.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].

17. R.A. Christofolletti, A. Pardal, “O declínio recorde do gelo marinho em 2023-2024: um alerta para o planeta” (Relatório Técnico do projeto Com-ANTAR do Programa Antártico Brasileiro, 2025). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2025/01/O-declinio-recorde-do-gelo-marinho-em-2023-2024-um-alerta-para-o-planeta.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].

18. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, *Plano Nacional de Implementação da Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável*. Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2021). Disponível em: <https://decada.ciencianomar.mctic.gov.br/wp-content/uploads/2022/01/Plano-Nacional-de-Implementac%CC%A7a%CC%83o-da-De%CC%81ca-da-da-Cie%CC%82ncia-Ocea%CC%82nica-links.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].

6.12 Governança oceânica

Wânia Duleba, Milena Maltese Zuffo, Andrei Polejack

Os riscos climáticos afetam setores essenciais da economia nacional — como pesca, turismo e infraestrutura urbana — e agravam desigualdades sociais, em especial nos países do Sul Global (1,2). Questões de governança são estratégicas, pois estruturam normas, instituições, políticas e práticas voltadas à mitigação dos impactos e à adaptação frente a esses riscos. A interseção dos regimes de governança do oceano e do clima representa não apenas uma necessidade ambiental urgente, mas também uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática do Brasil no cenário internacional.

Governança oceânica compreende os sistemas normativos, políticos e técnicos que orientam os direitos e deveres quanto ao uso e à proteção do oceano (3). Seu marco jurídico internacional é a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CONVEMAR), que organiza o espaço oceânico por zonas e estabelece princípios de soberania, proteção ambiental e cooperação entre Estados. Analogamente, o regime do clima tem por instrumento norteador a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Embora a CONVEMAR não mencione mudanças climáticas diretamente, ambos os regimes têm sido aplicados em interpretações jurídicas sobre os impactos da relação oceano/clima.

No Brasil, um elemento central no regime oceânico é a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), criada em 1974 e responsável por diversas políticas como o Plano Setorial para os Recursos do Mar e o Levantamento da Plataforma Continental Brasileira, dentre outros. Já o regime climático conta com o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), responsável pelo Plano Clima e pelas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC).

Ambos os regimes se utilizam da produção científica nacional para embasar propostas de ação. No entanto, apesar de serem semelhantes em seus propósitos, não há processos de integração entre eles, o que di-

ficulta a coordenação de políticas de Estado e a melhoria dos processos decisórios com base no conhecimento (4). O Brasil detém capacidades avançadas em pesquisas oceânicas e climáticas, contando com ampla rede de universidades, centros de pesquisa e laboratórios públicos e privados. Essas instituições pesquisam os processos oceânicos e os impactos climáticos em ecossistemas marinhos e desenvolvem e avaliam estratégias de adaptação costeira às mudanças do clima.

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação coordena políticas científicas estratégicas para ambos os regimes, como a Rede Clima e o Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (INPO), estabelecido como sua mais recente Organização Social. Tanto a Rede Clima quanto o INPO possuem redes avançadas de conhecimento a serviço da sociedade, envolvendo pesquisadores em todo o Brasil (Figura1).

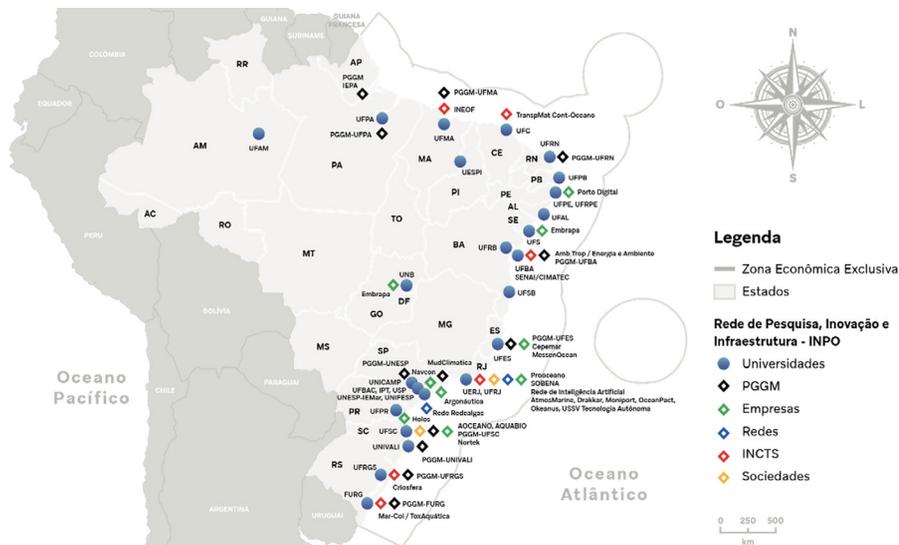


Figura 1: Mapa da Rede de Pesquisa, Inovação e Infraestrutura do Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas – INPO.

Além da produção de conhecimento científico sobre oceano e clima, a ciência brasileira tem contribuído na pesquisa de modelos de governança e articulação entre ciência e saberes tradicionais (5,6,7), para aplicação em instrumentos de políticas públicas, como o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC).

Em decorrência da robustez da ciência nacional, a atuação de pesquisadores brasileiros em fóruns internacionais tem se expandido, principalmente em redes internacionais, como a Aliança para Todo o Atlântico (8), possibilitando a implementação de novos espaços políticos como a ZOPACAS (Zona de Paz e Cooperação no Atlântico Sul), e reforçando o papel do país na diplomacia científica (9).

A governança oceânica é fundamental para responder aos desafios climáticos em territórios marinhos e costeiros. A experiência brasileira demonstra que é possível integrar ciência, política e sociedade em soluções eficazes e escaláveis. Consolidar mecanismos institucionais, ampliar a base científica e incorporar abordagens participativas são passos centrais para ampliar a resiliência costeira e promover justiça ambiental. O sucesso dessa iniciativa dependerá da nossa capacidade de traduzir os avanços científicos nacionais em políticas públicas integradas e da continuidade do investimento em pesquisa oceânica de excelência.

REFERÊNCIAS

1. P. Mazzega, D. M. Rugmini, A. F. Barros-Platiau, Where is the “Global South” located in scientific research? *Earth System Governance* 25, 100269 (2025) Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esg.2025.100269> [Acessado em 25 de julho de 2025].
2. M.M.C. Muelbert *et al.*, The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate in Latin America: Knowledge Gaps and the Urgency to Translate Science Into Action. *Frontiers in Climate* 3, (November, 2021). Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.748344> [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. A.F. Barros-Platiau *et al.*, “Ocean Governance in the Anthropocene: A New Approach in the Era of Climate Emergency” in *Eco-Politics and Global Climate Change. Environment & Policy*, S. Tripathi, R. Bhadouria, R. Singh, P. Srivastava, R.S. Devi, Eds. (Springer, 2023), v. 65, pp. 59–72. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48098-0_4 [Acessado em 25 de julho de 2025].
4. L.R. Gonçalves *et al.*, “Oportunidades e opções de governança para conservar e restaurar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Org. (Editora Cubo, 2024).
5. M. Caldeira, A.T. Sekinairai, M. Vierros, Weaving science and traditional knowledge: Toward sustainable solutions for ocean management. *Marine Po-*

licy 174, (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106591> [Acessado em 25 de julho de 2025].

6. V. Renck *et al.*, Taking fishers' knowledge and it's implications to fisheries policy seriously. *Ecology and Society* 28(2), (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.5751/ES-14104-280207> [Acessado em 25 de julho de 2025].

7. C.N. El-Hani, L. Poliseli, D. Ludwig, D. Beyond the divide between indigenous and academic knowledge: Causal and mechanistic explanations in a Brazilian fishing community. *Studies in History and Philosophy of Science* 91, 296–306 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2021.11.001> [Acessado em 25 de julho de 2025].

8. A. Polejack, S. Gruber, M.S. Wisz, Atlantic Ocean science diplomacy in action: the pole-to-pole All Atlantic Ocean Research Alliance. *Humanities and Social Sciences Communications* 8(1), 52 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00729-6> [Acessado em 25 de julho de 2025].

9. A. Polejack, A.F. Barros-Platiau, A Ciência Oceânica como ferramenta de Cooperação e Diplomacia no Atlântico, in *Conservation of living resources in areas beyond national jurisdiction: BBNJ and Antarctica*, A.F. Barros-Platiau, C.C. de Oliveira, Eds. (Lumen Juris, 2020), pp. 45–65.

6.13 Conclusões

Uma proporção significativa das atividades humanas, incluindo a atividade econômica, depende das zonas costeiras e oceânicas. Elas são responsáveis por 80% das mercadorias comercializadas globalmente, são fonte de produção de alimentos e podem vir a ser responsáveis por uma grande parcela da energia limpa e renovável necessária para a transição energética. Também sequestram e mantêm no fundo do mar e em seus manguezais o excesso de carbono emitido para a atmosfera. Além disso, quando preservadas ou restauradas, funcionam, no caso das zonas costeiras, como barreira física à erosão e às inundações intensificadas pelos eventos climáticos extremos, como tempestades e furacões.

A ciência tem conhecimento e soluções para oferecer. A ciência brasileira, em particular, vem mostrando os impactos existentes e como as mudanças climáticas estão exacerbando as vulnerabilidades no espaço costeiro-marinho brasileiro; tem apontado também as oportunidades para o Brasil vencer esses desafios.

Mas todas as medidas de adaptação e/ou mitigação precisam da formulação de políticas públicas a nível nacional e regional. É necessária, sobretudo, a inserção da questão climática e seus reflexos oceânicos/costeiros entre as prioridades nacionais e a garantia de continuidade dos investimentos e esforços, tanto para a pesquisa científica como para a implementação das ações. Esse desafio precisa ser enfrentado levando em conta também o conhecimento ecológico local e tradicional, com a ampliação da representatividade desses grupos nos processos decisórios para viabilizar abordagens transdisciplinares e baseadas em justiça ambiental e social.

Tendo em vista que o oceano é local, nacional, regional e global, é preciso desenvolver uma abordagem integrada que contemple todos esses níveis. Pela extensão de sua área oceânica e costeira, por sua posição na geopolítica mundial e pela sólida base científica de que dispõe, o Brasil está diante de uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática no cenário internacional.

AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento aos cientistas da Rede do Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (INPO) que contribuíram com o capítulo Oceano e Zonas Costeiras, compartilhando seu conhecimento com a sociedade.

Às jornalistas Dominique Ribeiro e Terezinha Costa, pela contribuição na edição dos textos e na edição executiva deste capítulo.

7. A CONTRIBUIÇÃO DA CIÊNCIA AGRÍCOLA BRASILEIRA PARA OS DESAFIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Eduardo Delgado Assad³⁹, StoécioMaia⁴⁰, Jurandir Zullo Jr⁴¹,
Vanessa Pugliero⁴², Eduardo Pavão⁴², João Paulo Silva⁴²

INTRODUÇÃO

O setor agrícola é particularmente sensível à variabilidade e às alterações climática, sendo que a agricultura é um dos pilares da economia do Brasil. Representando cerca de 25% do PIB, constitui o suporte dos meios de subsistência e da segurança alimentar de 70-80% da população, em especial nas zonas rurais.

Portanto, é urgente uma abordagem mais ampla com as mudanças climáticas e de seus impactos na agricultura pelo potencial vulnerabilidade à variabilidade climática, especialmente na região onde os rendimentos são mais baixos, o que tem forte impacto na segurança alimentar. Com uma visão mais abrangente dos impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar, neste capítulo serão avaliadas as questões que envolvem a relação entre clima-agricultura-pecuária-economia e as implicações no Brasil, de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 1). Este fluxograma é referente aos estudos do subcomponente segurança ali-

39 Fundação Getúlio Vargas, FGV, São Paulo, SP.

40 Instituto Federal de Alagoas, ITAL, Maceió, AL.

41 Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP.

42 Rede Brasileira de Pesquisas em Mudanças Climáticas, Rede Clima, Campinas, SP.

Autor correspondente: eduardo.assad@faunaprojetos.com.br

mentar do projeto INCT Fase 2, financiado pela FAPESP e CNPQ. Essa avaliação faz parte de um grande esforço da rede clima do MCTI, desde o ano de 2009, onde diversas contribuições foram feitas no sentido de entender melhor o impacto das mudanças do clima na agricultura, como propor medidas de mitigação e adaptação e finalmente buscar quantificar os fatores de emissão e remoção da agricultura nos últimos anos.

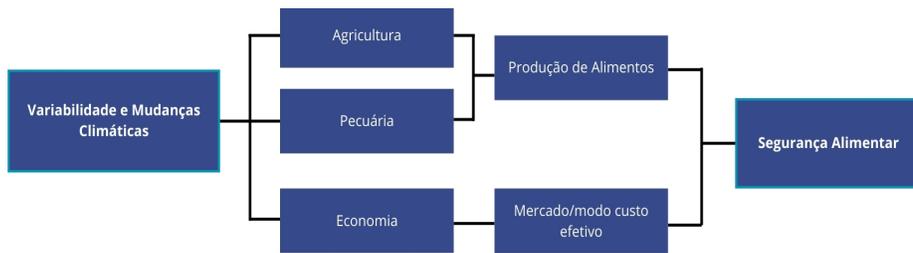


Figura 1: Fluxograma da subcomponente da segurança alimentar.

Os impactos das mudanças climáticas e suas variabilidades, com implicações na agricultura, pecuária e economia, tem estreita relação com a produção de alimentos e os mercados que o regulam. No final deste processo está então a segurança alimentar.

As questões relacionadas com a segurança alimentar e as alterações climáticas têm sido cada vez mais debatidas e analisadas por investigadores de diferentes áreas do conhecimento. Estas duas questões representam importantes desafios para a população mundial e envolvem diretamente o setor agrícola e as suas relações com outros setores econômicos. Como a demanda por produtos agrícolas crescerá com o aumento da população e da renda nas próximas décadas, ações setoriais podem contribuir significativamente para as metas internacionais de redução e estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Especificamente, é consenso que, por meio de uma gestão adequada e de uma agricultura regional, práticas alternativas no setor de agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use) podem contribuir grandemente para mitigar as emissões de GEE.

Os sistemas produtivos baseados na intensificação sustentável da produção agrícola passam necessariamente por uma abordagem integrada entre as alterações climáticas, as ações de adaptação e a miti-

gação das emissões de GEE. A identificação de sinergias entre mitigação e adaptação no setor AFOLU é essencial, pois a segurança alimentar e os impactos das alterações climáticas no setor agrícola requerem ações integradas. O efeito combinado das estratégias de atenuação e adaptação é maior do que quando estas medidas são aplicadas individualmente. Além disso, a maioria das técnicas de mitigação atualmente utilizadas na agricultura foi originalmente concebida como “estratégias de gestão ótima”, destinadas a melhorar a estabilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas a longo prazo, gerando cenários do tipo “win-win”. Por exemplo, no Plano ABC (2020) está previsto a expansão da área utilizada com sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) em quatro milhões de hectares. O governo lançou o “Programa Nacional de Recuperação de Pastagens Degradadas” MAPA(2024) com objetivo de recuperar 40 milhões de hectares de pastos, transformando-os em sistemas produtivos. Espera-se que com essas ações, os impactos na oferta de alimentos sejam minimizados.

Esses sistemas possibilitam, entre outras consequências, a fixação de carbono e a redução de emissão de óxido nitroso e, conseqüentemente, a redução das emissões de GEE's. Da mesma forma, a estratégia adaptativa se configura por proporcionar maior produtividade e maior resiliência dos sistemas agrícolas, tornando os produtores menos vulneráveis às mudanças climáticas. Além do aprimoramento de aspectos técnicos e, principalmente, da aplicação de tecnologias para aumentar a produtividade dos alimentos, é necessário estimular a reflexão sobre a contribuição da agricultura familiar para garantir a segurança alimentar em escala global, assim como investigar quais são os desafios no Brasil para a segurança alimentar. Para tanto, é necessário fazer valer a inserção do tema na agenda política das organizações de agricultores familiares no Brasil (CONTAG 2024) por meio da análise dos resultados das políticas e programas que visam aproximar produtores e consumidores no país. Além disso, investigar os conflitos entre a agricultura familiar e as variações de preços no mercado pode contribuir para reduzir a vulnerabilidade dos agricultores.

Apesar do grande número de projeções climáticas disponíveis a partir de modelos climáticos globais e regionais, ainda existe uma grande incerteza nas projeções climáticas em várias regiões da América do Sul, e mais especificamente do Brasil. Algumas áreas podem apresentar condições mais úmidas, outras são mais secas, mas a fronteira entre elas ainda

não está bem definida. Em muitas partes do Brasil isto pode levar a uma deficiência de água devido à diminuição da precipitação e/ou ao aumento da evapotranspiração, conduzindo a uma redução estimada da disponibilidade de água per capita, o que pode resultar num aumento significativo da insegurança alimentar devido a impactos na produção e preço de alimentos. As projeções atuais, indicam que poderá haver uma redução da oferta de alimentos e conseqüentemente de um aumento do preço dos produtos agrícolas. Segundo Borges et al (2025) (<https://portalibre.fgv.br/node/11106>), comer está cada vez mais caro e a população mais pobre é a que mais sofre com essa tendência, que também afeta o acesso a alimentos mais saudáveis e menos processados. Não existe apenas uma causa para o encarecimento dos alimentos. Contudo, várias publicações e estudos recentes ressaltam o papel crescente da mudança do clima. Um relatório da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) publicado em junho de 2025 apontou que, desde 2015, secas severas ou extremas atingiram de 25% a 30% da superfície terrestre. É o dobro dos cerca de 15% observados nas décadas anteriores e quase o triplo dos 10% do início do século passado. O mesmo relatório destacou que o Brasil, um dos principais exportadores líquidos de alimentos foi o país que mais sofreu com secas nas últimas duas décadas, tanto em frequência quanto em intensidade desses eventos.

Isto se reflete de forma visível nos números da produtividade agregada da agropecuária brasileira. Segundo dados da USDA, ela cresceu apenas 0,4% ao ano entre 2015 e 2022, após ter avançado expressivos 3,0% anuais entre 1995 e 2014. Essa desaceleração dos ganhos de produtividade econômicos (que, além de levar em conta a evolução do rendimento por hectare, também considera os custos econômicos com insumos), também ocorreu em outros grandes exportadores de alimentos, como os Estados Unidos e a Argentina. Estudos do IPAM, Silva et al (2023) indicam que o aumento das temperaturas e as secas no cerrado brasileiro reduzem a produtividade da soja,

Os cientistas calcularam que toda vez que a temperatura no cerrado subiu 1°C acima da média histórica (1980 a 2018), a produtividade da soja caiu 6%. Importante lembrar que o aumento da temperatura devido as ondas de calor aumentam muito mais do que um grau. Portanto, as mudanças climáticas podem causar um forte impacto na produção da soja, como já causou no sul do Brasil (assad & assad, 2024). Segundo Buainain (2025) O impacto na soja se estende ainda à segurança alimen-

tar, um aspecto frequentemente negligenciado por seus críticos. Ao fornecer proteína vegetal de alta densidade nutricional e ser insumo central na produção de carnes, leite e ovos, a soja é uma das principais responsáveis pelo abastecimento alimentar tanto no mercado interno quanto internacional. Em um mundo que busca garantir alimentação acessível para uma população crescente, a soja brasileira cumpre um papel estratégico — direta e indiretamente — no combate à fome e à desnutrição. A crítica recorrente de que a produção de soja compromete a segurança alimentar ignora essa contribuição essencial, além de desconsiderar que a maior parte da insegurança alimentar no Brasil decorre de desigualdades no acesso à renda — e não da escassez de alimentos.

CENÁRIOS ATUAIS E PROJETADOS DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO BRASIL ENTRE 1986 E 2050

Segundo o relatório da OCDE, 2025, *Tendências, Impactos e políticas de adaptação para um mundo mais seco*, as mudanças climáticas aumentaram a área de terra exposta a secas e pioraram os impactos sobre as comunidades e as economias. Além da maior variabilidade das chuvas, o aumento das temperaturas acelera a evaporação, reduz a umidade do solo e aumenta o estresse sobre os recursos de água doce que estão se esgotando. Estima-se que os impactos econômicos de uma seca média hoje podem ser até seis vezes maiores do que em 2000, e os custos devem aumentar em pelo menos 35% até 2035. A figura 2 abaixo indica a mudança do número médio de eventos de seca (a) e (c) e sua intensidade (b) e (d) no período entre 2000 a 2020 em comparação a 1950 – 2000, segundo o mesmo relatório da OCDE (2025).

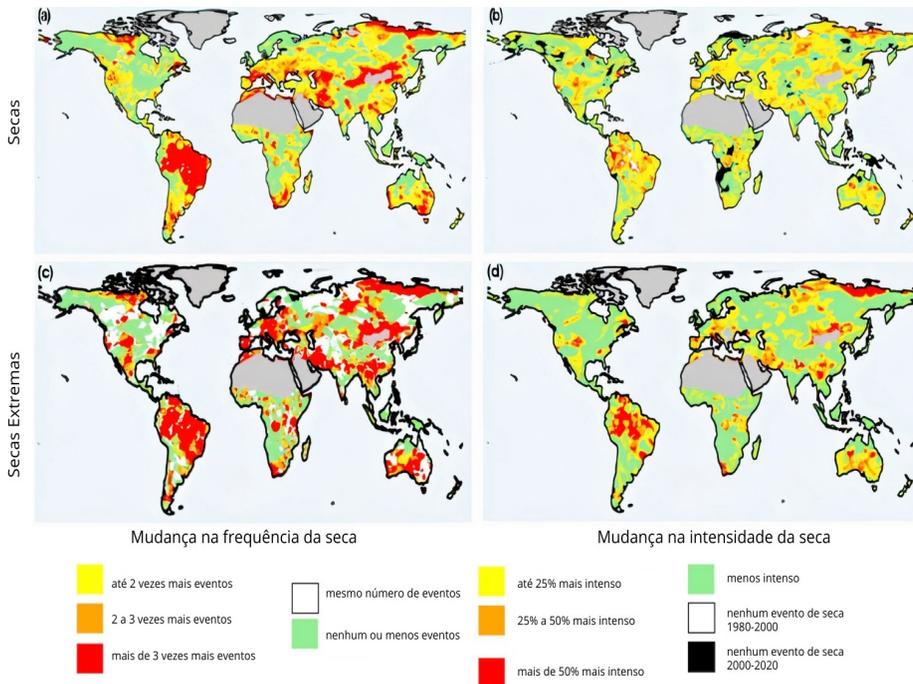


Figura 2: Mudança do número médio de eventos de seca (a) e (c) e sua intensidade (b) e (d) no período entre 2000 a 2020 em comparação a 1950 – 2000. Fonte: OCDE 2025.

O que se observa a partir destes mapa, é que o Brasil está ficando mais seco com forte intensidade da seca. Buscando fazer um downscale nesta análise e identificando a variação do número de dias secos, no Brasil, recente relatório do Banco Central (<https://www.bcb.gov.br/noticia-blogbc/32/noticia>) , a partir dos dados do INPE mostram um aumento significativo do numero de dias secos conforme ilustrado na figura 3 abaixo.

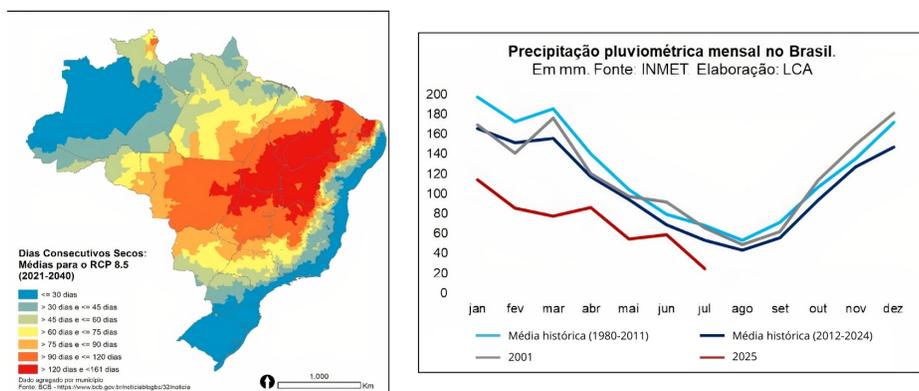


Figura 3: Dias consecutivos secos no período 2021-2040, e perfil da distribuição de chuva no Brasil com ênfase à 2025. Banco Central do Brasil - <https://www.bcb.gov.br/noticiablogbc/32/noticia> e LCA (IBRE FGV).

Verifica-se após a análise da figura 3, que os dias secos no Brasil estão aumentando e que mais recentemente, observa-se uma redução na oferta pluviométrica do País. Tais fatos vão provocar um efeito imediato no aumento do risco climático para as culturas nos próximos anos.

Por outro lado, ao se analisar os impactos da ação humana nas mudanças climáticas, a agropecuária é mencionada como uma das principais causas do desmatamento da floresta tropical, contribuindo para o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE), conforme relato de Manzatto (2020)

As emissões do setor, cerca de 31% do total nacional, são oriundas do processo produtivo, ou emissões de gás metano na pecuária, liberação de carbono pelas práticas de manejo do solo e outras IV inventário Nacional 2020, Brasil (2020). Se, por um lado, essas externalidades negativas geradas pela agropecuária podem fragilizar a imagem do setor, por outro lado representam uma excelente oportunidade para reduzir emissões ou mesmo recompor os estoques de carbono que foram liberados ao longo das últimas décadas. Dessa forma, cada vez mais os impactos do aquecimento global no Brasil serão verificados por meio de métricas que façam o balanço entre emissão/remoção. Desde o primeiro inventário de GEE na década de 1990, a rede clima teve um papel preponderante na determinação dos gases de efeito estufa na agricultura. No último inventário disponibilizado em 2020, o papel da rede clima foi fundamental para de-

terminação das emissões e remoções da Pecuária, Uso do solo, emissões do arroz fertilizantes nitrogenados e manejo de resíduos agrícolas.

ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS CLIMATICAS

Uma análise espaço-temporal foi feita no início do estabelecimento do INCT 2-Mudanças Climáticas. Os dados climatológicos foram levantados, organizados e padronizados para todo o território brasileiro. As variáveis consideradas para o período de 01/01/1980 a 31/12/2015 foram evapotranspiração de referência (ET_o em mm), precipitação (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), radiação solar (kWh/dia/m²), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), utilizando a base de dados *Daily gridded meteorological variables in Brazil* (1980–2013) (XAVIER et al, 2022). Esta grade de dados climáticos é estimada a partir de dados das estações meteorológicas terrestres no Brasil que são operadas por agências federais brasileiras (INMET e ANA) e pelo departamento de águas e energia elétrica do Estado de São, num total de 3.625 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas de controle. Informações climatológicas como precipitação futura (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) são obtidas a partir do modelo HADGEM2-ES, de 1970 a 2100 e posteriormente recalculada para o Modelo HadGem3 do CIMP6. Neste sentido, como já indicado anteriormente, a agricultura tropical depende da oferta de chuvas, portanto, as mudanças climáticas têm forte impacto nos sistemas produtivos. Modelos climáticos projetam um aumento significativo da deficiência hídrica no solo nas próximas décadas (Figura 4), enquanto oscilações nas precipitações já vêm impactando tanto a agricultura familiar quanto familiar.

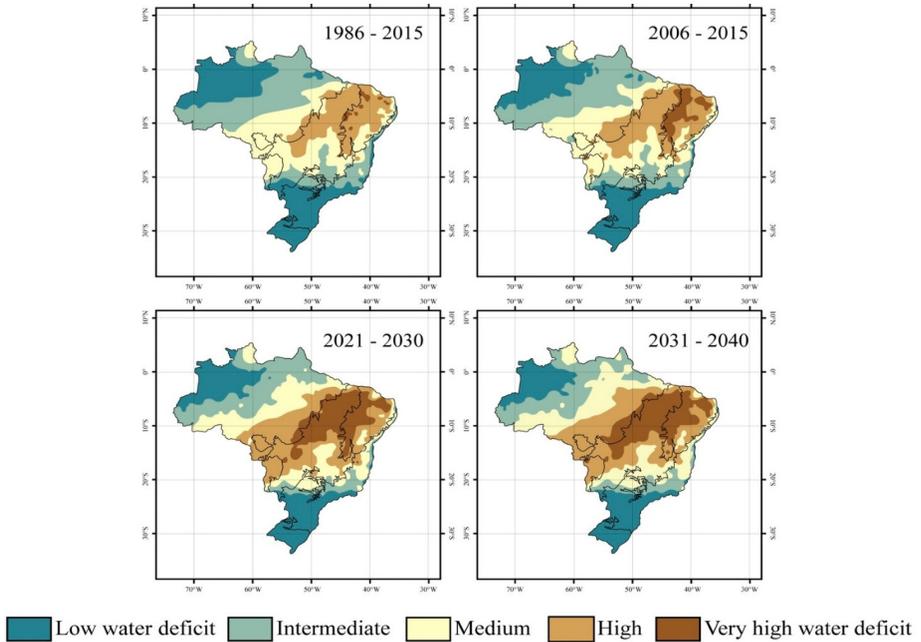


Figura 4: Projeção do aumento da deficiência hídrica no solo nas próximas décadas por modelos climáticos. Fonte: INCT Climate Change Phase 2 Ref: FAPESP 2014/50848-9 CNPq 465501/2014-1.

A estiagem crônica iniciada em 2012 reduziu o crescimento da produtividade agropecuária de 4,2% (1994–2011) para 1,5% (2012–2021) e gerou perda de 0,8 p.p. no PIB anual (<https://blogdoibre.fgv.br/posts/estiagem-de-2012-21-produtividade-agropecuaria-e-transbordamentos-na-economia>). Na Amazônia, mudanças no regime de chuvas e degradação ambiental ameaçam o cultivo soja-milho, dependente da floresta para garantir o início das chuvas e temperaturas adequadas (Leite-Filho et al., 2024). A segunda safra pode cair até 17% até 2050 (Pires et al., 2016; Abrahão & Costa, 2018), e prejuízos anuais podem chegar a US\$ 1 bilhão com até 56% de perda florestal em cenários de fraca governança (Leite-Filho et al., 2021). No Cerrado, forte queda de produtividade de grãos são esperados sob os cenários de média (RCP4.5) e alta (RCP8.5) emissão até o final do século XXI (Camilo et al., 2018).

Modelos indicam que a produção agrícola, especialmente de soja e milho, poderá se deslocar progressivamente do Matopiba para regiões subtropicais do Cerrado e da Mata Atlântica (Zilli et al., 2020). No entanto,

esse deslocamento poderá enfrentar limitações, uma vez que alguns cenários climáticos também projetam perdas significativas de aptidão agrícola no Sul do Brasil (65,7% até 2049), impactando especialmente a produção de milho como segunda safra. No sudeste da Amazônia, a aptidão agrícola também pode ser reduzida em até 84,9%, e a expansão das áreas cultivadas seria insuficiente para compensar essa queda na produtividade como a da cana-de-açúcar (Tanure et al., 2020). Como consequência da redução da produtividade e da geração de empregos associadas às mudanças climáticas, projeta-se uma queda acumulada de 1,18% no PIB da Amazônia Legal até 2049 (Tanure et al., 2020).

Uma redução de 65,7% na área adequada para o cultivo de soja, também poderá ocorrer no Sul do Brasil, com deslocamento das principais regiões produtoras para a porção sudeste da Amazônia, com uma redução projetada de 84,9% de usa área adequada até 2050, afetando principalmente a produção de milho como segunda safra. Por outro lado, os efeitos do aumento da temperatura poderiam beneficiar a produtividade da cana-de-açúcar, especialmente no Sul do Brasil, onde o aquecimento projetado tende a reduzir a frequência de geadas (Assad et al., 2013, Assad et al. 2016). Desastres socioambientais de 2024 causaram perdas agrícolas estimadas em R\$ 15,6 bilhões correspondendo a 48,6% do total dos prejuízos, sendo secas e estiagens e chuvas representando 51% e 48,7% das causas (CNM, 2024). Somente no Rio Grande do Sul, em março de 2020, as perdas diretas e irrecuperáveis nas lavouras de milho e soja atingiram 21% e 16%, respectivamente, totalizando prejuízos de R\$ 4,8 bilhões (MAPA, 2022). Quedas de temperaturas no inverno também afetam a agricultura do Brasil, com exemplos de redução da eficiência agrícola em 6,2% e 10%, com perdas totais de 13,2% por frio e 30,5% por secas entre 2005 e 2006 (Pereda & Alves, 2018). Mudanças no clima também favorecem a incidência de pragas e doenças em plantas cultivadas, com aumento da temperatura e da umidade do ar e do solo (Assad & Assad, 2024).

IMPACTOS NA AGRICULTURA FAMILIAR

A agricultura familiar no Brasil representa 77% dos estabelecimentos rurais, ocupando 23% da área total (80,9 milhões de hectares). Desse total, 48% da área eram destinadas a pastagens, 31% estavam cobertos

por matas, florestas ou sistemas agroflorestais, e 15,5% eram ocupados por lavouras. Esses estabelecimentos responderam por 23% do valor da produção agropecuária (IBGE, 2017). No Semiárido, onde vivem 38% dos agricultores familiares do país (Melo and Voltolini, 2019), mudanças climáticas e a desertificação devem reduzir fortemente a produtividade, sobretudo nas áreas de Caatinga, já 63% alteradas, impactando segurança alimentar, agravando pobreza e conflitos (Lindoso et al., 2014, Niemeyer & Vale, 2022). A aridificação crescente ameaça a subsistência, segurança hídrica e energética na região, causando migração de pessoas e desigualdades (Milhorange et al., 2020; Costa et al., 2024). Em culturas essenciais como feijão, milho e arroz, a seca reduziu as expectativas de produção agrícola em até 68% em 2024 (CEMADEN, 2024b). A seca de 2024 afetou o Sistema Cantareira e as hidrelétricas na Amazônia, comprometendo a agricultura familiar. A percepção dos impactos das mudanças climáticas já é notada por pecuaristas familiares da região do Pampa que relatam como principais riscos as estações irregulares, geadas tardias, extremos climáticos, pragas e esgotamento dos solos (Litre & Bursztyn, 2015).

Dado o grande número de modelos climáticos globais existentes e da divergência observada entre eles, é imprescindível utilizar uma metodologia de avaliação do comportamento dos modelos que seja capaz de identificar os que representam adequadamente a região de interesse. O desenvolvimento do modelo HadGEM2 resultou em um modelo de sistema terrestre de ferramenta científica útil para prever clima futuro e entender as dinâmicas climáticas dentro o sistema Terra (COLLINS et al, 2011). Este modelo foi estabelecido considerando a dinâmica dos ciclos de carbono terrestre e de carbono oceânico, a química atmosférica, os aerossóis, a radiação química e a hidrologia química, descritos por Martin (2011).

A integração do modelo seguindo o protocolo 5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* ou CMIP5) sugere que a representação das condições atuais também é satisfatória (COLLINS et al, 2011).

Utilizando os 14 modelos de projeção climática indicados no CMIP5 para toda a cobertura geográfica brasileira, nos cenários RCP4.5 e RCP 8.5, Marcos Junior et al. (2018) obtiveram como as projeções de temperatura, precipitação e evapotranspiração ao longo do século XXI para o Brasil. As regiões mais afetadas pela elevação da temperatura média anual são o Norte e o Centro-Oeste. Contudo, espera-se aumento destas variáveis para todo Brasil. O mesmo comportamento é esperado para

a evapotranspiração, que reflete o aumento da demanda futura por mais água destinada às áreas de irrigação. Com relação à precipitação obtida, projeta-se que nas regiões Norte e Nordeste haja diminuição das precipitações ao longo do século, enquanto para as demais regiões a maioria dos modelos indica aumento nas médias anuais.

Os resultados mais importantes obtidos no subcomponente agricultura do INCT Fase 2, em 2019, foi finalizar a organização dos dados espaciais referentes ao uso da terra e simular o balanço hídrico para todo o Brasil, em uma grade regular de 25 km, para os anos de 1986-2005, 2005-2015, 2020-2030, 2030-2040 e 2040-2050, utilizando o modelo HADGEM-2-ES. Com o avanço do projeto, para avaliar os impactos na produtividade, utilizou-se o modelo mais recente, ou seja, o HadGEM3-GC31-MM.

O balanço hídrico climatológico (BHC) é a metodologia usualmente empregada para monitorar a quantidade de água armazenada no solo ao longo das estações do ano, que variam em função da perda e reposição de água. O BHC contabiliza a quantidade de entrada e saída de água numa região, no período de 30 anos, conhecido também por normal climatológica, e o sucesso de aplicação da ferramenta depende das variáveis locais (DANTAS et al., 2007).

A demanda por água em cenários futuros pode ser prevista através no balanço hídrico projetado, ou seja, aplica-se a metodologia para uma dada condição inicial e, então, comparam-se os resultados a um conjunto de dados climáticos futuros (GONDIM, 2011; PONPANG-NGA, 2016).

O balanço hídrico foi estimado conforme o esquema ilustrado na figura 5.

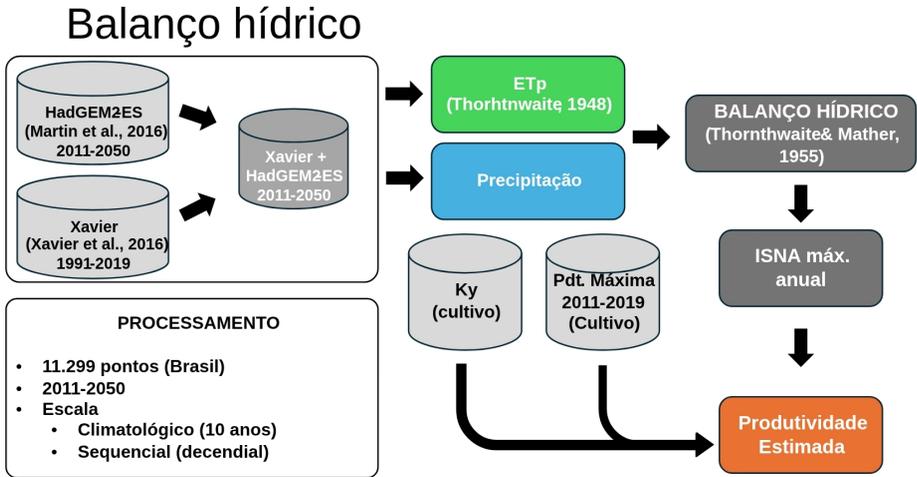


Figura 5: Esquema de simulação do Balanço hídrico para estimativa de variáveis meteorológicas e posteriormente utilizados na estimativa da produtividade.

A partir dos resultados do balanço hídrico, foram obtidos os mapas de deficiência hídrica ilustrados anteriormente na figura 4, e mapas de temperatura, ilustrados na figura 6, que indicam quais áreas serão mais afetadas pelo aumento da temperatura e redução das chuvas.

A sequência de etapas para elaboração da metodologia para projeções climáticas está sujeita a inúmeras incertezas que são agregadas ao processo de modelagem matemática. Contudo, apesar de tais limitações, esta é a metodologia que vem sendo utilizada para quantificar os efeitos da interferência de ações antrópicas no sistema climático com a finalidade de propor estratégias de mitigação e adaptação aos novos cenários (TORRES, 2014).

Para prever a influência das mudanças do clima na agricultura, as projeções climáticas elaboradas por etapas de modelagens matemáticas consideram também as forçantes radiativas, conhecidos como RCPs, que consistem em séries temporais de concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa e aerossóis. Os RCPs foram selecionados para abranger uma variedade de futuros viáveis, desde os otimistas, nos quais a forçante radiativa decorrentes de ações antrópicas é reduzida (RCP 2.6), até situações pessimistas (RCP 8.5). Há também os cenários intermediários, como no caso do RCP 4.5 (LIDDICOAT et al 2013).

Em geral, 85% da produtividade das culturas depende diretamente da maior ou menor deficiência de água no solo.

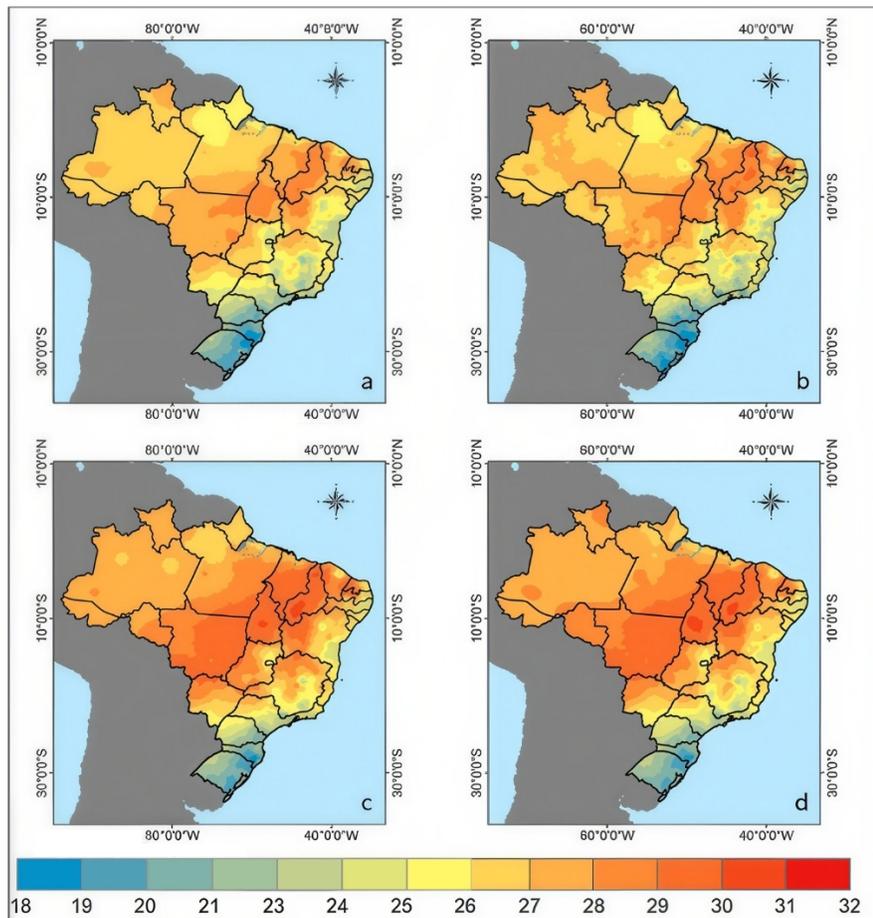


Figura 6: Mapas de temperatura, obtidos a partir dos dados dos modelos HAD-GEM2 e *Daily gridded meteorological variables in Brazil* para os períodos 1986-2015, 2006-2015, 2021-2030 e 2030-2040.

A evapotranspiração na média climática varia de 801 mm a 2.287 mm no Brasil, sendo a ETP total máxima de 2.465 mm, 2.901 mm e 2.877 mm para as séries históricas 2006-2015, 2021-2030 e 2031-2040, respectivamente. Enquanto a mínima é de 749 mm para 2006- 2015 e manteve-

-se no índice de 826 mm para 2021-2030 e 2031-2040 na média para todo território (figura 7).

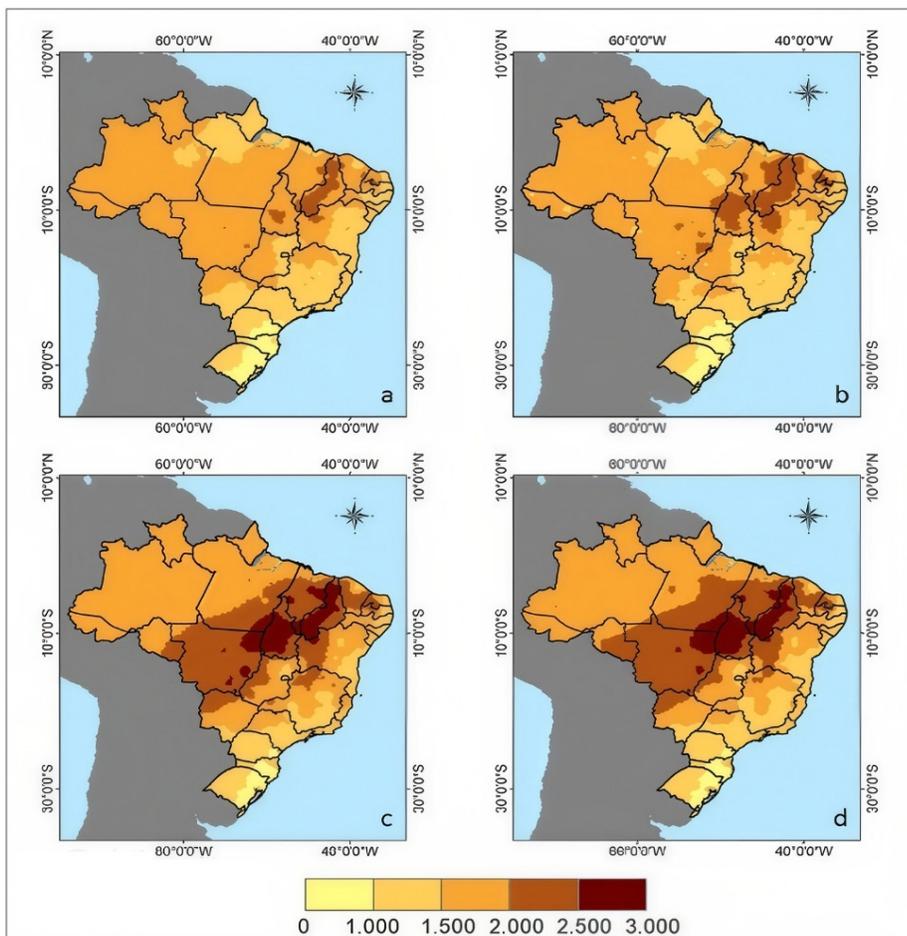


Figura 7: Evapotranspiração total (a) 1986 - 2016; (b) 2006-2015; (c) 2021-2030; (d) 2031-2040.

A utilização de séries de dados meteorológicos comparadas à normal climatológica permite a comparação direta entre a condição do período base (“atual”) com cenários futuros. Portanto, utilizando um dos cenários futuros do IPCC, como o presente no modelo HadGEM2-ES, com a forçante RCP8.5, observam-se os seguintes impactos: **aumento da temperatura, aumento da evapotranspiração potencial, redução do excedente hídrico e aumento da deficiência hídrica**. Essa tendência permite

uma proposição de modelo de organização territorial junto com soluções alternativas, para resolver ou minimizar o quadro levantado pelas emergências climáticas.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS NA PRODUÇÃO DE GRÃOS

Em função da avaliação de parâmetros fortemente influenciados pelas mudanças climáticas, é importante verificar qual foi a evolução da oferta de alimentos, em termos de produção agrícola, para alguns componentes da cesta básica, como, arroz, feijão, trigo e mandioca, que têm importante relação com a segurança alimentar.

Considerando a relevância do setor agropecuário brasileiro, o planejamento de suas atividades e proposição de políticas públicas deve ser feito de forma a manter modelos sustentáveis ao longo de décadas. As condições edafoclimáticas brasileiras variam em toda sua extensão; portanto, conhecer essa variação e modelá-la ao longo do tempo e do espaço é importante para avaliar as áreas que podem alcançar maior ou menor produtividade, bem como seu risco, principalmente relacionado a fatores climáticos. Esse conhecimento diz respeito tanto a entidades governamentais quanto privadas, pois seus impactos negativos podem deteriorar o desenvolvimento da sociedade nos aspectos econômicos, sociais e ambientais. Por outro lado, estratégias bem estruturadas trazem oportunidades de escolher uma melhor gestão para áreas de maior risco e melhorar a alocação de investimentos para aquelas com menor risco, por exemplo.

A simulação das variações climáticas utilizando modelos agrometeorológicos deve ser temporal e espacialmente bem dimensionada para melhorar as ações de tomada de decisão. Assim, modelos de balanço hídrico podem ser aplicados em todo o país com o objetivo de caracterizar o volume de água disponível para exploração agrícola. Esta prática é muito comum na avaliação de riscos climáticos para agricultura.

Desde 1996, o Brasil adota uma política pública conhecida como Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), com forte apoio da rede clima do MCTI, que indica para todos os 5.568 municípios brasileiros o que plantar, quando plantar e onde plantar, com nível de risco de 20%. Ou seja, de uma maneira geral quem seguir essas indicações poderá ter 80% de chance de sucesso na colheita da lavoura. Esse sistema utiliza 30 anos de dados diários de chuva e temperatura, que vão sendo atualizados ao

longo dos anos. Uma estratégia para buscar a inferência das mudanças do clima é de a cada ano, incorporar os dados do ano anterior e eliminar os dos do primeiro ano de simulação. Com isso é possível incorporar as alterações climáticas que estão ocorrendo. Uma discussão premente é, mantem-se a série de 30 anos, ou reduz-se essa série para 10 anos, considerando a velocidade com que as mudanças do clima estão ocorrendo?

Os dados utilizados como entrada no modelo (Zarc), utilizados para estimativa de perdas de produtividade, foram extraídos de dois modelos meteorológicos distintos, um focado na modelagem meteorológica do passado (Xavier et al., 2022) e o outro com o objetivo de modelar as tendências futuras dos fatores climáticos, principalmente temperatura e precipitação. Os ganhos de água são contabilizados pela precipitação e as perdas pela evapotranspiração, considerando a variância temporal em intervalos sequenciais e decadais. Além disso, são considerados três cenários do sistema radicular, com profundidade rasa (75 mm), média (100 mm) e mais profunda (125 mm) do volume de água. Devido ao grande volume de dados, todas as etapas de processamento foram conduzidas por meio de uma estrutura que automatiza o cálculo do balanço hídrico em todas as mais de 11 mil estações meteorológicas virtuais do chamado modelo (Xavier et al., 2022). Os produtos resultantes foram exportados como resultados de uma única estação, para cada valor de capacidade hídrica disponível (representando a profundidade do sistema radicular) e para cada década, bem como para o todo. Para se estimar as perdas de produtividade futuras, são utilizados os dados do Modelo CIMIP6 corrigido. Assim é possível, utilizando a base metodológica do Zarc, verificar o impacto na produtividade nos próximos anos (2020 a 2050)

Apesar dos grandes avanços científicos no uso do geoprocessamento de imagens de satélite para estimar a área de culturas agrícolas, ainda não existe um método preciso para avaliar as perdas na produtividade. Assim, são utilizados os seguintes parâmetros de culturas:

- Duração do ciclo vegetativo, subdividido em fases fenológicas, pela identificação de períodos críticos (estágios), como período inicial, desenvolvimento da cultura, meia estação e final da estação;
- Kc (coeficiente de cultura), como método de definição da demanda de água da planta;
- Profundidade do sistema radicular, particularmente importante para estimar a capacidade de água disponível (CAD).

- O procedimento de coleta e análise de dados para estimativa de produtividade está indicado no esquema da figura 8.

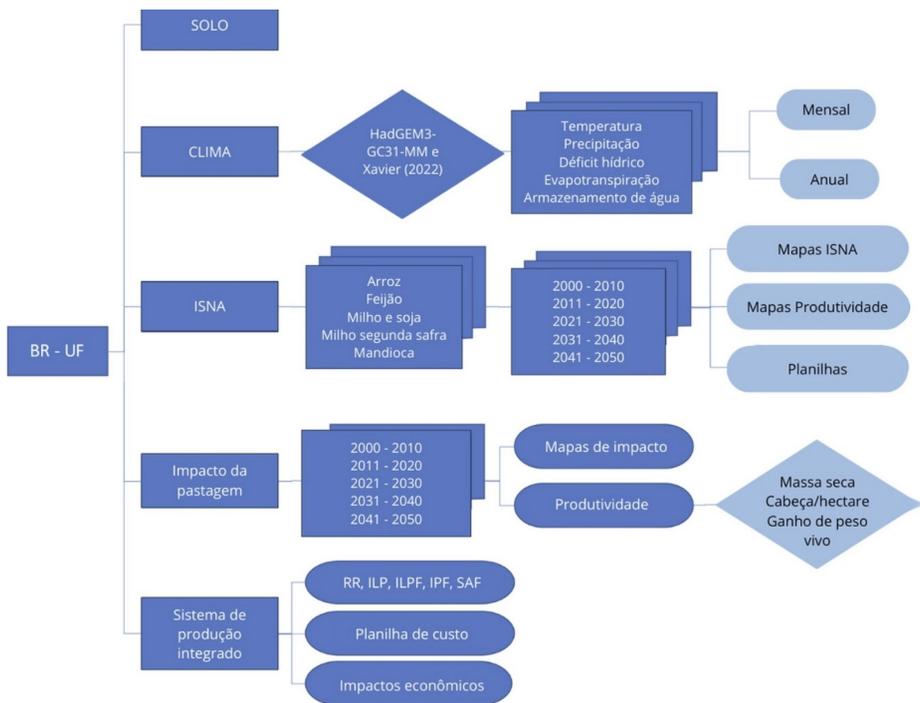


Figura 8: Esquema adotado para estimar a produtividade das culturas até 2050.

A primeira vez que esse método foi utilizado para avaliar perdas na agricultura foi em Assad e Pinto (2008), utilizando o modelo Precis do IPCC. As avaliações das perdas foram feitas até o ano de 2070. Já em 2007 o modelo indicava que em 2020 poderia haver perdas em grãos na região Sul no valor de 7 bilhões de reais. Nesse caso, houve um erro no valor absoluto. Segundo a CONAB em relatório Brasil 2021, histórico de perdas de safras no Brasil, a projeção do montante perdido no Brasil, correspondeu a 36,7 milhões de toneladas. Na cotação semanal de março de 2020 (21 a 25 de março de 2020), o preço pago ao produtor, de acordo com Brasil 2021), considerando as devidas proporções perdidas para cada produto, o valor monetário das perdas correspondeu a R\$ 84,8 bilhões.

Os cenários de avaliação de perdas foram se ajustando em função dos novos modelos climáticos lançados pelo IPCC. Assad et al. (2016), a

partir relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), e utilizando as simulações dos modelos mais recentes referentes aos cenários das mudanças do clima até o ano de 2100, fizeram projeções de impactos para as principais culturas brasileiras e que dizem respeito à agricultura familiar, como milho, milho safrinha, feijão e arroz, e de quão vulneráveis estão estas culturas se a temperatura continuar subindo nas atuais taxas (0,3 °C) por década. Ao mesmo tempo, foi feito um esforço de caracterizar os eventos extremos que vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos. Projeções para os próximos anos referentes à frequência de ocorrência de temperaturas diárias superiores a 34 °C foram feitas para todo o país, e atingem todos os agricultores. Isso foi feito para as chuvas extremas, ou seja, estimadas as frequências de ocorrência de chuvas intensas em todo o país, o que tem consequências imediatas na erosão dos solos, em perdas de fertilizantes e na desestruturação dos solos, além de perda de produtividade das culturas. Todas as simulações foram feitas a partir dos modelos do último relatório do IPCC AR5, com os cenários extremos RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados desta simulação feita em 2016, manteve as tendências de perdas acentuadas na agricultura, que segundo a Conab seguiu um padrão de 15% das perdas na safra.

No relatório do INCT – 2021, no componente segurança alimentar, com a avaliação dos resultados com o modelo HadGEM3-GC31-MM, os resultados parecem mais pessimistas do que os do modelo CIMIP5 HadGem2-ES. As perdas de rendimento foram maiores do que as obtidas no modelo anterior.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos com o modelo HadGEM3-GC31-MM do CIMIP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050. No caso da soja nos cerrados a perda estimada na produtividade é de 26% no período.

Tabela 1: Resultados obtidos com o modelo HadGEM3-GC31-MM do CIMP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050

MODELO: HADGEM3 - GC - CMIP 6 - RCP 8.5					
Produtividade (kg/ha)					
Bioma	Cultura	2011/2020	2021/2030	Diferença	Diferença (%)
Amazônia	Soja	3.078	2.456	623	20
	Milho	2.543	2.795	252	10
	Arroz	1.917	1.907	10	1
	Feijão	678	679	2	0
Cerrado	Soja	3.244	2.399	845	26
	Milho	4.331	4.879	548	13
	Arroz	2.105	1.867	238	11
	Feijão	1.179	1.077	103	9
Floresta Atlântica	Soja	3.349	3.524	175	5
	Milho	4.818	5.329	510	11
	Arroz	3.542	3.433	109	3
	Feijão	1.171	1.112	58	5
Pampa	Soja	2.458	2.845	87	16
	Milho	3.812	3.756	56	1
	Arroz	7.337	7.337	-	-
	Feijão	1.030	1.030	-	-
Caatinga	Soja	-	-	-	-
	Milho	660	722	62	9
	Arroz	1.604	1.819	215	13
	Feijão	321	344	23	7

Fonte: Relatório INCT-Fase2 2022. Assad & Assad (2024)

2031/2040	Diferença	Diferença (%)	2041/2050	Diferença	Diferença (%)
2.504	574	19	2.562	516	17
3.597	1.054	41	2.867	324	13
1.825	92	5	1.766	151	8
672	6	1	660	18	3
2.277	967	30	2.486	758	23
6.964	2.633	61	5.227	896	21
2.083	21	1	1.897	207	10
1.210	30	3	1.166	14	1
3.523	174	5	3.702	353	11
6.176	1.358	28	5.608	790	16
3.708	166	5	3.513	29	1
1.193	22	2	1.178	7	1
2.819	361	15	2.998	540	22
3.314	498	13	3.936	124	3
7.337	-	-	7.337	-	-
1.030	-	-	1.030	-	-
-	-	-	-	-	-
925	265	40	716	56	8
1.879	75	17	1.899	295	18
374	53	16	374	53	16

Segundo os resultados dos modelos agrometeorológicos, utilizando os dados do CIMIP6, indicados na Tabela 1, em todos os casos, o impacto na produtividade é negativo, o que indica uma possível redução na oferta de alimentos se as práticas atuais de produção forem mantidas. Entretanto, com a adoção de práticas agrícolas do programa ABC, ABC+, Agricultura regenerativa e a intensificação da produção, o que se tem observado é um aumento da produtividade, especialmente da soja e do milho. Na figura 9 é indicado as perdas de soja no Estado do Rio grande do sul, entre os anos 2010 e 2022.

Com o uso de modelos matemáticos calibrados para as condições do Cerrado, Macena et al. (2024) conseguiram simular as emissões de óxido nitroso (N₂O), sob diferentes sistemas de manejo para um período de 50 anos. Os autores constataram que, com o aumento da temperatura ao longo do tempo, essas emissões serão cada vez maiores, enquanto a produção de biomassa e o rendimento de grãos diminuirão. Esses resultados pela via da emissão dos GEE mostram claramente que haverá perdas na produção de grãos no Brasil.

Já no trabalho de Assad et al. (2019b) são indicadas as áreas de maior risco de perdas. A área em vermelho na Figura 10 mostra a dimensão do problema, com aumentos significativos da temperatura, comprometendo a produção agrícola no Brasil nos próximos anos.

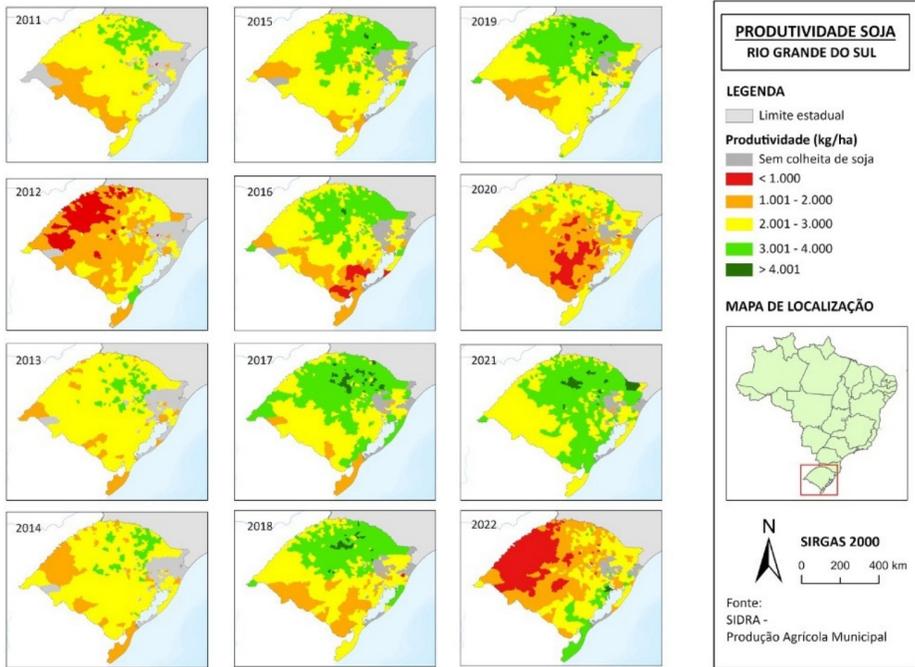


Figura 9: Variação espacial das perdas de produtividade no Rio Grande do Sul, no período de 2010 a 2022. Fonte: Assad & Assad (2024).

Finalmente na figura 10 é indicado em Vermelho as áreas que poderão ter temperatura elevadas e com fortes ondas de calor que irão comprometer a produção agrícola.

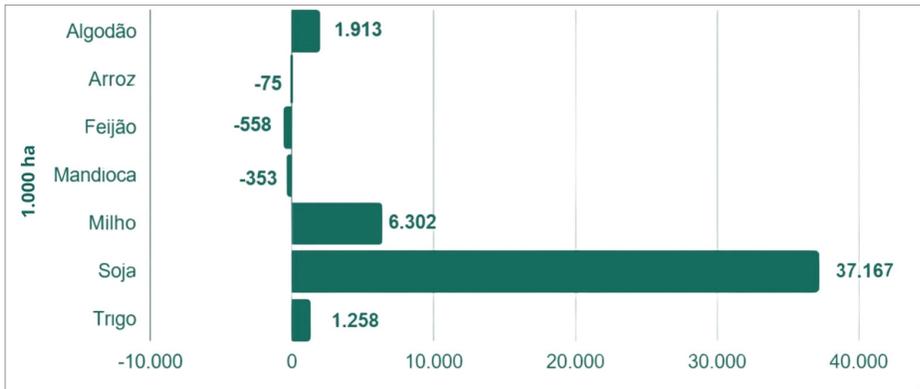


Figura 11: Variação da área plantada para várias culturas do Brasil entre os anos de 2021 e 2050. As culturas de feijão, arroz e mandioca apresentam uma diminuição da área plantada enquanto soja e milho apresentam um aumento na área plantada.

As projeções da produção e da área das principais culturas mostram que a área plantada no Brasil deve ultrapassar 100 milhões de hectares em 2050, considerando que atualmente são 78,2 milhões de hectares. Essa expansão está concentrada em soja, milho (segunda safra) e, cana-de-açúcar. Parte do aumento da produção de milho e algodão deve se dar na área de soja. Algumas lavouras, como arroz, feijão e mandioca, devem perder área. Naturalmente, uma parcela da expansão de área de soja, milho e cana-de-açúcar deverá ocorrer em novas áreas e substituição de outras lavouras. Essa expansão também poderá ocorrer em áreas de pasto degradado. Contudo, é de suma importância que haja uma aceleração da conversão, por falta de manejo, de áreas de pastagens de baixa ou baixíssima produtividade em áreas de lavouras ou em sistemas integrados de produção.

Até 2050, há necessidade de acomodar uma expansão de cerca de 45,6 milhões de hectares em áreas de lavouras. Essa expansão implica em um incremento de 37 milhões de hectares à área atual de soja e cerca de 6 milhões de hectares à área atual de milho. A redução da pressão pela extensão da área de lavouras no Brasil passa obrigatoriamente pela ampliação de técnicas e tecnologias que aumentam a produtividade da terra sem a necessidade de novas áreas. A ampliação do Sistema de Plantio Direto de alta qualidade, associado com sistemas integrados de produção podem colocar a produtividade dos grãos em um novo patamar.

Adicionalmente, o avanço rápido da pesquisa, inovação e tecnologia de novos cultivares deve ampliar a adoção da fixação biológica de nitrogênio em leguminosas (feijão) e gramíneas, contribuindo com a produtividade de milho, arroz e pastagens.

Com o aumento da temperatura e redução da oferta de chuva, a situação da produção de alimentos pode ser afetada. Nos últimos cinco anos o que se observou foi forte impacto das mudanças do clima na produção de soja e milho, reduzindo a safra em mais de 25 milhões de toneladas.

Um necessário resumo destes cenários para produção de grão indica que:

Muitos são os problemas enfrentados pela agricultura no Brasil e no mundo, principalmente por agricultores familiares, especialmente aqueles relacionados à pobreza e seus efeitos. As atuais vulnerabilidades sociais dessas populações são suscetíveis a aumentar com os impactos provocados pela mudança do clima.

Dentre os principais problemas identificados, podemos destacar:

1. 95% das perdas no setor agrícola brasileiro ocorrem em razão de inundações ou secas (Assad et al., 2008). Projeta-se que tais eventos extremos ocorram com mais frequência;
2. Considerando a magnitude relativa da variabilidade das precipitações em três escalas temporais - interanual, decenal e no longo prazo (100 anos), “a proporção da variação total explicada pela variabilidade do curto prazo é três vezes maior do que a tendência de longo prazo (mudança climática), e duas vezes maior do que a variabilidade decenal” (Baethgen, 2010);
3. A tendência futura indica redução das chuvas ao longo do tempo para as regiões Norte e Nordeste .
4. As principais perdas no ambiente rural projetadas por recentes estudos indicam a perda de terras agricultáveis como principal fator;
5. As regiões semiáridas do Nordeste ficarão mais secas, enquanto a parte leste da Amazônia brasileira se tornará um bioma mais parecido com a savana;
6. Para a agricultura, a tendência de seca pode levar a resultados negativos no âmbito da segurança alimentar, fator que acarretará preocupações para os agricultores familiares. Um exemplo que reflete essa preocupação é a projeção de que a mandioca pode desaparecer das regiões semiáridas do Nordeste. Projeta-se que

a produção de milho também seja severamente impactada no Agreste do Nordeste

7. Algumas culturas de sementes adaptadas ao clima tropical poderão migrar para o Sul do Brasil ou regiões mais altas para compensar o aumento na temperatura (Assad et al., 2008). Essa migração pode resultar na concorrência entre as áreas, bem como na migração do trabalho rural para regiões mais favoráveis;
8. Outros fatores esperados no âmbito do estresse criado nos sistemas agrícolas são a redução da fluidez das águas e do potencial de irrigação, aumento da incidência de pestes e doenças, mudanças nos biomas e diminuição da biodiversidade de animais e plantas.

PASTAGENS E EMISSÕES DA PECUÁRIA

Segundo o MAPA(2024), o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPPD), instituído pelo Decreto nº 11.815 de dezembro de 2023, *solidifica o compromisso do Brasil com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Paris, por meio da promoção de políticas e ações para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e adaptação às mudanças climáticas*. Este programa surge em um contexto no qual há o entendimento de que a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais estão integrados à promoção da segurança alimentar e nutricional, bem como ao desenvolvimento econômico do país.

Em relação à pecuária bovina, em 2022, o país registrou um rebanho de 234,3 milhões de cabeças (IBGE, 2022)¹, produzindo 8 milhões de toneladas de carne (IBGE, 2024)². Deste total, 2,9 milhões de toneladas foram exportadas, representando 22,9% das exportações mundiais (FAO, 2023)³. Para sustentar essa produção, a pecuária brasileira ocupa uma área de 179 milhões de hectares de pastagens (LAPIG, 2022). No entanto, mais de 60% dessas pastagens encontram-se com baixo ou médio vigor (degradadas ou em processo de degradação), resultando em baixa produtividade e elevadas emissões de GEE. A conversão dessas áreas degradadas em sistemas de produção sustentáveis é crucial para a preservação dos biomas, a redução das emissões e o aumento da produtividade agropecuária.

Outra consideração é que, a partir dos avanços científicos nos sistemas de produção de soja e milho, é possível indicar que o aumento da produção dessas culturas deverá ocorrer pela conversão de áreas de pastos degradados. Com esta estratégia é possível adotar sistemas integrados de produção, onde numa mesma área é possível praticar duas lavouras e aumentar a produtividade da carne, com redução de emissão de GEE.

O bioma Cerrado é um bom exemplo de possível adoção dos sistemas integrados. No início da ocupação do Cerrado brasileiro, com a introdução do plantio da soja, as cultivares eram de ciclo longo com produtividade em torno de 1,7 toneladas por hectare (Arantes e Souza, 1993). Atualmente a produtividade média no Cerrado passou de 2,9 t.ha⁻¹ a 3,26 t.ha⁻¹ (PAM 2022). Esses resultados oficiais indicam um ganho médio de produtividade superior a 170%, ou seja, superior a 4% ao ano. Entretanto esses ganhos vêm diminuindo e estão no patamar de 1,2%. Plantando uma única safra por ano, com as práticas de preparo, adubação, plantio e colheita, significa utilizar 42% do tempo útil do cultivo agrícola na propriedade. Após a colheita, o solo fica exposto e nos outros 58% do tempo útil há emissões de GEE, erosão, baixa infiltração de água etc. Essa foi a premissa utilizada nos estudos anteriores, ou seja, indução ao desmatamento para produzir mais, com alta emissão de GEE. Introduzindo a prática de manejo de solo baseada nos sistemas integrados, os solos ficam cobertos por mais tempo, evitando perdas de solo e aumentando a quantidade de água e a capacidade de infiltração. A combinação soja e milho permite uma produtividade **média nacional** em torno de sete toneladas de grãos por hectare, crescendo a taxas superiores a 3 a 4% ao ano. Portanto, somente desmatar para produzir não é uma prática sustentável.

O exemplo acima pode ser ilustrado pela Figura 12 que mostra como funciona o manejo de culturas em áreas com pastos degradados. No caso do Mato Grosso, a média de produtividade em sistemas integrados pode chegar a 9,5 toneladas de grãos/ha, com uma remoção média de 1.3 t C/ha/ano.

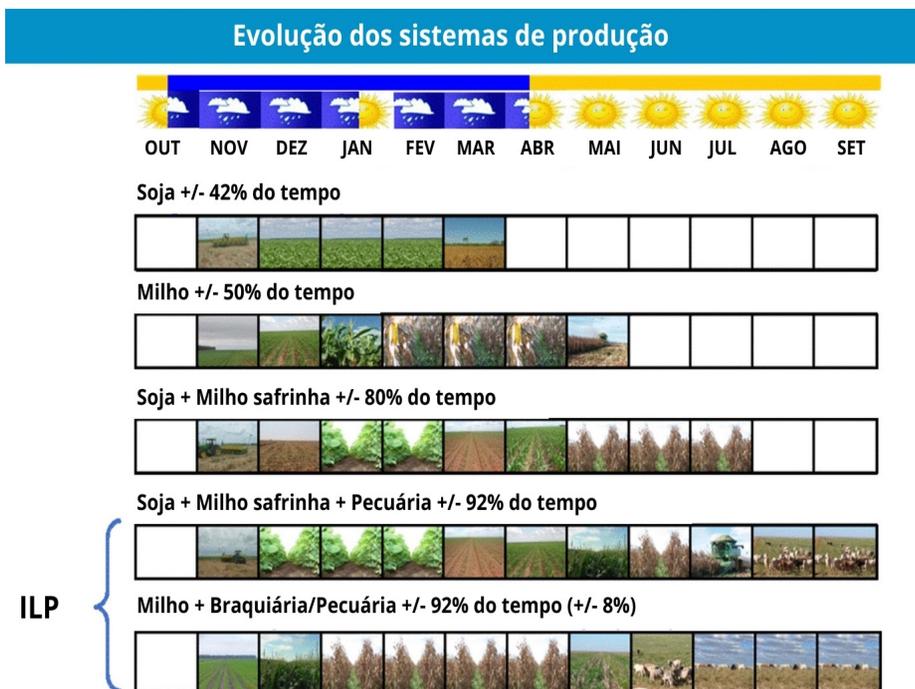


Figura 12: Evolução dos sistemas de produção solteiro para sistemas integrados. Fonte: Vilela, 2019. CBAGRO.

A Figura 13 indica como é o ciclo da emissão/remoção de carbono após o desmatamento com a introdução da recuperação de pastos, ao longo dos anos.

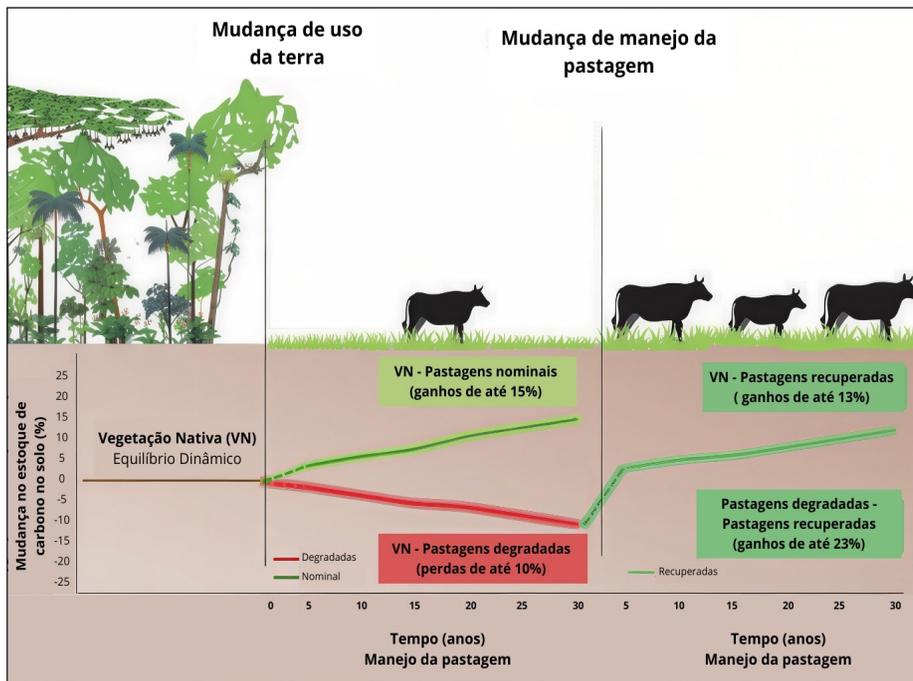


Figura 13: Ciclo das emissões e remoções após o desmatamento e com a adoção do manejo de pastos recuperados. Ilustração de Bruna E. Schiebelbein. Fonte: Ruiz et al. 2023.

Observa-se que ao longo dos anos a perda nominal de carbono no solo é estimada em 10%, podendo ter um ganho de até 23% com a recuperação dos pastos degradados. Ao introduzir as culturas, por exemplo soja+milho, o ganho seria mais carbono no solo e aumento da produtividade da área. Esta hipótese, adotada pelo Plano ABC/ MAPA, duplica a produção sem haver necessidade de desmatar.

O ciclo soja+milho não fixa carbono, mas ao introduzir o pasto no sistema ao longo dos anos há um ganho importante de matéria orgânica no solo, e conseqüentemente de carbono orgânico, como indicado na Figura 14.

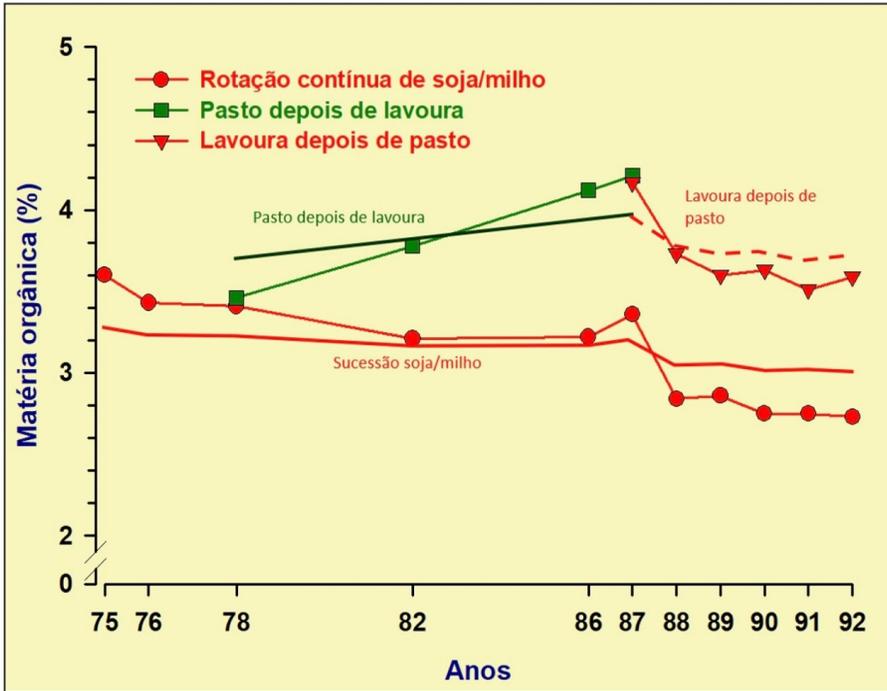


Figura 14: Variação do teor de matéria orgânica no solo em sistemas de rotação contínua de soja e milho, pasto depois de lavoura e lavoura depois de pasto. Fonte: Sousa et al. (1997).

Com o aumento do sistema radicular no pasto de *Brachiaria*, observa-se um ganho substancial na matéria orgânica do solo e consequente aumento no carbono orgânico. Com isso, tem-se como benefícios maior infiltração de água, redução da erosão do solo e aumento da tolerância aos veranicos intensos.

Nos estudos desenvolvidos na fase dois do INCT-Mudanças Climáticas, procurou-se identificar onde estavam estes pastos degradados e utilizando **metodologia da Embrapa (2018)** para priorização de áreas de pastos degradados que podem ser transformadas em sistemas produtivos, este potencial foi mapeado e quantificado.

Neste caso foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados com prioritários para recuperação em três níveis: Municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados, até

45 mil e até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF (Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta). Na figura 18, estão identificados os municípios que devem ser priorizados e sua distribuição geográfica.

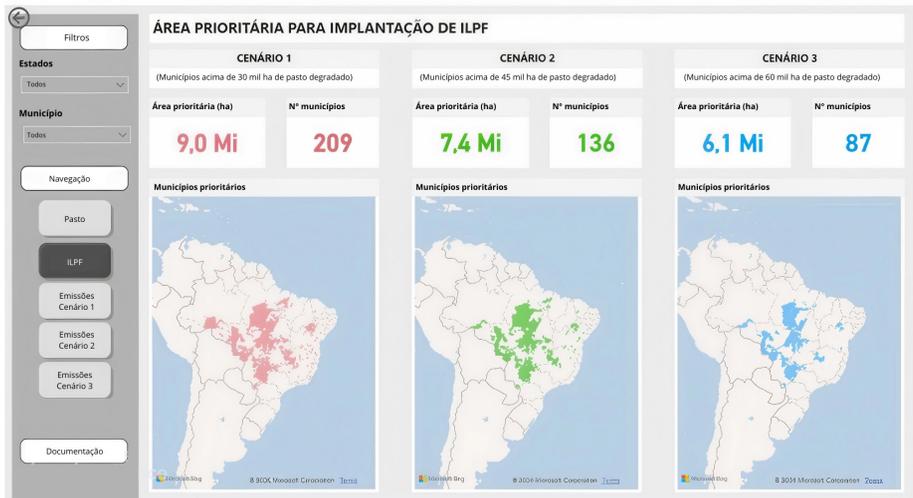


Figura 15: Municípios identificados com maior aptidão para implantação de ILPF em pastos degradados.

Isso corresponde à **redução** pela pecuária de 11,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, sem considerar as remoções.

AÇÕES OFICIAIS DO GOVERNO BRASILEIRO

Uma análise de conjuntura mais detalhada dos agricultores e pecuaristas brasileiros indica que:

- A grande maioria dos agricultores são conservadores.
- Ainda apresentam dificuldades de entendimento do processo de aquecimento global.
- Em torno de 40% não assimilaram ainda a origem da emergência climática.
- Está havendo uma evolução rápida para a adoção de práticas referentes a agricultura regenerativa.

- Ainda é possível constatar que alguns adotam práticas de desmatamento e queimadas para produzir.
- A evolução tecnológica tem permitido avanços importantes por parte dos agricultores no entendimento das mudanças climáticas.
- Uma parcela importante de agricultores, principalmente na região centro oeste é guiada por orientações de negacionistas que tem forte influência no setor.

Visando contornar e minimizar essa situação o governo tem implementados vários planos de ação com recursos alocados no plano safra que basicamente seriam:

Plano ABC

Plano ABC+

Plano Nacional de Fertilizantes

Plano Safra

Programa de Aquisição de Alimentos

Programa de recuperação de pastos degradados.

Programa Floresta +

Controle e prevenção do desmatamento e dos incêndios florestais

Biodiversidade - Fauna e Flora

Com estes planos já com financiamento definido no plano safra, abre-se uma grande janela de oportunidades para a agricultura e pecuária brasileira, para se reduzir os impactos das mudanças do clima e aumento de produção. Essas oportunidades seriam:

- O Brasil pode dobrar a produção agropecuária sem desmatar.
- Com sistemas integrados, o Brasil pode oferecer produtos com baixa ou baixíssima pegada de carbono, atendendo a exigências dos mercados externos.
- Em pouco tempo, o país pode se tornar o maior sumidouro de carbono do Planeta, sem queimadas e desmatamento.
- Adotando as práticas corretas, é viável a redução de 30% nas emissões de metano da pecuária.
- O Brasil pode suprir a necessidade de alimentos no mundo com aumento de mais 40% na oferta da produção agropecuária.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O subcomponente segurança alimentar do INCT-FASE 2 abordou o tema da agricultura e oferta de alimentos sobre diversos aspectos.

O primeiro deles foi de identificar a vulnerabilidade climática para agricultura brasileira, considerando a deficiência hídrica, a temperatura e a evapotranspiração. A avaliação da vulnerabilidade permitiu concluir que em todos os aspectos, num horizonte de produção agrícola até o ano de 2050, se nenhuma medida de adaptação ao clima for feita, a produção agrícola estará comprometida. Observou-se um significativo aumento da deficiência hídrica, indo na direção da região Nordeste para a região Centro-oeste. As consequências do aumento da deficiência hídrica, associada ao aumento da temperatura e da evapotranspiração, teria forte impacto na produção de milho (segunda safra) e redução da produtividade da soja. Já na região Sul, com possível aumento da chuva anual, essa região seria menos vulnerável na produção de celulose, em função da baixa ou nenhuma deficiência hídrica, e a possível consolidação da produção de culturas perenes.

Num segundo momento, a partir dos estudos desenvolvidos no INCT e na rede clima, com relação às principais culturas que fazem parte da cesta básica, observou-se que haverá uma retração da área plantada, principalmente para as culturas de arroz, feijão e mandioca e um pequeno acréscimo na área de milho. Isto significa que pouco a pouco essas áreas serão substituídas pelas *commodities* como soja e milho e isto certamente terá reflexo na oferta de alimentos. Foram identificados ganhos de produtividade na produção de arroz, nenhuma alteração na produtividade do feijão, um ganho razoável na produção de trigo, principalmente com a expansão de trigo irrigado na região Centro-oeste, e uma redução na produção da mandioca, o que indica uma redução da oferta deste produto principalmente para a população de baixa renda.

Com relação às *commodities*, foram analisadas as culturas de soja e milho e outras culturas da cesta básica. Diferentemente do que foi observado em relação às análises estatísticas dos dados do MAPA, ao aplicar modelos agrometeorológicos alimentados por dados dos modelos Climáticos do CIMP6 do IPCC, não haverá ganho de produtividade para nenhuma cultura em nenhum bioma. Por ordem de intensidade de perda de produtividade, a Amazônia será o bioma mais afetado, seguido do Cerrado, depois Caatinga e finalmente Pampa e Mata atlânticas. As

condições para que isso aconteça é não considerar nenhuma medida de adaptação dos sistemas de produção nestes biomas.

Entretanto, considerando a adoção de sistemas de produção integrados, a situação pode ser revertida e a oferta de alimentos ampliada.

Em outro momento, quando analisada a situação das pastagens degradadas, que podem ser revertidas em áreas de produção integrada, foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados prioritários para recuperação em três níveis: i) municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados; ii) municípios com até 45 mil; e iii) municípios com até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF, injetando na produção agrícola, ainda que potencialmente, 202 milhões de toneladas de grãos (com Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta) e estimativamente, mais 10 milhões de cabeças com peso de abate de 7 arrobas.

Isso significa que de uma situação de alta vulnerabilidade da agricultura, e conseqüentemente da produção de alimentos, as ações de adaptação dos sistemas de produção a modelos mais equilibrados são uma grande oportunidade para o Brasil, se manter num alto patamar de oferta de alimentos, considerando as *comodities* e os produtos da cesta básica. Assim, é imperativo que o agronegócio brasileiro adote práticas que promovam a qualidade e a quantidade de oferta de alimentos, com aderência aos mercados externos. Os grandes desafios para reduzir os impactos das mudanças climáticas seriam: Eliminar o desmatamento Eliminar as queimadas, reduzir o uso de combustíveis fósseis, mudar o modelo de produção agrícola, para modelos mais equilibrados, buscar cada vez mais a adoção de sistemas integrados de produção agrícola como ILP, ILPF, SAF, e recuperar uma imensa área de pastos degradados

REFERÊNCIAS

Abrahão, G. M., & Costa, M. H. (2018). Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.031>

Arantes, N. E.; Souza, P. I. de M. de. Cultura da soja nos cerrados. Piracicaba: Potafos, 1993. 535p. *Simposio sobre a cultura da soja nos Cerrados, Uberaba*, 1992.

Assad, E. D. (2021). Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. *Ciência e Cultura*, 73(1), 35–40. <https://doi.org/10.21800/2317-66602021000100007>

ASSad, E. D. *et al.* (2016) Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira as mudanças climáticas . Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança clima no Brasil, v.4, p.127-88.

Assad, E. D., & Assad, M. L. R. C. L. (2024). Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *Estudos Avançados*, 38(112), 271–292. <https://doi.org/10.1590/S0103-4014.202438112.015>

Assad, E. D., Marin, F. R., Evangelista, B. A., & Cunha, G. R. (2016). Agricultura. In PBM C (Ed.), *Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas* (Vol. 2, p. 339–375). Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

Assad, E. D., Pinto, H. S., Zullo Junior, J., & Evangelista, B. A. (2013). Impacto das mudanças climáticas nos riscos de produção agrícola no Brasil. In M. A. Nobre (Ed.), *Mudanças climáticas e agricultura no Brasil*. Embrapa.

Assad, E. D.; Pinto, H. S. (2008). Aquecimento Global e a Nova Geografia da produção Agrícola no Brasil. Brasília: *Embaixada Britânica*, v.1. 82p.

Assad, E.D.; Lopes-Assad, M.L. (2024) Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *USP Estudos avançados* 38 (112), 2024

Baethgen, W. Climate Risk Management for Adaptation to Climate Variability and Change. *CROP SCIENCE*, VOL. 50, MARCH–APRIL 2010

Borges *et al* (2025) Perspectivas 2025. <https://portalibre.fgv.br/node/11106>

Brasil (2020). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 531 p.

Brasil. 2021 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Histórico de perdas na agricultura brasileira : 2000-2021 / Secretaria de Política Agrícola . – Brasília : MAPA/AECS, 2022. ISBN: 978-85-7991-185-9

Buinain, A.M. 2025. Soja no Brasil: controvérsias em debate. <https://jornal.unicamp.br/artigo/2025/07/30/soja-no-brasil-controversias-em-debate/> 3 p.

Camilo, J. A., de Lelis Teixeira de Andrade, C., Amaral, T. A., Tigges, C. H. P., de Melo, M. L. A., Chan, C. S., & Garcia y Garcia, A. (2018). Impact of climate change

on maize grown in the Brazilian cerrado. *ASABE 2018 Annual International Meeting*. <https://doi.org/10.13031/AIM.201800967>

CEMADEN. (2024c). Cemaden registra recorde de alertas e mais de 1,6 mil ocorrências de desastre no Brasil em 2024. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/noticias/cemaden-registra-recorde-de-alertas-e-mais-de-1-6-mil-ocorrencias-de-desastre-no-brasil-em-2024>

Acesso em: 20 de junho de 2025.

Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Hughes, J.; Jones, C. D.; Joshi, M.; Liddicoat, S.; Martin, G.; O’connor, F.; Rae, J.; Senior, C.; Sitch, S.; Totterdell, I. Wiltshire, A.; Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.

Confederação Nacional de Municípios (CNM). (2024). Panorama dos desastres no Brasil: 2013 a 2023 (Estudo Técnico nº 202405). https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2024/Estudos_tecnicos/202405_ET_Panorama_Desastres_Brasil_2013_a_2023.pdf

Acesso em: 20 de junho de 2025.

Contag, Observatório do Clima. (2025). Agricultura familiar e os sistemas alimentar remoção de carbono e transição justa São José dos Pinhais, PR. Seven Editora. 50p DOI: 10.56238/livrosindi202507-001

Costa, F. R. C., Marengo, J. A., Albernaz, A. L. M., Cunha, A. P., Cuvi, N., Espinoza, J.-C., Ferreira, J., Jimenez-Muñoz, J. C., Páez, M. B., Carramaschi de Algão Querido, L., & Schöngart, J. (2024a). *Policy Brief: Droughts in the Amazon*. <https://doi.org/10.55161/LVYB6857>

Dantas, A.A.A.; CARVALHO, L.G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências em Lavras, MG. (2007). *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v.31, n.6, p.1862-1866. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

FAO. 2023. Food Outlook – Biannual report on global food markets. Food Outlook, November 2023. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc8589en>

Gondim, R. S.; Fuck Júnior, S. C. de F.; Evangelista, S. R. M.; Castro, M. A. H. de; Teixeira, A. dos S. (2011). Impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração em nível de Bacia Hidrográfica utilizando um Sistema de Informações Geográficas.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística I PAM Produção Agrícola Municipal (2022). Série histórica. Acessado em 10 de junho de 2024. Disponível em: ipeadata.gov.br.

Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., & Oliveira, U. de. (2024). Climate risks to soy-maize double-cropping due to Amazon deforestation. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/JOC.8381>

Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>

Liddicoat, S.; Jones, C.; Robertson, E. 2013 CO2 Emissions Determined by HadGEM2-ES to be Compatible with the Representative Concentration Pathway Scenarios and Their Extensions. *Journal of Climate*, 26(13), 4381–4397. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00569.1>

Lindoso, D.P., Dalboni Rocha, J., Debortoli, N., Ibiapina Parente, I., Eiró, F., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., Hutton, C., Boulanger, J.-P., Lindoso, D. P., Rocha, J. D., Debortoli, N., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., & Parente, I. I. (2014). Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: a case study in Ceará. *Climatic Change*, 127, 93–105. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1116-1>

Litre, G., & Bursztyn, M. (2015). Climatic and socio-economic risks perceptions and adaptation strategies among livestock family farmers in the pampa biome. *Ambiente & Sociedade*, 18(3), 55–80. <https://doi.org/10.1590/1809-4422A-SOC668V1832015>

Manzatto, C.V. 2020. Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais / Celso Vainer Manzatto ... [et al.]. –Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. PDF (35p.) – (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 1516-4691 ; 122).

Macena et al. Effects of agricultural management and of climate change on N2O emissions in an area of the Brazilian Cerrado: Measurements and simulations using the STICS soil-crop model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 363, 108842. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880923005017?via%3Dihub>

Marcos Junior et al. (2018). Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5 Rev. bras. meteorol. 33 (4) • Oct-Dec 2018 • <https://doi.org/10.1590/0102-7786334007>

Martin, G.M.; Bellouin, N.; Collins, W.J.; Culverwell, I.D.; Halloran, P.R.; Hardiman, S.C.; Hinton, T.J.; Jones, C.d.; Mcdonald, R.E.; McLaren, A.J.; O'connor, F.M.; Roberts, M.J.; Rodriguez, J.M.; Woodward, S.; Best, M.J.; Brooks, M.E.; Brown, A.R.; Butchart, N.; Dearden, C.; Derbyshire, S.H.; Dharssi, I.; Doutriaux-Boucher, M.; Edwards, J.M.; Falloon, P.D.; Gedney, N.; Gray, L.J.; Hewitt, H.T.; Hobson, M.; Huddleston, M.R.; Hughes, J.; Ineson, S.; Ingram, W.J.; James, P.M.; Johns, T.C.; Johnson, C.E.; Jones, A.; Jones, C.P.; Joshi, M.M.; Keen, A.B.; Liddicoat, S.; Lock, A.P.; Maidens, A.V.; Manners, J.C.; Milton, S.F.; Rae, J.G.L.; Ridley, J.K.; Sellar, A.; Senior, C.A.; Totterdell, I.J.; Verhoef, A.; Vidale, P.L.; Wiltshire, A. (2011) The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geosci Model Dev* 4(3):723–757. doi: 10.5194/gmd-4-723-2011, 2011

Milhorance, C., Sabourin, E., le Coq, J. F., & Mendes, P. (2020). Unpacking the policy mix of adaptation to climate change in Brazil's semiarid region: enabling instruments and coordination mechanisms. *Climate Policy*, 20(5), 593–608. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1753640>

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2024). Conversão de pastagens degradadas em sistemas de produção agropecuários e florestas sustentáveis. Plano de priorização de áreas e estimativa de investimentos. GPP (Grupo de Políticas Públicas - Esalq/USP) Deflo/SDI/Mapa (Departamento de Reflorestamento e Recuperação de Áreas Degradadas Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo do Ministério da Agricultura e Pecuária). Brasília, 294 P.

Niemeyer, J., & Vale, M. M. (2022). Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, 122, 106385. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSE-POL.2022.106385>

Niemeyer, J., & Vale, M. M. (2022). Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, 122, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.landuse-pol.2022.106385>

OCDE (2025), Perspectivas globais da seca: tendências, impactos e políticas para se adaptar a um mundo mais seco, Publicação da OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/d492583a-en>.

Pereda, P., & Alves, D. (2018). Climate and weather impacts on agriculture: the case of Brazil. *Economia Aplicada*, 22(3), 5–26. <https://doi.org/10.11606/1980-5330/EA119584>

Pires, M. O. (2020). 'Cerrado', old and new agricultural frontiers. *Brazilian Political Science Review*, 14(3), e0004. <https://doi.org/10.1590/1981-3821202000030006>

Ponpang-Nga, P.; Techamahasaranont, J. Effects of climate and land use changes on water balance in upstream in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Agric. Nat. Resour.* 2016, 50, 310–320.

Ruiz, Francisco *et al.* Constructing soils for climate-smart mining. *Communications Earth & Environment*, v. 4, p. 1-6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00862-x>. Acesso em: 26 maio 2024.

Silva, D. S., Arima, E. Y., dos Reis, T. N. P., & Rattis, L. (2023). Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2173370>

Sousa, D. M. G. de; Vilela, L.; Rein, T. A.; Lobato, E. Eficiência da adubaçãofosfatada em dois sistemas de cultivo em um latossolo de Cerrado. In: Congresso-

Brasileiro de ciência do solo, 26., 1997, Rio de Janeiro. Informação, globalização, uso do solo Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

Tanure, T. M. do P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P., & Carvalho, T. S. (2020a). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Economia*, 21(1), 73–90. <https://doi.org/10.1016/J.ECON.2020.04.001>

Tanure, T. M. do P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P., & Carvalho, T. S. (2020b). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Economia*, 21(1), 73–90. <https://doi.org/10.1016/J.ECON.2020.04.001>

Torres, Roger Rodrigue. Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul. 2014. 271f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2014.

Vilela, L. 2019. XXI CBAGRO, Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. MCTI-2020- Quarto Inventário Nacional de Emissões e remoções antrópicas de Gases de efeito estufa.

Xavier, A. C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, v.42, n.16, p.8390-404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731> 2022.

Zilli, M., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Valin, H., Mosnier, A., Leclère, D., Havlík, P., Kraxner, F., Lopes, M. A., & Ramos, F. M. (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of The Total Environment*, 740, 139384. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139384>

8. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SAÚDE

Celia R. S. Garcia⁴³, Bruno Caramelli⁴³, Mariana Veras⁴³, Marie-Anne Van Sluys⁴³, Paulo Saldiva⁴³, Evangelina Araujo⁴³, Mariana Farrel Côrtes⁴³, Nazareno Scaccia⁴⁴, Thaís Guimarães⁴³, Silvia Figueiredo Costa⁴³, Maria Cassa Mendes-Correa⁴³, Ester Cerdeira Sabino⁴⁵, Giselle Maria Rachid Viana⁴⁶, Carolina Aguiar⁴⁷, Nathália Nogueira Chamma Siqueira⁴³, Izis Monica Carvalho Sucupira⁴⁶

INTRODUÇÃO

As interações entre mudanças climáticas e saúde pública vêm se intensificando de forma alarmante, exigindo abordagens integradas e multidisciplinares para mitigar seus efeitos crescentes. Este capítulo, é dividido em cinco partes: No primeiro texto, de Bruno Caramelli, é discutido que os impactos sobre a saúde cardiovascular são exacerbados por eventos extremos como ondas de calor e frio, que induzem desidratação, hipercoagulabilidade e agravos cardiovasculares, especialmente entre populações vulneráveis. Esses riscos são ampliados pelas desigualdades

43 Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP.

44 Centro Universitário do ABC, FMABC, Santo André, SP

45 Universidade Municipal de São Caetano do Sul, USCS, São Caetano do Sul, SP.

46 Instituto Evandro Chagas, IEC, Belém, PA.

47 Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, São Paulo, SP.

Autora correspondente: cgarcia@usp.br

sociais, pela poluição atmosférica e pela inadequação das infraestruturas urbanas. A necessidade de políticas públicas adaptativas e de formação em saúde planetária torna-se, assim, urgente. A seguir, o texto de Mariana Veras, Marie-Anne Van Sluys e Paulo Saldiva, contribui ao mostrar como a urbanização não planejada tem transformado o ambiente urbano em um agravante da crise climática e sanitária. A impermeabilização do solo, a perda de áreas verdes e a concentração de atividades nas regiões centrais criam ilhas de calor, alteram padrões de chuvas e favorecem o aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares. As cidades tornam-se territórios de risco, exigindo políticas que integrem ética, sustentabilidade e saúde pública no planejamento urbano

No campo das doenças infecciosas, os efeitos do clima são igualmente devastadores. O texto de Evangelina Araújo, Marina Côrtes, Nazareno Scaccia, Thaís Guimarães e Sílvia Costa, analisa o impacto das mudanças climáticas sobre doenças bacterianas de veiculação hídrica, que exige ações coordenadas entre setores. A ausência de saneamento adequado, o aumento de enchentes e a proliferação de roedores colocam em risco comunidades inteiras. A implementação de sistemas de alerta, investimentos em infraestrutura e uso da modelagem climática para antecipar surtos são fundamentais para proteger a população em cenários de eventos extremos.

A seguir, Maria Correa e Ester Sabino ampliam essa discussão ao abordarem as arboviroses, como a dengue, cuja expansão está diretamente relacionada ao aumento da temperatura global, à urbanização desordenada e à pobreza. A proliferação do *Aedes aegypti*, favorecida por condições climáticas e ambientais degradadas, impõe desafios significativos à saúde pública. A Amazônia, novamente surge como epicentro de vulnerabilidades devido ao desmatamento, fluxo migratório e fragilidade dos sistemas de saúde. Por fim, o texto de Giselle Viana, Carolina Aguiar, Nathália Siqueira, Izis Sucupira e Celia Garcia evidencia que a malária, embora com mortalidade reduzida, apresenta crescimento na incidência, particularmente na Amazônia brasileira. A transmissão é profundamente influenciada por fatores como desmatamento, variabilidade climática e mobilidade humana. A resistência aos antimaláricos e as limitações no diagnóstico de *P. vivax* reforçam a importância de investimentos em novas ferramentas terapêuticas e vacinas, voltadas à proteção de grupos vulneráveis.

Em conjunto, os textos apontam para a urgência de uma nova estratégia preventiva em saúde pública, que considere a interdependência entre clima, território, infraestrutura, ciência e justiça social. O enfrentamento dos desafios climáticos exige respostas globais e locais, baseadas em evidências, inovação e cooperação entre setores e saberes.

8.1 Emergências climáticas, poluição e doenças cardiovasculares: a crise (nem tão) invisível do Século XXI

Bruno Caramelli

INTRODUÇÃO

O segundo episódio da série para televisão *Extrapolations* (Apple TV+, 2023), é ambientado em 2046, um futuro distópico marcado por mudanças climáticas extremas (1). O episódio mostra um período muito difícil para a humanidade, com degelo, calor extremo, desaparecimento de cidades costeiras e extinção de espécies. Logo no início, o personagem é um menino de dez anos apaixonado por uma baleia, a última representante viva desta espécie. O menino tem limitações físicas relacionadas a um grande cansaço e falta de ar aos esforços. A doença, facilmente identificada pelos cardiologistas como insuficiência cardíaca, foi chamada pelos médicos daquela época de “coração de verão”. O problema cardíaco do menino é descrito como uma condição decorrente do aquecimento global, um símbolo dramático, mas cientificamente provocador, dos efeitos fisiológicos da crise climática sobre o corpo humano (Figura 1).

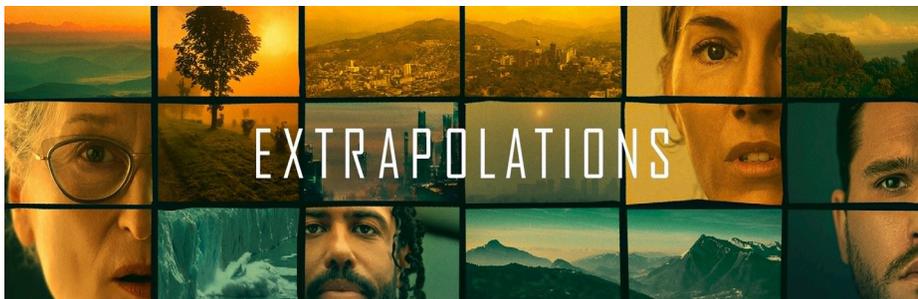


Figura 1: Série de TV *EXTRAPOLATIONS*, Apple TV+, 2023.

Elaborei uma hipótese fisiopatológica plausível para explicar o mal que acomete o menino. Com o aumento extremo da temperatura, o organismo humano precisa intensificar os mecanismos de dissipação de calor, reduzindo a resistência periférica por meio de vasodilatação. Circulando mais pela pele, o sangue perde calor e resfria o organismo. O coração, por sua vez, precisa aumentar a frequência das contrações, para bombear o sangue para o leito vascular aumentado. Para complicar a situação, a desidratação decorrente do calor excessivo, reduz o volume sanguíneo do organismo dificultando o necessário aumento do débito cardíaco e sobrecarregando, de maneira sustentada, o trabalho do coração para manter a perfusão dos órgãos. Em indivíduos predispostos ou vulneráveis — como crianças e idosos — essa sobrecarga pode evoluir para um fenômeno conhecido por taquicardia incessante, condição reconhecida como sendo uma das causas de cardiomiopatia taquicárdica e insuficiência cardíaca. O “coração de verão”, portanto, deixa de ser apenas uma ficção dramática e se torna uma metáfora realista para os impactos invisíveis e subestimados do clima sobre o sistema cardiovascular.

Contexto Histórico e Evolutivo

As características do meio ambiente, em especial o clima, sempre influenciaram a saúde dos seres vivos. A análise da curva de isótopos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) evaporado do oceano e sequestrado no gelo glacial permite estudar a variabilidade climática natural ao longo de períodos muito longos, como milhões de anos. Nos últimos 10 milhões de anos foram identificadas mudanças profundas no clima do planeta, mas nenhuma fase anterior se compara à atual em termos de aquecimento global (2) (Figura 2).

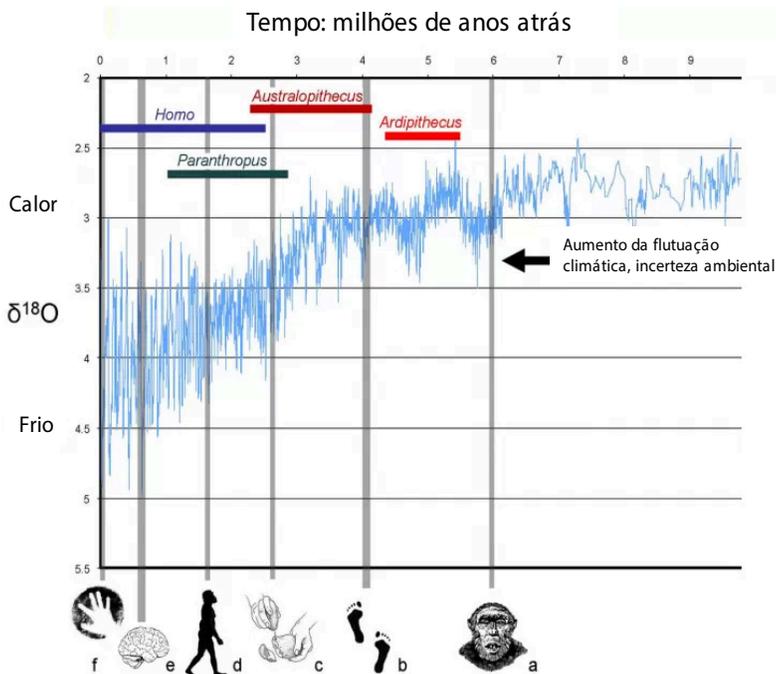


Figura 2: Variações climáticas ao longo dos últimos 10 milhões de anos, com base em curva de isótopos de oxigênio ($\delta^{18}O$).

Como pode ser visto na Figura 2, variações de temperatura já ocorreram anteriormente na Terra. Por outro lado, o estudo da evolução e da seleção natural dos seres vivos sugere que há duas características importantes para determinar a sobrevivência das espécies frente aos desafios impostos pelo meio ambiente: a capacidade de adaptação e a velocidade com que as mudanças ambientais ocorrem. A velocidade das mudanças atuais, impulsionadas pela industrialização, desmatamento e queima de combustíveis fósseis, pode ter ultrapassado a capacidade adaptativa da espécie (2) (Figura 3).

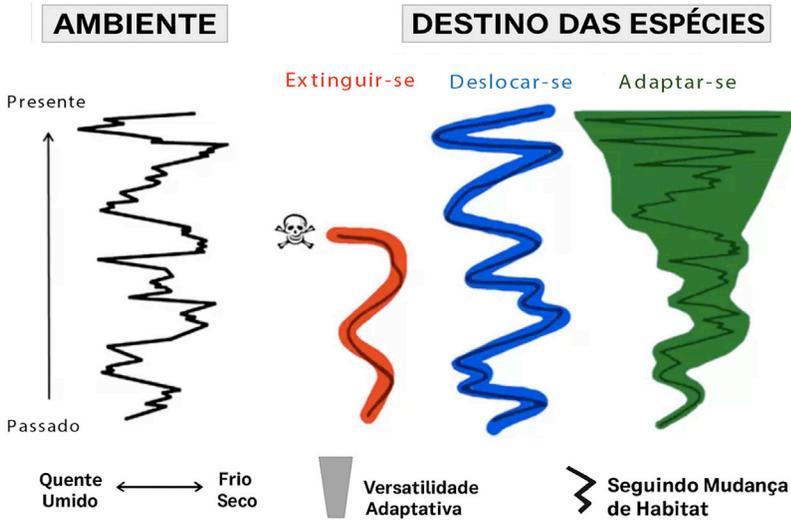


Figura 3: O meio ambiente, a capacidade de adaptação e o destino das espécies.

Evidências Epidemiológicas

Em 2024, Kazi e colaboradores publicaram uma revisão sistemática sobre a relação entre mudanças climáticas e saúde cardiovascular. A pesquisa relacionou 11 publicações brasileiras entre os 492 estudos observacionais que atenderam aos critérios de inclusão de publicações, sendo que 182 delas examinaram temperaturas extremas, 210 o ozônio ao nível do solo, 45 a fumaça de queimadas e 63 eventos climáticos extremos, como furacões, tempestades de poeira e secas. O ozônio ao nível do solo, também conhecido como ozônio troposférico, é um poluente atmosférico gerado por reações químicas entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. O ozônio troposférico aumenta quando poluentes emitidos por carros, usinas de energia, caldeiras industriais, refinarias, indústrias químicas e outras fontes reagem quimicamente na presença da luz solar. Temperaturas mais elevadas aceleram a produção de ozônio troposférico (3).

Os estudos analisados na revisão sistemática apresentavam resultados provenientes de 30 países de alta renda, 17 de renda média e 1 de baixa renda. A força da evidência foi classificada como suficiente para indicar associação entre doenças cardiovasculares e condições ambientais como temperatura extrema, elevação do ozônio troposférico, tempesta-

des tropicais, furacões, ciclones e tempestades de poeira. A evidência foi considerada limitada, entretanto, para a fumaça de queimadas e inadequada para secas e deslizamentos de terra. A exposição a temperaturas extremas foi associada ao aumento da mortalidade e morbidade cardiovascular, mas a magnitude variou conforme a temperatura e a duração da exposição. O ozônio troposférico, por sua vez, amplificou o risco associado a temperaturas elevadas e vice-versa. Eventos climáticos extremos, como furacões, foram associados a um aumento do risco cardiovascular que persistiu por muitos meses após o evento inicial (3).

Alguns estudos observaram um pequeno aumento na mortalidade cardiovascular, em paradas cardíacas fora do hospital e em internações por doença isquêmica do coração após exposição à fumaça de queimadas, outra condição relacionada às mudanças climáticas, enquanto outros não confirmaram a associação. Idosos, populações radicalizadas e minorias étnicas e comunidades de baixa renda, entretanto, foram desproporcionalmente afetadas, reforçando a importância da identificação e prevenção dirigida para populações vulneráveis (3).

No Brasil, em 2019, Paula Santos e colaboradores observaram que a exposição a partículas pequenas, provenientes principalmente do tráfego de veículos, está associada à elevação da pressão arterial em trabalhadores hipertensos e/ou diabéticos. Em estudo observacional anterior, em 2008, os mesmos autores já tinham encontrado associação entre poluição atmosférica e aumento de visitas emergências aos prontos-socorros e que os indivíduos com diabetes são especialmente suscetíveis aos efeitos adversos da poluição do ar sobre suas condições de saúde (4,5). Desta maneira, ficou evidente mais uma vez que as vítimas principais das mudanças climáticas, no que diz respeito à saúde, são as pessoas mais frágeis, aquelas já com doenças crônicas, os idosos, crianças e pessoas com condições econômicas desfavoráveis.

A Figura 4, está representada no Guia de bolso sobre mudanças climáticas, publicado em 2024, pelo Ministério da Saúde do Brasil, e sumariza as evidências disponíveis sobre as consequências das mudanças climáticas sobre a saúde (6).

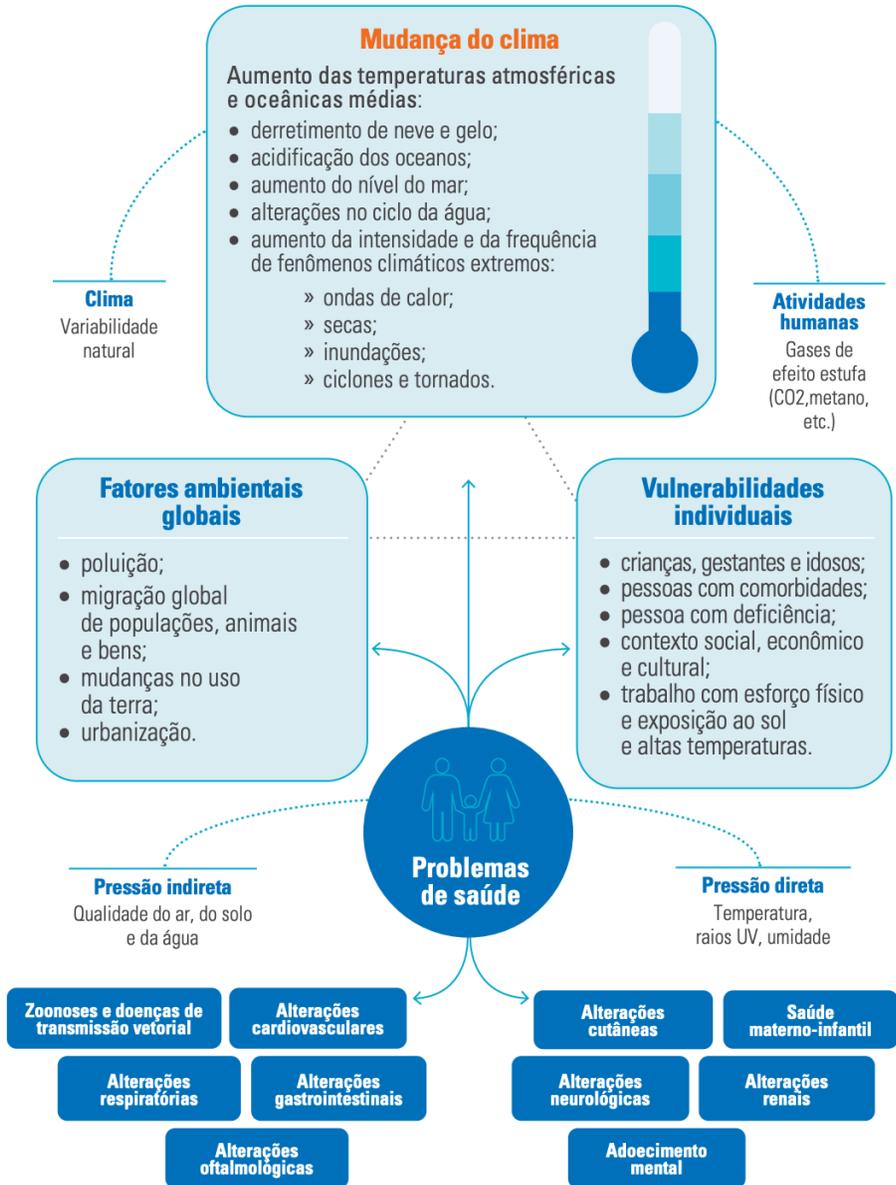


Figura 4: As mudanças climáticas e seus impactos na saúde (<https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/guias-e-manuais/2024/guia-mudancas-climaticas-para-profissionais-da-saude.pdf>).

Mecanismos Fisiopatológicos

Diversos mecanismos podem explicar os efeitos danosos das mudanças climáticas sobre a saúde cardiovascular. Ondas de calor intenso podem causar desidratação e eventos cardiovasculares agudos, enquanto ondas de frio aumentam o risco de isquemia miocárdica por vasoconstrição e aumento de resistência periférica, sobrecarregando o coração (7). Estudos sobre funções fisiológicas do sistema vascular arterial, demonstraram a presença de disfunção endotelial, desequilíbrio autonômico e hipercoagulabilidade em associação ao estresse térmico. Além disto, a desidratação associada à elevação da temperatura aumenta o hematócrito, tornando o sangue mais viscoso e aumentando a hipercoagulabilidade e a chance de fenômenos trombóticos. Por outro lado, a poluição do ar, especialmente o material particulado fino, induz e perpetua a inflamação sistêmica, um dos fatores de risco para aterosclerose coronariana (3,7). Por sua vez, a vasodilatação crônica, comum em ambientes quentes, leva a um aumento sustentado do débito cardíaco. Em condições extremas, isso pode precipitar insuficiência cardíaca, como ilustrado pela hipótese do “coração de verão”.

A fumaça de queimadas e o aumento do ozônio troposférico, relacionados ao aumento da temperatura e secura do ar, também contribuem para o risco cardiovascular (3). A elevação do ozônio troposférico pode levar à ativação plaquetária, aumento de pressão arterial, inflamação sistêmica, por mecanismos ainda não totalmente elucidado que podem incluir estresse oxidativo, alterações metabólicas e na coagulação, e disfunção autonômica (8).

Em setembro de 2024, na revista *European Heart Journal*, Eugene Braunwald, talvez o mais importante cardiologista em atividade no mundo, publicou um artigo que identificou os mecanismos envolvidos na gênese das complicações cardiovasculares associadas às mudanças climáticas (9) (Figura 5).

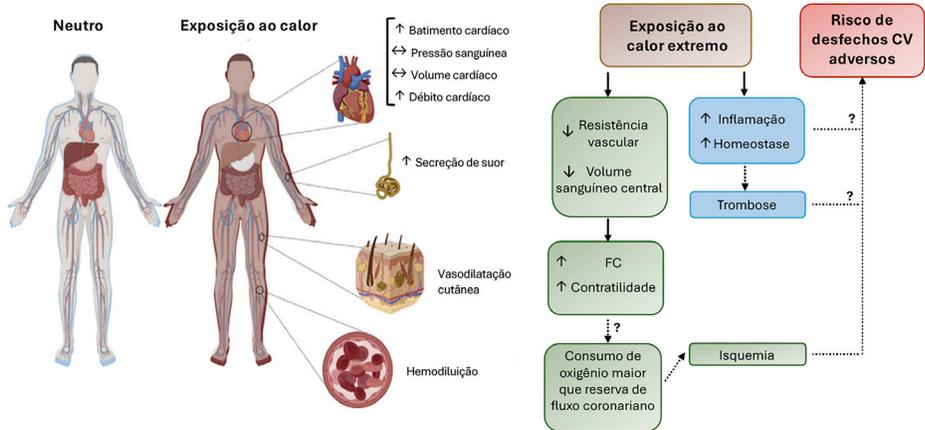


Figura 5: Mecanismos fisiopatológicos relacionados aos efeitos cardiovasculares das mudanças climáticas.

Efeitos de Eventos Climáticos Extremos

Os eventos climáticos extremos (ondas de calor ou de frio intenso) elevam significativamente o risco de morte cardiovascular, especialmente entre idosos, hipertensos e pacientes com insuficiência cardíaca. Temperaturas elevadas alteram de maneira mais aguda e intensa o equilíbrio hemodinâmico, elevando a frequência cardíaca, o risco de arritmias e descompensação cardíaca. Em 2021, Turba Costa e colaboradores descreveram a relação entre situações climáticas extremas e hospitalizações sobre doenças cardiovasculares. Nos dias com extremos de temperatura, os autores observaram taxas de internação mais altas, tanto para ondas de calor como de frio. Além disso, houve um risco particularmente alto de hospitalização por até sete dias após o término da onda de frio. Análises posteriores mostraram que as hospitalizações por problemas cardiovasculares foram maiores no inverno do que no verão, sugerindo que as ondas de frio impactam mais sobre as doenças cardiovasculares (10).

Robine e colaboradores analisaram os dados de mortalidade durante o verão europeu de 2003. No mês de agosto daquele ano, em função da onda de calor extremo, ocorreram aproximadamente 70.000 mortes adicionais (excesso de mortes) (11) (Figura 6).

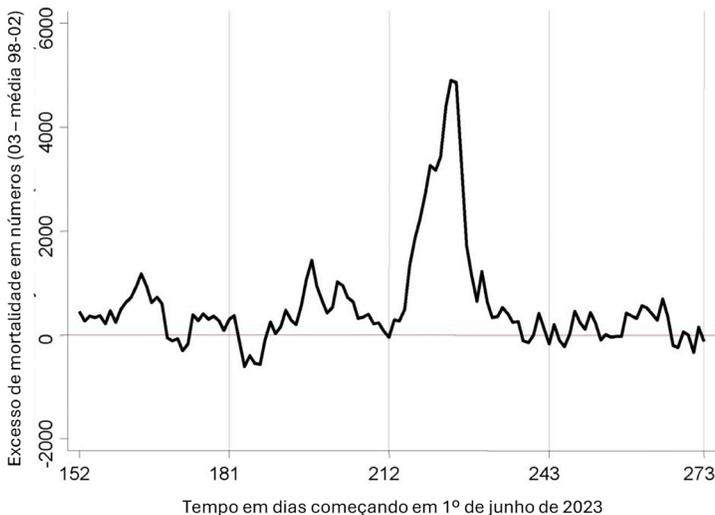


Figura 6: Variação entre o número de mortes diárias registradas no Verão de 2003 e o número médio de mortes registradas no mesmo dia durante o período de referência 1998-2002 para os 16 países europeus estudados. Dia 152, o 152.º dia do ano corresponde a 1 de junho, dia 181 a 30 de junho, dia 212 a 31 de julho, dia 243 a 31 de agosto e dia 273 a 30 de setembro.

No Brasil, eventos extremos recentes, como as enchentes no Rio Grande do Sul em 2024, suscitaram preocupações das autoridades de saúde, uma vez que nestas situações há aumento na incidência de infecções respiratória e virais, que contribuem ainda mais para o aumento da morbidade e mortalidade por doenças cardiovasculares (12).

VULNERABILIDADE E INIQUIDADES

As mudanças climáticas e a poluição atmosférica não afetam todos igualmente. Indivíduos com menor renda, morando em regiões periféricas e próximas a vias de tráfego intenso, enfrentam maior exposição a poluentes e têm menos acesso a cuidados de saúde. O Brasil apresenta desigualdades estruturais marcantes, que amplificam os efeitos ambientais sobre a saúde. Em 2020, Xu e colaboradores descreveram dados diários de hospitalização e clima nos 4 meses mais quentes no período de

2000-2015 em 1.814 cidades, cobrindo 78,4% da população brasileira. Os autores concluíram que as cidades menos desenvolvidas apresentaram associações mais fortes entre exposição ao calor e internações por todas as causas e certos tipos de internações por causas específicas (13). Estes achados ressaltam que as desigualdades socioeconômicas têm consequências importantes com relação à saúde das populações envolvidas e demandam a necessidade de priorizar políticas públicas mais urgentes em locais mais vulneráveis (13).

Estratégias de Mitigação

Para mitigar os impactos cardiovasculares das mudanças climáticas, o esforço deve ser concentrado em três áreas de atuação: políticas públicas, adaptação de infraestrutura, ensino & pesquisa. Em primeiro lugar, é preciso adotar políticas públicas que reduzam a emissão de poluentes e adaptem as cidades. Entre as estratégias estão a promoção do transporte sustentável, o aumento da arborização urbana, a criação de zonas de baixa emissão, e a fiscalização ambiental. O setor saúde precisa se adaptar ao novo cenário epidemiológico. Hospitais e unidades de saúde devem estar preparados para surtos sazonais de doenças exacerbadas pelo calor ou pela poluição. A vigilância ambiental integrada à saúde pública pode antecipar surtos e direcionar recursos. Com relação à adaptação necessária para a infraestrutura de saúde, as prioridades devem ser:

- Adaptar hospitais e ambulatórios, investindo em energia renovável por meio de instalações solares e eólicas locais e externas;
- Estimular e implementar a interface interdisciplinar entre profissionais de saúde, arquitetos e engenheiros buscando alternativas de infraestrutura com melhor conforto ambiental e menor dependência de ar climatizado;
- Eliminar gradualmente o uso de gás natural para aquecimento e resfriamento, substituindo-o por energia renovável (geotérmica e hidrogênio);
- Incorporar o risco ambiental na avaliação cardiovascular de rotina, como por exemplo na realização de intervenções cirúrgicas e exames.
- Alcançar emissões zero com a substituição de veículos movidos a combustíveis fósseis (ambulâncias e demais veículos);

- Substituir gases anestésicos por alternativas com menor emissão (eliminar o uso de desflurano);
- Reduzir viagens de trabalho por meio do aumento de conferências virtuais;
- desenvolver sistemas de alerta para eventos críticos, como ondas de calor e picos de poluição;
- Reduzir o deslocamento de pacientes até as clínicas por meio da ampliação da telessaúde;
- Substituir dispositivos médicos descartáveis por reutilizáveis.

Além disso, a educação médica deve passar a incluir conhecimentos sobre medicina ambiental e saúde planetária, preparando profissionais para lidar com os desafios do século XXI. A incorporação de temas relacionados às consequências das mudanças climáticas para a saúde deve fazer parte obrigatória dos currículos de graduação e de pós-graduação. A Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo já incluiu este tema para os alunos do terceiro ano do curso de medicina e para a pós-graduação.

A pesquisa interdisciplinar é essencial para compreender e prever os impactos cardiovasculares das emergências climáticas. Estudos longitudinais com dados ambientais e clínicos integrados são necessários. O uso de tecnologias como inteligência artificial e sensores vestíveis pode permitir o monitoramento em tempo real de populações vulneráveis, apoiando políticas de saúde preventiva e urbanismo sustentável.

REFERÊNCIAS

1. @coracaonatela. “Extrapolations, um futuro inquietante”. Instagram, 2023. <https://www.instagram.com/reel/CszJg6xAiVH/?igsh=MXI0cmc0ZXNv-cHdsMA%3D%3D>
2. The Smithsonian Institution’s Human Origins Program. Climate Effects on Human Evolution. <https://humanorigins.si.edu/research/climate-and-human-evolution/climate-effects-human-evolution>, 2024.
3. D.S. Kazi DS, *et al.* Climate Change and Cardiovascular Health: A Systematic Review. *JAMA Cardiol.* 9, 748-757 (2024).
4. U.P. Santos, *et al.* Exposure to fine particles increases blood pressure of hypertensive outdoor workers: A panel study. *Environ Res.* 174, 88-94 (2019).

5. M.A. Pereira Filho, *et al.* Effect of air pollution on diabetes and cardiovascular diseases in São Paulo, Brazil. *Braz J Med Biol Res.* 41, 526-32 (2008).
6. Mudanças climáticas para profissionais da saúde: Guia de bolso. <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/guias-e-manuais/2024/guia-mudancas-climaticas-para-profissionais-da-saude.pdf>, 2024.
7. S.P. Ang, J.E. Chia. Climate change and cardiovascular risk. *Current Opinion in Cardiology* 40, 244-250 (2025).
8. Q. Hua, *et al.* Ozone exposure and cardiovascular disease: A narrative review of epidemiology evidence and underlying mechanisms. *Fundam Res* 5, 249-263 (2024).
9. E. Braunwald, Cardiovascular effects of climate change, *European Heart Journal* 45, 3006–3008 (2024).
10. I.T. Costa, *et al.* Extreme Weather Conditions and Cardiovascular Hospitalizations in Southern Brazil. *Sustainability* 13, 12194 (2021).
11. J.M. Robine, *et al.* Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol* 331, 171-8 (2008).
12. D.L. Paterson, H. Wright, P.N.A. Harris. Health Risks of Flood Disasters. *Clin Infect Dis.* 67, 1450-1454 (2018).
13. R. Xu, *et al.* Socioeconomic level and associations between heat exposure and all-cause and cause-specific hospitalization in 1,814 Brazilian cities: A nationwide case-crossover study. *PLoS Med.* 17, e566-e576 (2020).

8.2 Mudanças climáticas e saúde: uma abordagem urbana

Mariana Veras, Marie-Anne Van Sluys, Paulo Saldiva

INTRODUÇÃO: VIVER EM SOCIEDADE COMO UMA NECESSIDADE EVOLUTIVA

Durante a evolução, o *Homo sapiens* seguiu o caminho de favorecer o desenvolvimento do sistema nervoso central em vez de uma estrutura corporal capaz de competir fisicamente com outros animais de tamanho similar. Conseqüentemente, a sobrevivência dos sapiens dependia da caça de pequenos animais e da coleta de frutos e carcaças deixadas por outros predadores. Nossas limitações físicas em comparação com outros predadores necessitaram da sobrevivência da espécie humana por meio da cooperação e solidariedade, via colaborações e parcerias, e não pela força individual. Comunidades de caçadores-coletores geralmente compreendiam não mais do que algumas centenas de membros, muito dependentes da disponibilidade de recursos para o sustento do grupo. A estrutura de suas habitações era simples o suficiente para permitir migração comunitária quando se esgotavam os recursos naturais ao redor. A criatividade embutida no cérebro desenvolveu a capacidade, por meio do desenvolvimento encefálico, de usar o fogo para preparar alimentos, facilitando a ingestão de calorias e proteínas. A tecnologia desenvolvida por caçadores e coletores forneceu-lhes ferramentas para caça, pesca e cultivo de algumas espécies vegetais, ampliando a capacidade de sobrevivência do grupo. Em regiões com maior escassez de recursos naturais, houve estímulo ao potencial criativo dos neurônios cerebrais para aumentar a produção de alimentos, levando ao crescimento populacional. Por isso, as primeiras cidades emergiram nas regiões áridas ou semiáridas do Crescente Fértil, no Oriente Médio, e às margens do Nilo. O aumento da quantidade de alimentos nas cidades emergentes também resultou na perda da diversidade alimentar presente nas dietas dos caçadores-cole-

tores. Micro-organismos que estavam em equilíbrio com animais domesticados encontraram nos humanos um novo hospedeiro menos adaptado. O aumento populacional e a falta de saneamento levaram os habitantes das cidades a trocar ideias, pensamentos e também microrganismos. Por fim, a produção em excesso resultou em estocagem e acumulação de riqueza, criando as bases da desigualdade social e econômica presentes nas cidades até hoje. Em resumo, nas cidades, enriquecemos o espírito, mas também encontramos novas formas de doenças, como será delineado a seguir.

CRESCIMENTO URBANO NÃO PLANEJADO ENFRENTANDO OS DESAFIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As cidades brasileiras passaram por mudanças notáveis no uso e ocupação do solo. Em geral, nossas cidades deslocaram as atividades econômicas para a região central, com a habitação residencial consequentemente mudando para a periferia. A densidade construtiva significativa nos centros urbanos leva à impermeabilização do solo e à perda das áreas verdes, fatores que contribuem para o surgimento de “ilhas de calor”. Em São Paulo, a diferença de temperatura superficial entre o centro da cidade e a periferia pode atingir até dez graus Celsius. Um gradiente térmico dessa magnitude não ocorre sem consequências para a dinâmica climática urbana. O regime de chuvas na cidade tem sido significativamente alterado nas últimas décadas. A existência de um núcleo central mais quente em comparação com a periferia cria fluxos ascendentes de ar na região central, como as tochas de um balão de ar quente que esquentam o ar para que ele suba. Como resultado, frentes úmidas que se aproximam da cidade encontram uma região de menor pressão, entrando no território urbano central com maior velocidade. Ao chegar ao centro, alcançam uma área de temperatura mais elevada, resultando em chuvas mais intensas. Em resumo, as chuvas são “sugadas” para a região central, deslocando as precipitações intensas para o centro, que apresenta maior nível de impermeabilização do solo. A mudança na intensidade e localização das precipitações representa um risco para a saúde, pois favorece enchentes e a transmissão de agentes infecciosos transmitidos pela água, assim como deslizamentos em comunidades que residem em áreas de risco para tais eventos. A água parada em excesso e o aumento da tempe-

ratura urbana também promovem a proliferação dos mosquitos transmissores da dengue e do Zika, entre outras febres urbanas. O aquecimento das cidades e a variabilidade do clima urbano estão significativamente associados a doenças e mortalidade por enfermidades respiratórias e cardiovasculares.

TEMPERATURA, ACLIMATAÇÃO E DOENÇAS

As mudanças climáticas aceleradas que estamos vivendo são muito mais do que um parâmetro básico de conforto. Temperaturas extremas ou sua variabilidade têm efeitos diretos e indiretos na saúde humana, e as alterações nos padrões de temperatura causadas pelas mudanças climáticas levantaram preocupações sobre seus impactos na saúde global. Até 2100, espera-se um aumento entre 1,8 e 4 graus na temperatura média, e a compreensão recente da adaptação passou de fatores biofisiológicos para dimensões sociais e econômicas mais amplas da vulnerabilidade e da capacidade das pessoas e das cidades para responder aos desafios ambientais. As consequências das mudanças climáticas podem ser analisadas sob diferentes perspectivas, como impactos econômicos, consequências sociais, segurança alimentar global, mudanças no ambiente construído, estratégias de mitigação, impactos na saúde, vulnerabilidades de minorias, alterações na distribuição de doenças transmitidas por vetores e muitos outros. Independentemente da perspectiva adotada, não há dúvidas de que a saúde humana será afetada, direta ou indiretamente.

TEMPERATURA E ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA

A temperatura é mais do que um parâmetro básico de conforto. Temperaturas extremas ou sua variabilidade têm efeitos diretos e indiretos sobre a saúde humana, e as mudanças nos padrões de temperatura causadas pelas mudanças climáticas têm causado preocupação sobre seus impactos na saúde global. Dada a complexidade do tema, este artigo foca nos efeitos diretos da temperatura na saúde humana, deixando de lado aspectos igualmente importantes, como a disseminação de doenças infecciosas, a insegurança alimentar e os fluxos migratórios.

A adaptação a várias condições ambientais permitiu a consolidação da espécie humana. Somos criaturas homeotérmicas, o que significa que controlamos nossa temperatura corporal dentro de uma faixa estreita (35 °C a 37 °C). Para lidar com mudanças na temperatura externa, nossos corpos recorrem a ajustes adaptativos que, em situações extremas, podem sobrecarregar os sistemas respiratório e cardiovascular. Por exemplo, altas temperaturas ativam o sistema parassimpático, diminuindo a frequência cardíaca, débito cardíaco, pressão arterial e a secreção de cortisol e hormônios da tireoide. Durante períodos de calor, ocorre perda de volume circulante por meio do suor, o que aumenta a viscosidade do sangue e predispõe à formação de coágulos que podem obstruir artérias no cérebro e no coração, especialmente em indivíduos com doenças cardiovasculares preexistentes. Inversamente, baixas temperaturas provocam alterações opostas, elevando o tom simpático. Vasoconstrição periférica, aumento da taxa metabólica e elevação da frequência cardíaca representam maior carga de trabalho para o coração. Baixas temperaturas também desafiam o sistema respiratório, reduzindo os mecanismos pulmonares de defesa contra agentes infecciosos, predispondo indivíduos a pneumonia e exacerbando doenças como bronquite crônica e asma. A idade afeta os mecanismos primários que mantêm a temperatura corporal. Simplificadamente, pode-se dizer que crianças (ainda amadurecendo seus sistemas de termorregulação) e idosos (cujo sistema perde eficiência) são os grupos mais vulneráveis (2-4). Nesse contexto, a mudança demográfica global para uma população envelhecida deve merecer atenção no planejamento de políticas climáticas futuras. Numerosos estudos epidemiológicos realizados na última década em várias partes do mundo apoiam o conceito de que extremos de temperatura — e sua variabilidade — estão significativamente associados ao aumento de admissões hospitalares e mortalidade (1).

O QUE SABEMOS SOBRE OS IMPACTOS DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NA SAÚDE HUMANA NO NOSSO PAÍS

A seguir, uma apresentação resumida dos resultados de alguns grandes estudos epidemiológicos realizados no nosso país:

- Ondas de calor causam aumento significativo nas admissões hospitalares entre idosos e crianças, respondendo por cerca de 6% das internações no SUS, ou aproximadamente 132 por cem mil habitantes (5).
- Existem variações geográficas, demográficas, específicas por causa e temporais nas associações entre ondas de calor e hospitalização na população brasileira. Considerando o aumento previsto na frequência, duração e intensidade das ondas de calor, estratégias futuras, como a implementação de sistemas de alerta precoce, devem ser desenvolvidas para reduzir os riscos à saúde associados às ondas de calor no Brasil (6).
- Indivíduos que vivem em cidades menos desenvolvidas no Brasil são mais vulneráveis à hospitalização relacionada à variabilidade da temperatura. Essa disparidade pode exacerbar as desigualdades socioeconômicas e de saúde existentes no país, sugerindo que maior atenção deve ser dada a áreas menos desenvolvidas para mitigar os efeitos adversos das flutuações térmicas de curto prazo (7).
- A exposição ao calor ambiente tem sido associada positivamente à hospitalização por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica, especialmente ao final da estação quente. Esses dados aumentam o corpo crescente de evidências que implicam o aquecimento global como um contribuinte significativo para a futura carga na assistência à saúde (8).
- Estima-se que temperaturas extremas tenham levado a uma perda acumulada de 104,86 bilhões de dólares (IC 95%: 65,95 a 142,70) em custos econômicos relacionados a perdas de produtividade por mortes prematuras entre 2000 e 2019. Maiores riscos por temperaturas extremas de frio foram observados na região Sul do Brasil, enquanto temperaturas extremamente quentes foram notadas nas regiões Centro-Oeste e Nordeste. Em conclusão, temperaturas não ideais estão associadas a perdas significativas de trabalho e custos econômicos no Brasil (9).

REFLEXÕES ADICIONAIS

Uma vez apresentadas informações objetivas e científicas, buscamos permissão para falar como cientistas e cidadãos, focando nas cidades, dado nosso mundo cada vez mais urbanizado (Figura 1). A mudança

climática decorre das escolhas conscientes de consumo da nossa espécie, não de outras que sofrem em ecossistemas ameaçados. Ao deslocar a discussão da biodiversidade distante para o nosso habitat preferido, tentamos colocar a saúde humana no centro para acelerar políticas para o uso sustentável dos recursos naturais. Passou o tempo em que éramos caçadores-coletores vivendo em um mundo cheio de recursos; hoje, grande parte da população adota práticas que exigem enorme quantidade de recursos, causando o esgotamento planetário. Nossa espécie dificilmente desaparecerá, mas permanece incerto quem sobreviverá. Seremos capazes de adaptar a fisiologia e a infraestrutura urbana no mesmo ritmo das mudanças ambientais, especialmente considerando o envelhecimento global da população? Quem será selecionado para sobreviver: os mais ricos ou os mais vulneráveis? Abandonaremos “A Origem das Espécies” para adotar “Indicadores Forbes”? Ao longo da evolução, apostamos no cérebro e na criatividade, não na força física. Para sobreviver, precisávamos de solidariedade de grupo: compaixão e colaboração foram essenciais. Com o tempo, domesticamos plantas e animais e criamos cidades, acelerando a arte, a ciência — e as desigualdades. A história humana remonta a centenas de milhares de anos, mas cultura e disparidade socioeconômica são recentes. Hoje, as cidades refletem essa dualidade: motores de inovação que também ampliam vulnerabilidades e exclusão. Megacidades parecem museus a céu aberto da evolução humana, onde centros de alta tecnologia coexistem com condições medievais nas periferias. A desigualdade não é apenas social; é uma ameaça à saúde urbana, um desequilíbrio que enfraquece o ‘corpo’ da cidade.” Neste ponto, as humanidades tornam-se essenciais. Para melhorar a saúde urbana, as cidades precisam cultivar mais do que infraestrutura: precisam fomentar relacionamentos. Ética, história, filosofia e artes fornecem ferramentas para mediar diferenças, humanizar políticas e promover a dignidade em harmonia com o meio ambiente. A alteridade — o reconhecimento do outro — e a compaixão não são virtudes abstratas; são os alicerces da convivência. Concluimos, ousando dizer que a crise climática, dada sua magnitude, é uma oportunidade para reviver o diálogo ancestral. A tecnologia é indispensável para enfrentar esse desafio, mas deve se engajar com uma economia sustentável baseada em direitos fundamentais — cidadania, equidade, solidariedade e bem-estar. Grande parte desse diálogo será dedicado à construção de políticas públicas que transformem as cidades em lugares mais saudáveis e sustentáveis.



Figura 1: Esquema ilustrativo sobre mudanças climáticas e saúde urbano.

REFERÊNCIAS

1. A. Gasparrini et al., Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet*, v. 386, n. 9991, p. 369-375 (2015).
2. S. S. Cheung et al., The thermophysiology of uncompensable heat stress: physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Medicine*, v. 29, p. 329-359. DOI: 10.2165/00007256-200029050-00004. (2000).
3. A. Bouchama et al., Heat stroke. *New England Journal of Medicine*, v. 346, p. 1978-1988. DOI: 10.1056/NEJMra011089. (2002).
4. C. A. Roncal-Jimenez et al., Climate change associated with elevated temperature and humidity is a risk factor for chronic kidney disease of unknown cause: a global hypothesis. *Kidney International*, v. 86, p. 509-517. DOI: 10.1038/ki.2015.88. (2015).
5. Q. Zhao et al., Geographic, demographic, and temporal variations in the association between heat exposure and hospitalization in Brazil: a nationwide study between 2000 and 2015. *Environmental Health Perspectives*, v. 127, n. 1, p. 017001. DOI: 10.1289/EHP3889. (2019).
6. Q. Zhao et al., Heatwaves and hospitalizations in Brazil: geographic, demographic, cause-specific, and temporal variations in risk. *PLOS Medicine*, v. 16, n. 2, e1002753 DOI: 10.1371/journal.pmed.1002753. (2019).
7. R. XU, et al., Socioeconomic inequality in vulnerability to all cause and cause specific hospitalization associated with temperature variability: a time series study in 1,814 Brazilian cities. *The Lancet Planetary Health*, v. 4, n. 12, e634-e642. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30251-5. (2020).

8. Q. Zhao et al., Ambient heat and hospitalization for COPD in Brazil: a nationwide case crossover study. *Thorax*, v. 74, n. 11, p. 1031-1036. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2019-213486. (2019).
9. B. Wen et al., Productivity adjusted life years lost due to non-optimum temperatures in Brazil: a nationwide time series study. *Science of the Total Environment*, v. 873, p. 162368. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162368. (2023).

8.3 Impacto da crise climática nas infecções bacterianas e na disseminação da resistência aos antibióticos

Evangelina Araújo, Marina Farrel Côrtes, Nazareno Scaccia, Thaís Guimarães, Silvia Figueiredo Costa

INTRODUÇÃO

A mudança climática pode ser potencialmente a maior ameaça à saúde do século XXI. Entre os desafios para o enfrentamento dos efeitos da crise climática em saúde, encontra-se o maior investimento em pesquisas em diversos campos e o envolvimento dos tomadores de decisão para políticas públicas (1).

No Brasil o aumento da temperatura já ultrapassou o limite de 2°C em alguns biomas e cidades (2). O Brasil é o sétimo maior emissor de gases efeito estufa no mundo e o quarto maior emissor per capita (3). Também será um dos países que mais sofrerá os impactos do clima, e, por conseguinte, os efeitos em saúde da sua população, especialmente os mais vulneráveis. Além disso, em 2024, o povo brasileiro enfrentou diversos eventos climáticos extremos ao longo do país, como as ondas de calor, as inundações no Rio Grande do Sul e a perda de 22 milhões de hectares da floresta amazônica pelos incêndios, que acarretaram níveis de poluição do ar maiores que em qualquer parte do mundo (4).

A falta de saneamento, a degradação ambiental e a perda de biodiversidade contribuem para uma parcela substancial da carga global de doenças. A disrupção dos ecossistemas acarreta maior ocorrência de doenças transmissíveis pelo aumento de vetores e disseminação dos agentes infecciosos que contribuem para emergências de saúde (1).

As mudanças climáticas aumentam o risco de infecções bacterianas e a disseminação de patógenos representando um sério desafio para a saúde pública. Como consequência, pode-se esperar um aumento no uso de antibióticos em humanos, animais e plantas o que agravaria a disseminação de bactérias resistentes aos antibióticos (5). Até 2050, estima-se que cerca de 10 milhões de pessoas morrerão a cada ano devido às infecções bacterianas resistentes aos antibióticos e essas estimativas podem piorar com a mudança do clima (6). Estudos revelam genes de resistência a antibióticos em rios poluídos da Baía de Ilha Grande no Rio de Janeiro que sofreram impactos significativos com a mudança do clima (7) e a presença de bactérias Gram-negativas resistentes a carbapenêmicos na urina de cães resgatados de enchentes no Rio Grande do Sul (8).

INFECÇÕES BACTERIANAS EMERGENTES E REEMERGENTES

Os assentamentos decorrentes de desastres, especialmente em países de baixa e média renda como o Brasil, são frequentemente caracterizados por condições inseguras. Isso inclui superlotação, ventilação precária, abrigo inadequado, falta de alimentos e água seguros, acesso reduzido aos serviços de saúde, o que contribui para um risco aumentado de infecção bacteriana (9). Doenças transmitidas por água e alimentos (cólera, diarreia, febre tifóide), doenças relacionadas à superlotação (meningite e tuberculose transmitida por secreções respiratórias como gotícula e aerossóis) são os tipos mais comuns de doenças bacterianas relatadas em abrigos (10).

O aumento da frequência e intensidade de chuvas intensas, enchentes e alagamentos, fenômenos associados ao aquecimento global, tem criado condições ideais para a disseminação de zoonoses bacterianas como a *Leptospira spp.* Em ambientes urbanos, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais como o Brasil, a precariedade do saneamento básico, a alta densidade populacional e a presença de roedores são fatores que, combinados às inundações, favorecem surtos de leptospirose (9).

No Brasil, dados do Ministério da Saúde apontam que entre 2001 e 2020 foram notificados mais de 70 mil casos de leptospirose, com letalidade média em torno de 9% em anos epidêmicos, como 2011 e 2020,

ambos marcados por enchentes associadas ao fenômeno La Niña e fortes eventos de precipitação (11).

Um exemplo recente do impacto da crise climática na disseminação de doenças bacterianas em particular da Leptospirose foi o desastre de inundação que ocorreu em 2024 no Rio Grande do Sul, deixando grandes partes do estado debaixo d'água. As áreas e o número de pessoas afetadas totalizaram 478 municípios que foram inundados, afetando diretamente cerca de 2,4 milhões de pessoas, 20% da população do estado. Entre as causas de morte está um surto de leptospirose, causado pela bactéria *Leptospira spp.*, que pode ser encontrada em água ou solo contaminado (9).

IMPACTO DA CRISE CLIMÁTICA NAS TAXAS DE INFECÇÕES CORRENTE SANGUÍNEA E RESISTÊNCIA BACTERIANA

Infecções de correntes sanguíneas (ICS) são uma das principais infecções que comprometem o ser humano com alta morbidade e mortalidade que variam de acordo com o agente etiológico e a população estudada. Estudos vêm indicando o aumento da frequência de ICS durante o verão e ou em meses com altas temperaturas (12-14). Um estudo conduzido por Fisman et al 2014, avaliou resultados de hemoculturas positivas de 2007 a 2011 e fontes de dados para fatores geográficos, climáticos e socioeconômicos de uma rede internacional composta por 23 centros internacionais em 22 cidades (com a participação de dois hospitais de São Paulo). Apenas a porcentagem do produto interno bruto gasto em saúde e a distância do equador foram significativamente associadas à ICS por bactérias Gram-negativas (12).

Caldeira et al, em estudo ecológico conduzido em Botucatu (2005 a 2010), avaliaram o impacto da temperatura e umidade na incidência e etiologia das ICS. Os autores observaram maior incidência de ICS por bacilos Gram-negativos durante as estações quentes. A temperatura foi positivamente associada à recuperação de bacilos Gram-negativos (OR = 1,14; IC95% 1,10; 1,19) ou *Acinetobacter baumannii* (OR = 1,26; IC95% 1,16; 1,37) (13).

IMPACTO DA CRISE CLIMÁTICA NOS MECANISMOS DE RESISTÊNCIA BACTERIANA

Mudanças na temperatura podem afetar as respostas celulares e fisiológicas das bactérias que, por sua vez, podem afetar a evolução e a prevalência de genes de resistência aos antibióticos. Respostas fisiológicas ao estresse devido à temperatura podem estar envolvidas nas respostas de estresse aos antibióticos contribuindo para a evolução da resistência, alterando a expressão de genes (14, 15, 16). Conseqüentemente, a expressão de genes de resistência pode ser desencadeada por estressores ambientais, uma vez que mutações que conferem resistência ao estresse podem conferir resistência cruzada aos antibióticos (16). Da mesma forma, pesticidas, metais pesados e outros poluentes ambientais podem atuar na seleção de resistência cruzada, promovendo a sobrevivência de cepas resistentes em ambientes cada vez mais contaminados (5). As mudanças climáticas favorecem a transferência horizontal de genes entre bactérias, permitindo a rápida disseminação dos mesmos, particularmente em ambientes afetados pela poluição e escassez de água (5). Estudos *in vitro* mostram que temperaturas acima de 37 °C favorecem a conjugação e a transformação bacteriana (17).

Uma revisão sistemática recentemente publicada incluiu 30 artigos selecionados publicados predominantemente após 2019 e evidenciou a escassez de dados brasileiros (18). O Brasil contribuiu apenas com um artigo. A revisão sistemática sugere que o aumento das temperaturas associado às mudanças climáticas pode contribuir para a disseminação da resistência aos antibióticos, afetando diversos ecossistemas. Esse fenômeno é observado no solo, geleiras, rios e ambientes clínicos. O estudo brasileiro incluído na revisão sistemática foi um estudo experimental de 48 amostras de solo da Amazônia (19). O estudo evidenciou que o desmatamento da Amazônia levou ao aumento de genes de resistência aos antibióticos no solo, e que alterações antrópicas podem exercer pressão seletiva sobre as comunidades microbianas e expandir o resistoma do solo. Os autores observaram que a conversão de floresta nativa em terras agrícolas e pastagens para gado aumentou a abundância de genes codificadores de bombas de efluxo, genes de alteração do sítio alvo (alteração ribossomal), e produção de enzimas como as β -lactamases (19).

CRISE CLIMÁTICA E SANEAMENTO BÁSICO

A crise climática aumenta o risco de disseminação de bactérias resistentes aos antibióticos e resíduos de antibióticos (Figura 1) por meio de inundações e escassez de água potável especialmente em regiões do Brasil com baixa cobertura de saneamento básico. É essencial considerar que atualmente aproximadamente apenas 55% do esgoto dos municípios do Brasil é coletado, e cerca de 80% é tratado (20). Dados recentes estimam que 24,3% da população brasileira, o que corresponde a aproximadamente 49,0 milhões de pessoas, não têm coleta de esgoto e águas residuais não tratadas são lançadas diretamente em rios, córregos e oceanos

brasileiros (21).

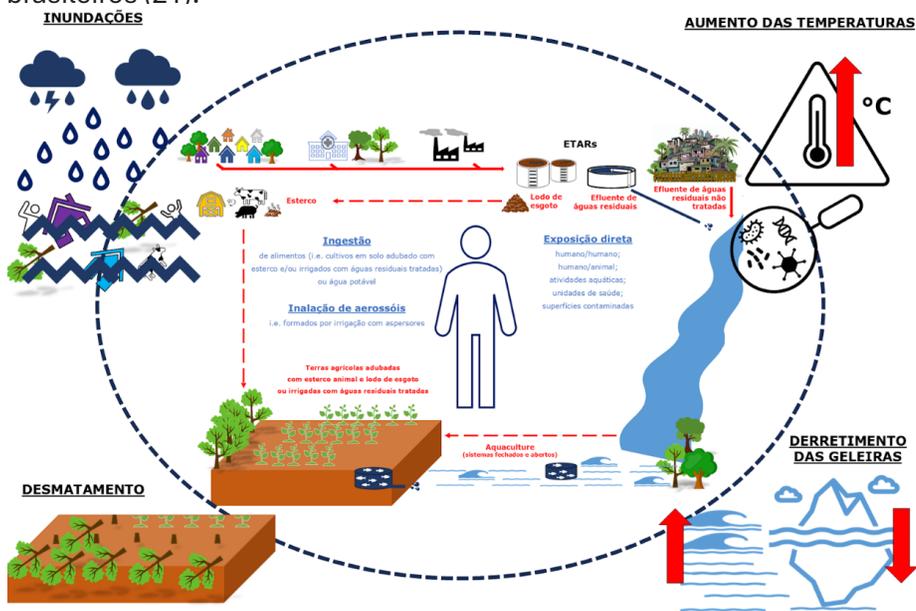


Figura 1: Mudanças climáticas e resistência aos antibióticos. Dentro da linha tracejada preta, a resistência a antibióticos se dissemina no ambiente a partir de humanos, animais e efluentes industriais. As ETARs não eliminam completamente os antimicrobianos, BRA e GRAs, liberando-os na água e no solo através do esgoto. Esterco e resíduos da aquicultura espalham ainda mais a resistência na agricultura. As mudanças climáticas (enchentes, aumento de temperatura, desmatamento e derretimento de geleiras) intensificam a resistência aos antibióticos ao dispersar patógenos e criar condições favoráveis para o crescimento de BRA. Esse ciclo interconectado aumenta os riscos à saúde pública global.

As águas residuais de unidades de saúde, áreas urbanas, agricultura e indústria servem como um importante reservatório e rota de transmissão da resistência a antibióticos. Antibióticos, bactérias carreadoras de genes de resistência já foram encontrados na água em todo o mundo, e espera-se que a poluição antimicrobiana piore em países de renda baixa e média-alta (22). Mesmo em locais que o esgoto é coletado por estações de tratamento de águas residuais (ETEs), e depois descartado nos rios, se o tratamento não for adequado, essas descargas podem aumentar substancialmente a liberação de resíduos antimicrobianos e bactérias resistentes em corpos d'água naturais.

Um estudo conduzido no Brasil, detectou 23 resíduos de antibióticos em habitats aquáticos (por exemplo, efluentes de estações de tratamento de esgoto, águas residuais hospitalares) com valores de concentração de 0,13 a 37,30 µg/L (20). Também já foram descritos resíduos de diferentes classes de antibióticos como azitromicina, levofloxacina, ceftriaxona, e meropenem em águas residuais hospitalares e urbanas na cidade de São Paulo (23). Em alguns casos, as concentrações excedem as Concentrações Previstas Sem Efeito (PNECs), sugerindo potencial para a seleção de resistência aos antibióticos.

REFERÊNCIAS

1. D. Campbell-Lendrum, T. Neville, C. Schweizer, and M. Neira, Climate Change and Health: Three Grand Challenges. *Nature Medicine* 29, 1631–1638. (2023).
2. P. Artaxo, As Três Emergências que Nossa Sociedade Enfrenta: Saúde, Biodiversidade e Mudanças Climáticas. *Estudos Avançados* 34, 100. (2020).
3. Climate Watch, *Historical GHG Emissions* [online], 2025, accessed 23 July 2025. Available at: <https://www.climatewatchdata.org>
4. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde, *Programa VigiAr. Poluição Atmosférica e Saúde Humana* [online], 2025, accessed 23 July 2025. Available at: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoi>
5. P. Rzymiski, W. Gwenz, B. Poniedziatek, S. Mangul, and A. Fal, Climate Warming, Environmental Degradation and Pollution as Drivers of Antibiotic Resistance. *Environmental Pollution* 346, 123649. (2024).
6. J. O'Neill. *Antimicrobial Resistance: Tackling a Crisis for the Health and Wealth of Nations* [online], London: Review on Antimicrobial Resistance, 2014, accessed 23 July 2025. Available at: <https://amr-review.org/sites/default/files/...>

7. L.F. Bacha, M.A. P. Oliveira, F. Landuci , A. C. Vicente, P.H Paz, Antibiotic-resistance genes and metals increase in polluted tropical rivers of the Baía da Ilha Grande, Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment* 968,178778. (2025).
8. M.E.R.J. da Silva, G. M. Breyer, T. S. Weyh, S.D. de Oliveira , F. M. Siqueira, Carbapenem-resistant Gram-negative bacteria in urine of dogs rescued from southern Brazil floods. *Veterinary Research Communications* 49, 230 (2025).
9. H. Cena, M. Labra, and NBFC Collaborator Group, Biodiversity and Planetary Health: A Call for Integrated Action. *The Lancet* 403, 1985–1986.(2024).
10. F.V. Segala, G. Guido, G. Stroffolini , L. Masini, P. Cattaneo , Insights into the Ecological and Climate Crisis: Emerging Infections Threatening Human Health. *Acta Tropica*, vol. 262, (2025)
11. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde, *Boletim Epidemiológico: Leptospirose* [online], Brasília: MS, 2021, accessed 23 July 2025. Available at: <https://www.gov.br/saude/pt-br>
12. D. Fisman, E. Patrozou ,Y.Carmeli, E. Perencevich, A.R. Tuite, Geographical Variability in the Likelihood of Bloodstream Infections Due to Gram-Negative Bacteria. *PLoS One* 12, e114548 (2014).
13. S.M. Caldeira, A.R. da Cunha, R. T. Akazawa, R.G. Moreira, L.R. de Souza, Weather Parameters and Nosocomial Bloodstream Infection: A Case-Referent Study. *Revista de Saúde Pública* 49, 19. (2015).
14. K. Blot, N. Hammami, S. Blot, D. Vogelaers, M. Lambert, Gram-Negative Central Line-Associated Bloodstream Infection Incidence Peak During the Summer: A National Seasonality Cohort Study. *Scientific Reports* 12, 5202. (2022).
15. M. Cruz-Loya, T. M. Kang, N. A. Lozano, R. Watanabe, E. Tekin . Stressor Interaction Networks Suggest Antibiotic Resistance Co-Opted from Stress Responses to Temperature. *The ISME Journal*. 13, 12–23. (2019).
16. Rodríguez-Verdugo, N.L. Huntelman, M. Cruz-Loya, V. Savage, P. Yeh, Compounding Effects of Climate Warming and Antibiotic Resistance. *iScience* 23, 101024.(2020).
17. L. Guigard, F. Nazaret, J. Almario, F. Bertolla, H. Boubakri, The Connections of Climate Change with Microbial Ecology and Their Consequences for Ecosystem, Human, and Plant Health. *Journal of Applied Microbiology* 12, lxaf168.(2025)
18. M.F. Salgueiro, J.A.C. Martínez, R.K. Gan, P.A. González, Climate Change and Antibiotic Resistanc,: A Scoping Review. *Environmental Microbiology* 16, e70008. (2024).

19. L.N. Lemos, A. Pedrinho, A.T. Ribeiro de Vasconcelos, S.M. Tsai, L.W. Mendes. Amazon Deforestation Enriches Antibiotic Resistance Genes. *Soil Biology and Biochemistry* 153, 108110 (2021).
20. K.V.L. Lima, J.H.F. Jesus, R.F.P. Nogueira, Occurrence of Antibiotics in Aqueous Matrices: An Outlook About the Situation in Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 35, 1–14 (2023).
21. IBGE, 2022 Census [online], 2022, accessed 26 May 2025. Available at: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/...>
22. E.H. Macedo, B. Lehner, J.A. Nicell, U. Khan, E.Y. Klein, Antibiotics in the Global River System Arising from Human Consumption. *PNAS Nexus* 4, 096. (2025).
23. N. Scaccia, J. V. da Silva Fonseca, A. L. Megueya, G. L. de Aragão, T. Rasolofoarison, Analysis of Chlorhexidine, Antibiotics and Bacterial Community Composition in Water Environments from Brazil, Cameroon and Madagascar During the COVID-19 Pandemic. *Science of the Total Environment*, 932, 173016. (2024)
24. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Synthesis Report (SYR): *Sixth Assessment Report (AR6)* [online], 2023, accessed 23 July 2025. ISBN 978-92-9169-164-7. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/...>

8.4 Arbovírus e mudanças climáticas: desafios contemporâneos

Maria Cassia Mendes-Correa, Ester Cerdeira Sabino

As arboviroses representam um grande desafio para a saúde pública. Quando consideramos especificamente a dengue (DENV), estima-se que somente ela seja responsável pelo acometimento e adoecimento de cerca de 100 milhões de pessoas anualmente (1). O risco global destas infecções tem aumentado de forma extraordinária nos últimos anos, devido à múltiplos fatores, destacando-se entre eles, a rápida urbanização, às mudanças climáticas, à resistência a inseticidas, à pobreza, ao saneamento inadequado, ao aumento da mobilidade humana e a outros fatores sociais (2).

O crescimento populacional de mosquitos e a adaptabilidade dos vetores também contribuem para o ressurgimento dos arbovírus. O aumento de casos de DENV tem sido associado também à redução do controle do mosquito e à diminuição das medidas de saúde pública (3,4). Outros fatores que também contribuem para o ressurgimento são características genéticas do hospedeiro, a evolução viral e a densidade das populações humanas e de mosquitos (5).

Portanto, o surgimento e o ressurgimento dos arbovírus como um problema de saúde pública é uma questão altamente complexa, resultante da convergência e das interações recíprocas de múltiplos fatores, que muitas vezes retroalimentam o processo.

Estima-se que as alterações climáticas possam interferir na transmissão global de arbovírus, principalmente através de dois mecanismos diferentes (6):

1. Através da adaptação de vetores de arbovírus e sua subsequente expansão para regiões além de sua distribuição geográfica tradicional (6);

2. Através de alterações na dinâmica de transmissão, interferindo e modificando a duração da estação de transmissão (6).

ADAPTAÇÕES E MODIFICAÇÕES DO VETOR ARBOVÍRUS NA DURAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO

Variações de temperatura, umidade e precipitação associadas às mudanças climáticas afetam a distribuição geográfica e as tendências populacionais desses vetores, influenciando assim a transmissão de doenças como dengue, Zika, Chikungunya e vírus do Nilo Ocidental (3).

A temperatura afeta a transmissão do arbovírus porque tem impactos não lineares na fisiologia do mosquito, alterando o desenvolvimento e as taxas de mortalidade em mosquitos *Aedes* (3,7-9). A temperatura controla a incubação viral em mosquitos, com condições mais quentes encurtando o período de incubação extrínseca (10,11).

O impacto das chuvas na transmissão de arbovírus é multifacetado e influenciado pelo contexto socioecológico local, nas diferentes regiões geográficas.

Os mosquitos *Aedes aegypti* depositam seus ovos preferencialmente em recipientes com água, comumente encontrados em ambientes residenciais, onde as fêmeas se alimentam de sangue humano. Os altos índices pluviométricos podem contribuir para o aumento da população de vetores, gerando mais criadouros com água nas proximidades das residências (12).

No entanto, as condições de seca e a escassez de água também podem levar a um aumento nas populações de vetores quando os indivíduos armazenam água em recipientes perto de suas casas (13).

O aumento das temperaturas provavelmente permitirá que os vetores se instalem em regiões temperadas que agora são, em sua maioria, inadequadas para a sobrevivência desses vetores. Isso inclui a expansão em direção aos pólos e altitudes mais elevadas, resultando no aumento da transmissão de doenças em muitas regiões em cenários de mudanças climáticas (14-18).

A expansão geográfica dos vetores colocará novas populações em risco de infecção, e essas populações não terão imunidade ou terão perfis de imunidade diferentes em comparação com as populações onde os arbovírus circulam atualmente. Por exemplo, prevê-se que mudanças na

adaptação climática aos mosquitos *Aedes* tenham aumentado a população em risco entre as décadas de 1980 e 2020 em aproximadamente dois bilhões de pessoas (19). Estima-se um aumento adicional de mais de dois bilhões de pessoas entre 2015 e 2080 (20).

Além disso, outros mecanismos independentes poderiam interferir nesse processo e determinar modificações adicionais nesses cenários, modificando a intensidade da transmissão e o tamanho de futuros surtos em cenários epidêmicos e endêmicos.

Entre esses mecanismos estão os fenômenos de mobilidade populacional, pobreza, resistência a inseticidas, saneamento inadequado e outros fatores sociais, como já mencionado acima (2).

DESAFIOS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

A Amazônia brasileira é reconhecida como um grande reservatório de arbovírus, com pelo menos 180 arbovírus diferentes, identificados até o momento (21).

Os arbovírus persistem nas florestas por meio de um ciclo silvestre que envolve insetos vetores e hospedeiros vertebrados selvagens.

O desmatamento e a mineração aproximam os humanos desses ambientes, aumentando o risco de doenças zoonóticas novas e recorrentes (22).

O desenvolvimento na Amazônia brasileira levou à formação de assentamentos carentes de infraestrutura básica, como água encanada e coleta de lixo, criando condições favoráveis à reprodução do *A. aegypti* (22).

O crescimento urbano desordenado, as mudanças no uso do solo e o aumento da mobilidade humana permitem que espécies invasoras e patógenos se espalhem ainda mais. Esses problemas ocorrem em paralelo às rápidas mudanças climáticas e ao desmatamento contínuo (22).

Nas últimas duas décadas, a Amazônia brasileira tem enfrentado um aumento nas inundações, secas e incêndios, em grande parte devido aos fortes ciclos de El Niño e La Niña. O El Niño causa condições mais quentes e secas na região amazônica, enquanto o La Niña resulta em um clima mais frio e úmido (23,24).

Até 2060-80, projeta-se que a Amazônia aqueça entre 1 a 2 °C acima da média global devido a secas severas e menor cobertura de nuvens, levando a uma maior radiação de ondas curtas na superfície. Isso pode

levar a região a um ponto crítico, rumo a um ecossistema degradado, semelhante a uma savana, com mais secas, impactando negativamente o sistema climático global (25,26).

O aumento do clima extremo devido às mudanças climáticas pode aumentar o risco de surto de arbovírus nesta região do Brasil, a mais vulnerável em termos de infraestrutura e recursos (22).

Em um evento recente da OMS, a Dra. Sylvie Briand, Diretora de Doenças Pandêmicas e Epidêmicas da OMS, disse que a próxima pandemia pode ser causada por um novo arbovírus e que já há indícios de que o risco está aumentando (27).

Considerando os fatores mencionados, a Amazônia brasileira destaca-se como um local preocupante para o surgimento ou agravamento de arboviroses, que podem representar sérias ameaças à saúde global.

A “*Iniciativa Global para Arbovírus*”, alinhada a esforços como o “*Roteiro da OMS para Doenças Tropicais Negligenciadas*”, a “*Iniciativa Global de Resposta ao Controle de Vetores e a estratégia EYE*”, (28) propõe ações internacionais coordenadas que incluem a viabilização da vigilância global em tempo real e o apoio ao desenvolvimento de testes diagnósticos, tratamentos e vacinas para lidar com futuros surtos.

REFERÊNCIAS:

1. Challenges in combating arboviral infections. *Nat Commun.* 15(1):3350 (2024). doi: 10.1038/s41467-024-47161-3.
2. E. Abbasi, Global expansion of Aedes mosquitoes and their role in the trans-boundary spread of emerging arboviral diseases: A comprehensive review. *IJID. One Health* 6, 100058. (2025). doi: 10.1016/j.ijidoh.2025.100058
3. M.A. Robert, A.M. Stewart-Ibarra, E.L. Estallo, Climate change and viral emergence: evidence from Aedes-borne arboviruses. *Curr Opin Virol.* 40:41-47 (2020). doi: 10.1016/j.coviro.2020.05.001.
4. D.J. Gubler, Dengue and dengue hemorrhagic fever. *Clin. Microbiol. Rev.* 11:480–496. (1998). doi: 10.1128/CMR.11.3.480.
5. H. Ketkar, D. Herman, P. Wang, Genetic Determinants of the Re-Emergence of Arboviral Diseases. *Viruses.* 11(2):150 (2019). doi: 10.3390/v11020150.
6. I. Dorigatti, K.A.M. Gaythorpe, V.M. Cox, F.A Windram, L. Cator, Priorities for modelling arbovirus transmission under climate change. *Trends Mol Med.* S1471-4914(25)00121-2 (2025). doi: 10.1016/j.molmed.2025.05.010

7. O.J. Brady et al., Modelling adult *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* survival at different temperatures in laboratory and field settings. *Parasites Vectors* 6:351. (2013).
8. L.M. Rueda, K.J. Patel, R.C. Axtell, R.E. Stinner, Temperature-dependent development and survival rates of *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol* 27:892-898 (1990).
9. G.H. Samuel, Z.N. Adelman, K.M. Myles, Temperature-dependent effects on the replication and transmission of arthropod borne viruses in their insect hosts. *Curr Opin Insect Sci* 16:108-113 (2016).
10. M. Chan, M.A. Johansson, The incubation periods of dengue viruses. *PLoS One* 7(11): e50972 (2012).
11. B. Tesla, L.R. et al., Temperature drives Zika virus transmission: evidence from empirical and mathematical models. *Proc R Soc B Biol Sci*, 285:20180795 (2018).
12. R. Lowe et al. Nonlinear and delayed impacts of climate on dengue risk in Barbados: a modelling study. *PLoS Med* 15: e1002613 (2018).
13. A.M. Stewart Ibarra et al., Dengue vector dynamics (*Aedes aegypti*) influenced by climate and social factors in Ecuador: implications for targeted control. *PLoS One* 8:e78263 (2013).
14. L. Gilbert, The impacts of climate change on ticks and tick-borne disease risk. *Annu. Rev. Entomol.* 66, 373–388 (2021).
15. C. Barcellos, et al., Climate change, thermal anomalies, and the recent progression of dengue in Brazil. *Sci. Rep.* 14, 1–9 (2024).
16. J. Alencar et al., Effects of seasonality on the oviposition activity of potential vector mosquitoes (Diptera: Culicidae) from the São João River Basin Environmental Protection Area of the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Eur. Zool. J.* 89, 1018–1025 (2022).
17. S.J. Ryan et al., Global expansion and redistribution of *Aedes*-borne virus transmission risk with climate change. *PloS Negl. Trop. Dis.* 13, e0007213 1-20 (2019).
18. S.L. Li et al., Mapping environmental suitability of *Haemagogus* and *Sabethes* spp. mosquitoes to understand sylvatic transmission risk of yellow fever virus in Brazil. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 16, e0010019 (2022).
19. T. Nakase et al., Population at risk of dengue virus transmission has increased due to coupled climate factors and population growth. *Commun. Earth Environ.* 5, 1–11 (2024).
20. J.P. Messina et al., The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nat. Microbiol.* 4,1508–1515. (2019).

21. N. Dégallier et al., Modifications of arbovirus transmission in relation to construction of dams in Brazilian Amazonia. *Cienc Cult* 44:124-35 (1992).
22. R. Lowe et al., *Emerging arboviruses in the urbanized Amazon rainforest*. *BMJ*. Nov 13;371:m4385. doi: 10.1136/bmj.m4385. (2020).
23. M.G. Fonseca et al., Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015-2016 El Niño event. *Ecol Appl* 27:2514-27. doi:10.1002/eap.1628. (2017).
24. M.M. Moura et al., Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Sci Total Environ* 651:1639-51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.242. (2019).
25. J.A. Marengo et al., Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Front Earth Sci* 6:228. doi:10.3389/feart.2018.00228. (2018)
26. C.A. Nobre et al., Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc Natl Acad Sci U S A* 113:10759-68. doi:10.1073/pnas.1605516113 (2016).
27. V.S. Balakrishnan, WHO launches global initiative for arboviral diseases. *Lancet Microbe Jun*;3(6): e407. doi: 10.1016/S2666-5247(22)00130-6. (2022).
28. Report of the third meeting of the WHO Technical Advisory Group on Arboviruses (TAG-Arbovirus): hybrid meeting, Accra, Ghana, 20-22 June 2023. Geneva: World Health Organization; 2024. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

8.5 Malária, mudanças climáticas e perspectivas

Giselle Maria Rachid Viana, Carolina Aguiar, Nathália Nogueira Chamma Siqueira, Izis Mônica Carvalho Sucupira, Celia R. S. Garcia

INTRODUÇÃO

A malária continua sendo um dos principais desafios globais de saúde pública, especialmente em regiões tropicais com grandes vulnerabilidades socioambientais, como o Sudeste Asiático, a África e a Amazônia. A mortalidade global por malária em 2023 permaneceu praticamente igual à de 2022, com aproximadamente 597.000 mortes, sendo crianças e gestantes os grupos mais vulneráveis. As tendências atuais mostram que a mortalidade por malária caiu pela metade nas últimas duas décadas, passando de 28,5 para 13,7 mortes por 100.000 habitantes. No entanto, a incidência global aumentou para 263 milhões de casos em 2023, o que representa 11 milhões a mais do que em 2022 (1). Entre os países sul-americanos, o Brasil representa uma parcela significativa dos casos de malária, com vastas áreas próximas à região Amazônica sendo responsáveis por 99% desses casos. No Brasil, as prevalências dos casos de *P. falciparum* e *P. vivax* eram semelhantes até o final da década de 1980. Desde então, os casos de malária por *P. falciparum* vêm diminuindo progressivamente, enquanto os de *P. vivax* aumentaram e se tornaram predominantes no país, respondendo por mais de 90% dos episódios de malária em 2011 (2). Atualmente, mais de 80% dos casos são causados por *P. vivax*, mas ao longo dos anos, observa-se uma tendência de aumento nos casos de *P. falciparum* (1).

Nas últimas décadas, houve avanços significativos na implementação de estratégias de controle que levaram à redução da transmissão, incluindo marcos importantes na eliminação da malária por *P. falciparum*

em algumas áreas do Brasil (1, 3). No entanto, a predominância dos casos por *P. vivax* impõe desafios únicos ao controle da doença, como recaídas que ocorrem semanas ou meses após a infecção inicial, maior diversidade genética em comparação com *P. falciparum* e a capacidade do vetor de transmitir a doença em diferentes faixas de temperatura. Combinados aos impactos crescentes das mudanças climáticas, esses fatores ameaçam os avanços já conquistados (4).

Evidências acumuladas ao longo dos anos indicam que o aumento das temperaturas, alterações nos padrões de chuva, desmatamento e eventos climáticos extremos, como enchentes e secas prolongadas, têm modificado a distribuição dos mosquitos *Anopheles* e influenciado a sazonalidade da transmissão da malária (5). Estudos de modelagem de iniciativas como o *Malaria Atlas Project* e pesquisas conduzidas por cientistas brasileiros sugerem que o Brasil poderá enfrentar mudanças significativas na ecologia dos vetores e aumento do risco de surtos, particularmente na região Amazônica, onde um mosaico de ecossistemas e pressões antrópicas complica o cenário epidemiológico (6).

Este texto examina o impacto das mudanças climáticas nos padrões da malária no Brasil, com foco na Bacia Amazônica. Destaca-se a necessidade de uma agenda integrada de pesquisa sobre malária que combine vigilância genômica e entomológica, modelagem clima-epidemiológica e a identificação de novos alvos terapêuticos e de controle vetorial.

DETERMINANTES CLIMÁTICOS E AMBIENTAIS DA TRANSMISSÃO: VETORES, ECOSSISTEMAS E EVENTOS EXTREMOS

Fatores ambientais e climáticos, como temperatura, umidade relativa, precipitação e mudanças no uso do solo, como desmatamento e queimadas, influenciam fortemente a dinâmica de transmissão da malária na Amazônia. O aumento das temperaturas médias, a variabilidade nos padrões de chuva e a alteração dos ciclos hidrológicos estão entre os efeitos mais observados na região, impactando diretamente a presença e o desenvolvimento do vetor, especialmente *Anopheles darlingi*, o principal vetor da malária na Amazônia (9). Essas condições aumentam a capacidade vetorial e expandem as áreas de risco para além dos limites historicamente endêmicos (6) (Figura 1).

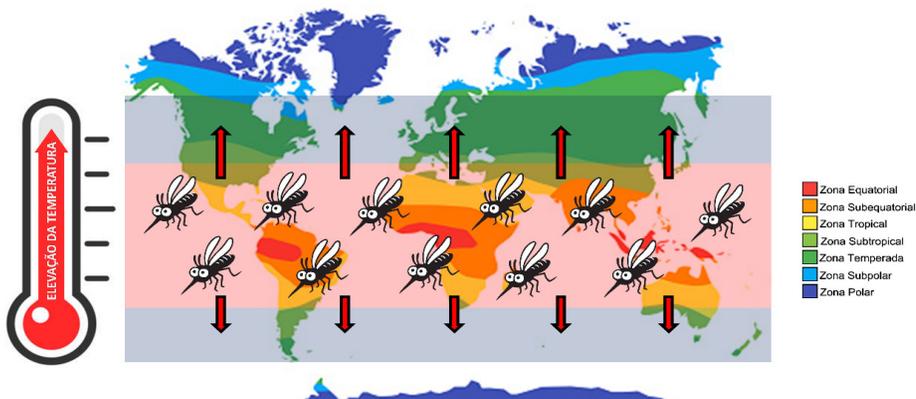


Figura 1: Expansão dos habitats do mosquito *Anopheles* para regiões temperadas devido ao aquecimento global. Os principais vetores da malária (*Anopheles spp.*) estão predominantemente distribuídos em regiões tropicais e subtropicais (representadas pela faixa vermelha). O aumento das temperaturas globais está permitindo que esses vetores sobrevivam e se estabeleçam em climas mais frios anteriormente inadequados, possibilitando sua expansão para o norte, em direção às regiões temperadas (faixas azuis), como indicado pelas setas vermelhas.

O fenômeno El Niño frequentemente provoca temperaturas mais altas e redução das chuvas, impactando diretamente a dinâmica de transmissão de doenças como a malária. Essas alterações afetam os ciclos ecológicos dos vetores e podem aumentar a exposição humana, especialmente em áreas rurais e de floresta fragmentada, onde o acesso ao saneamento e aos serviços de saúde é limitado (7).

Além disso, eventos climáticos extremos, como enchentes e secas prolongadas, afetam a ecologia dos criadouros dos vetores e o comportamento humano, alterando assim os padrões de exposição à infecção (11, 12). A expansão de assentamentos humanos sobre áreas de floresta, combinada ao desmatamento intensivo, aumenta a presença humana em zonas de alto risco e a exposição aos vetores da malária, altamente sensíveis às mudanças ambientais. O desmatamento modifica a paisagem, favorecendo o surgimento de microambientes propícios à proliferação dos vetores. A adaptação dos vetores a esses ambientes, somada à resistência aos inseticidas, contribui para a intensificação da transmissão e dificulta o manejo das doenças transmitidas por vetores (8,9).

A supressão da vegetação rompe o equilíbrio ecológico e aumenta a exposição humana a reservatórios silvestres de patógenos, favorecendo assim o surgimento de zoonoses e a disseminação de doenças já

conhecidas. A modificação do habitat também pode alterar os padrões de deslocamento dos vetores, aumentando sua presença em áreas urbanas e periurbanas.

Dada a complexidade dos ciclos epidemiológicos e da expansão vetorial associada ao aquecimento global, o desenvolvimento de estratégias integradas de controle, o uso de ferramentas de epidemiologia espacial como sensoriamento remoto e modelagem preditiva, além da adoção de tecnologias inovadoras, tornaram-se essenciais para antecipar mudanças na distribuição dos vetores e avaliar o risco de surgimento de surtos sob diferentes cenários climáticos. Isso contribui para mitigar os impactos na saúde pública. A integração de dados ambientais, climáticos e epidemiológicos fortalece as estratégias de vigilância e facilita respostas oportunas por parte do Sistema Único de Saúde (SUS) do Brasil (10,11).

VULNERABILIDADE, MOBILIDADE HUMANA E RESPOSTAS DO SISTEMA DE SAÚDE

A vigilância local precisa se tornar cada vez mais estratégica, considerando a proporção crescente de casos autóctones relatados fora dos grandes centros urbanos, o que ressalta a necessidade de reforçar as respostas em territórios periféricos e de difícil acesso logístico.

O Brasil tem feito avanços substanciais em direção à meta de eliminação da malária até 2035. Entre 2021 e 2024, houve uma redução de 27% no número de municípios com transmissão ativa, passando de 288 para 211. Além disso, o número de municípios prioritários, aqueles responsáveis por 80% da carga nacional de malária, caiu de 33 em 2021 para 25 em 2024 (Figura 2). Essa redução na concentração territorial da malária reflete os efeitos positivos da vigilância descentralizada, da ampliação do acesso ao diagnóstico e da melhoria nas estratégias integradas nos municípios de alta incidência (11).

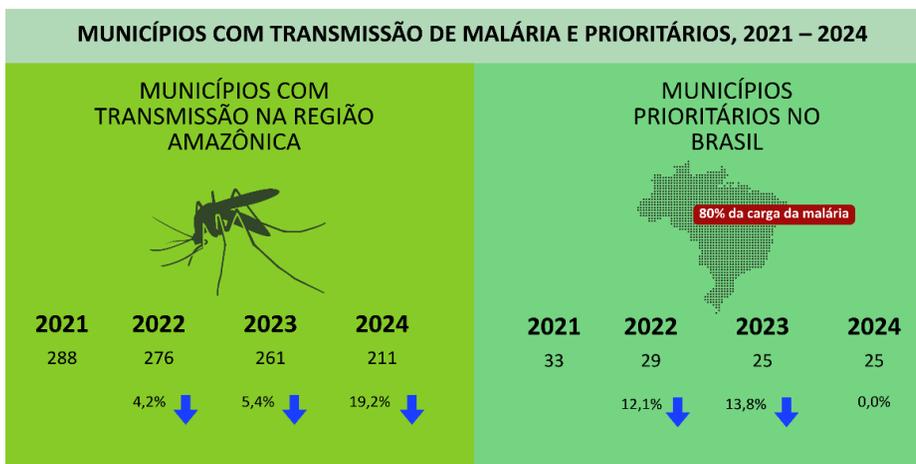


Figura 2: Evolução dos municípios com transmissão ativa de malária e municípios prioritários entre 2021 e 2024. Fonte: Sivep-Malária/SVSA/MS. Imagem adaptada da apresentação do Dia Internacional de Luta contra a Malária, 2025, PNCEM/DEDT/SVSA/MS.

No entanto, é importante destacar a relevância da medicina do viajante, da vigilância sentinela e da coordenação interinstitucional na prevenção da transmissão para além das áreas endêmicas. Isso também exige respostas intersetoriais e estratégias de comunicação em saúde voltadas para populações em trânsito. É igualmente fundamental evitar atrasos na suspeita clínica, dada a sobreposição de sintomas com outras doenças infecciosas febris, como dengue, leptospirose, doença de Chagas aguda e leishmaniose visceral.

No caso específico da malária por *P. vivax*, a capacidade do parasita de causar recaídas e manter infecções assintomáticas representa um desafio adicional. Essas características biológicas são exacerbadas pela variabilidade climática, que afeta a distribuição do vetor, seu comportamento de picada e os criadouros, especialmente em áreas com transmissão instável. Temperaturas mais elevadas e mudanças nos padrões de precipitação ampliam a janela de transmissão sazonal, facilitando a reintrodução do *P. vivax* em áreas periurbanas e de fronteira, incluindo aquelas em processo de desmatamento e com alterações hidrológicas. Além disso, eventos climáticos extremos, como secas prolongadas ou enchentes, podem deslocar comunidades e aumentar a exposição de indivíduos não imunes ou parcialmente imunes.

Em populações com alta mobilidade, como trabalhadores extrativistas e migrantes, as infecções por *P. vivax* muitas vezes permanecem não diagnosticadas. Isso contribui para a manutenção de reservatórios de hipnozoítos e ciclos silenciosos de transmissão, tornando as estratégias de eliminação particularmente complexas em áreas remotas. Os sistemas de vigilância devem evoluir para identificar e responder a esses reservatórios ocultos, incorporando ferramentas de modelagem espacial e temporal, ampliando o monitoramento molecular e entomológico e fortalecendo abordagens comunitárias alinhadas às dinâmicas socioculturais locais e às estratégias de adaptação às mudanças climáticas (11).

RESISTÊNCIA A ANTIMALÁRICOS E INOVAÇÕES TERAPÊUTICAS NO BRASIL: UMA PERSPECTIVA SOBRE *P. VIVAX* E *P. FALCIPARUM*

A resistência aos medicamentos antimaláricos continua sendo um desafio significativo para os esforços de controle e eliminação da malária em todo o mundo. Embora a cloroquina (CQ) continue eficaz contra *P. vivax* em muitas regiões do Brasil, cepas resistentes à CQ têm sido amplamente documentadas no Sudeste Asiático, Oceania e em partes da América do Sul (12) (Figura 3).

Mapa Mundial da Resistência aos Antimaláricos (2015–2024)

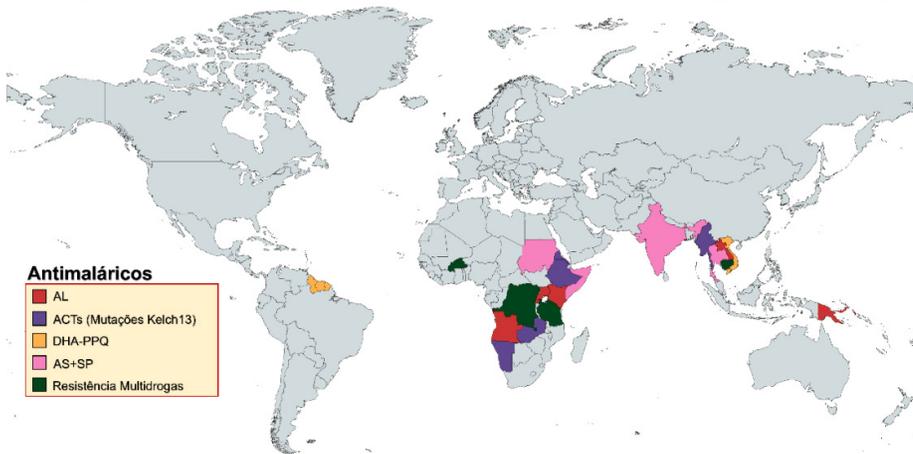


Figura 3: O mapa ilustra a distribuição geográfica da resistência de *P. falciparum* às principais terapias antimaláricas, conforme relatado no *Relatório Mundial da Malária da OMS 2024*. As cores indicam o medicamento ou a combinação terapêutica predominante para os quais foi documentada resistência ou falha no tratamento. **ACT:** terapia combinada à base de artemisinina; **AL:** artemeter–lumefantrina; **AS:** artesunato; **DHA-PPQ:** diidroartemisinina–piperaquina; **SP:** sulfadoxina–pirimetamina.

No Brasil, o primeiro caso confirmado de *P. vivax* resistente à CQ foi relatado em 1999 em Manaus, Amazonas, e estudos posteriores confirmaram sua presença em diversas áreas da região amazônica. Ainda assim, a prevalência geral da resistência à CQ no Brasil permanece baixa e geograficamente restrita, o que sustenta o uso contínuo da CQ como tratamento de primeira linha (13). Uma limitação importante para a vigilância da resistência do *P. vivax* é a ausência de marcadores moleculares validados. Atualmente, o monitoramento depende principalmente de estudos de eficácia terapêutica, enquanto os ensaios *ex vivo* ainda são limitados a centros de pesquisa especializados, o que restringe sua aplicação mais ampla em programas de saúde pública (14).

A base genética da resistência à CQ em *P. vivax* permanece pouco definida. As pesquisas têm se concentrado principalmente em ortólogos dos genes de resistência do *P. falciparum*, particularmente *pvcr-t* e *pvm-dr1*. O gene *pvcr-t*, homólogo do *pfcr-t*, tem sido associado de forma preliminar à falha terapêutica da CQ por meio do aumento da expressão gênica. Variações no número de cópias (*copy number variation* – CNV) do

pvcrt-o também foram relatadas em isolados brasileiros e estão relacionadas ao fenótipo resistente à CQ (15). Polimorfismos regulatórios adicionais também foram investigados; notadamente, Sá et al. (2019) demonstraram que um aumento no número de repetições em tandem MS334 em descendentes resistentes à CQ de *P. vivax* da linhagem Sal-1 levou ao aumento da expressão do *pvcrt-o* e à redução da suscetibilidade à CQ, apoiando a relevância funcional dessa região promotora nos mecanismos de resistência (16).

Pesquisas recentes sobre *P. vivax* (17) aprimoraram nosso entendimento sobre a infecção. Estudos indicam uma variação significativa na biomassa total de parasitas entre pacientes, independentemente dos níveis de parasitemia periférica. Análises genéticas conduzidas no Brasil e em outros países da América do Sul revelaram alta diversidade, com isolados sul-americanos formando um agrupamento genético único no cenário global. No Brasil, sete clados foram identificados, incluindo uma linhagem distinta nos estados do Amapá e Pará (18). Embora esses achados ainda necessitem de validação clínica, eles indicam alvos promissores para o desenvolvimento de ferramentas moleculares de vigilância e reforçam a necessidade de integrar dados genômicos às estratégias de monitoramento da resistência.

Paralelamente aos avanços genômicos e moleculares, também houve progresso no desenvolvimento de vacinas e inovações terapêuticas, que representam estratégias complementares no controle da malária. Enquanto a vacina Mosquirix™ (RTS,S/AS01), desenvolvida para *P. falciparum*, oferece proteção limitada a crianças menores de 18 meses, a vacina R21-Matrix-M, também específica para *P. falciparum*, demonstrou até 75% de proteção contra a malária em crianças menores de 36 meses (19). Já uma nova vacina contra *P. vivax*, testada em modelos não clínicos, apresentou perfil seguro e induziu forte resposta imune, o que respalda sua progressão para ensaios clínicos (20).

Estudos com fármacos para terapia antimalárica são importantes. A tafenoquina, uma 8-aminoquinolina de ação prolongada foi aprovada para tratar malária por *P. vivax*. A tafenoquina oferece a vantagem de administração em dose única, melhorando a adesão ao tratamento e reduzindo o risco de recaídas associadas aos hipnozoítos (21). Ressalta-se que o Brasil foi um dos primeiros países do mundo a implementar a tafenoquina em suas diretrizes nacionais de tratamento da malária, evidenciando sua liderança e compromisso com a inovação no controle da doença.

No caso de *P. falciparum*, o Brasil adotou as terapias combinadas à base de artemisinina (ACTs) como tratamento de primeira linha em 2006. Os esquemas mais amplamente utilizados incluem artemeter–lumefantrina (AL) e artesunato–mefloquina (ASMQ), ambos associados a uma dose única de primaquina para bloquear a transmissão (22). A resistência à artemisinina, observada pela primeira vez há mais de uma década na Sub-região do Grande Mekong (GMS), é caracterizada principalmente pelo retardo na depuração parasitária após a monoterapia com artesunato ou ACT. Clinicamente, essa resistência é definida como uma meia-vida de depuração do parasita superior a cinco horas ou parasitemia detectável no terceiro dia. O principal determinante molecular da resistência à artemisinina é o gene *pfkelch13* (também conhecido como K13), com mutações pontuais localizadas principalmente no domínio β -propulsor, as quais conferem redução da suscetibilidade ao medicamento in vitro e in vivo (23).

Apesar da baixa prevalência de mutações no *pfkelch13* associadas à resistência à artemisinina na Amazônia brasileira (24, 25), a alta mobilidade transfronteiriça entre populações garimpeiras, especialmente entre Venezuela, Guiana e o estado brasileiro de Roraima representa um risco considerável para a introdução e disseminação de cepas resistentes à artemisinina de *P. falciparum*.

Diante dos desafios impostos pela resistência emergente a medicamentos, a identificação de novos alvos moleculares tornou-se um foco crítico na pesquisa em malária. Martins e Daniel-Ribeiro (2024) (26) exploraram os mecanismos envolvidos nas sequelas neurocognitivas associadas à malária, sugerindo que a inflamação sistêmica e a disfunção da barreira hematoencefálica durante a infecção contribuem para problemas neurológicos de longo prazo. Os receptores acoplados à proteína G (GPCRs) emergiram como alvos promissores no parasita *Plasmodium*. Por exemplo, em *P. falciparum*, o receptor semelhante a GPCR PfSR25 atua como sensor de potássio, influenciando a sinalização por cálcio; sua deleção aumenta a suscetibilidade do parasita aos antimaláricos (27). De modo semelhante, a quinase PfelK1 desempenha um papel central na sincronização do ciclo celular do parasita mediada pela melatonina; busca-se bloquear essa via utilizando derivados de melatonina para interromper o crescimento do parasita (28). Além disso, a biliverdina, subproduto da degradação do heme, inibe o crescimento do parasita ao atingir a enolase e as vias de resposta ao estresse mediadas por eIF2 α (29).

Coletivamente, esses achados evidenciam as limitações atuais na vigilância da resistência aos antimaláricos, particularmente em *Plasmodium vivax*, e ressaltam a necessidade de validação específica de marcadores moleculares. Apesar da eficácia contínua da cloroquina e das ACTs em muitas áreas do Brasil, a emergência e disseminação de cepas resistentes em regiões vizinhas e a alta mobilidade das populações através das fronteiras expõem a fragilidade das estratégias terapêuticas existentes. Nesse contexto, a busca por novos compostos antimaláricos e o desenvolvimento de vacinas eficazes continuam sendo prioridades globais.

Por fim, como já mencionado, é essencial uma agenda integrada de pesquisa em malária. O avanço da pesquisa em vacinas e descoberta de novos medicamentos é particularmente crucial para o desenvolvimento de intervenções eficazes voltadas às populações vulneráveis. Esses esforços são fundamentais para orientar estratégias baseadas em evidências e enfrentar os desafios atuais e futuros da saúde pública.

REFERÊNCIAS

1. World Health Organization (2024) World Malaria Report 2024. (World Health Organization, Geneva).
2. A.M. Siqueira, *et al.* Plasmodium vivax landscape in Brazil: Scenario and Challenges. *Am J Trop Med Hyg* 95:87 (2016).
3. N.J. Arisco, *et al.* Ecological change increases malaria risk in the Brazilian Amazon. *Proc Natl Acad Sci USA*. 121:e2409583121 (2024).
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6) – Impacts, Adaptation and Vulnerability. (IPCC, Geneva) (2023).
5. A.K.R. Galardo, *et al.* Seasonal abundance of anopheline mosquitoes and their association with rainfall and malaria along the Matapí River, Amapá, Brazil. *Med Vet Entomol*. 23:335–349 (2009).
6. Malaria Atlas Project Modelling the burden of climate-driven malaria transmission in Africa and the world. (Gates Foundation Report) (2023).
7. A.S. Silva, *et al.* Impact of El Niño on the dynamics of American cutaneous leishmaniasis in a municipality in the western Amazon. *Acta Trop*. 222:106032 (2021).

- P.E.G. Coutinho, *et al.* An analysis of the influence of the local effects of climatic and hydrological factors affecting new malaria cases in riverine areas along the Rio Negro and surrounding Puraquequara Lake, Amazonas, Brazil. *Robust decision making*. 190:311 (2018).
8. M.C. Castro, *et al.* Malaria risk on the Amazon frontier. *Proc Natl Acad Sci USA*. 103:2452–2457 (2006).
9. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (2023) Agenda Nacional de Ciência para o Clima e Saúde. (MCTI, Brasília).
10. Ministério da Saúde (Brazil), Secretaria de Vigilância em Saúde (2024) Boletim Epidemiológico da Malária. Disponível em: http://200.214.130.44/sivep_malaria/. Acessado em 6 de julho de 2025.
11. F.S. Santana Filho, *et al.* Chloroquine-resistant *Plasmodium vivax*, Brazilian Amazon. *Emerg Infect Dis*. 13(7):1125 (2007).
12. Silva SR, *et al.* Ex vivo susceptibility of *Plasmodium vivax* isolates from the Brazilian Amazon to commonly used antimalarial drugs and association with molecular markers. *Int J Parasitol Drugs Drug Resist*. 15:9–24 (2021).
13. Aguiar ACC, *et al.* *Plasmodium vivax* and *Plasmodium falciparum* ex vivo susceptibility to antimalarials and gene characterization in Rondônia, West Amazon, Brazil. *Malar J*. 13:73 (2014).
14. S.R. Silva, *et al.* Gene copy number variation and gene expression of *Plasmodium vivax* multidrug resistance (*pvmdr1*) and chloroquine resistance transporter (*pvcr-t*) genes in Brazilian isolates. *Antimicrob Agents Chemother*. 62(1):e01806-17 (2018).
15. J.M. Sá, *et al.* Transcriptional profiling defines dynamics of parasite gene expression in response to chloroquine treatment in *Plasmodium vivax*. *Nat Commun*. 10:4300 (2019).
16. J.L. Silva-Filho, *et al.* Total parasite biomass but not peripheral parasitaemia is associated with endothelial and haematological perturbations in *Plasmodium vivax* patients. *eLife*. 10:e71351 (2021).
17. A. Ibrahim, *et al.* Population-based genomic study of *Plasmodium vivax* malaria in seven Brazilian states and across South America. *Lancet Reg Health Am*. 18:100420 (2023).
18. World Health Organization. WHO recommends R21/Matrix-M vaccine for malaria prevention in updated advice on immunization. (World Health Organization, Geneva) (2023).
19. R.F. Marques, *et al.* Non-clinical toxicity and immunogenicity evaluation of a *Plasmodium vivax* malaria vaccine using Poly-ICLC (Hiltonol®) as adjuvant. *Vaccine* 42(9), 2394–2406 (2024).

20. M.V.G. Lacerda, *et al.* Single-Dose Tafenoquine to Prevent Relapse of *Plasmodium vivax* Malaria. *N Engl J Med.* 380(3):215. doi: 10.1056/NEJ-Moa1710775 (2019).
21. Ministério da Saúde. Guia de tratamento da malária. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/svsa/malaria/tratamento/guia_tratamento_malaria_2nov21_isbn_site.pdf/view
22. N.W. Lucchi, R. Abdallah, J. Louzada, V. Udhayakumar, J.Oliveira-Ferreira. Molecular Surveillance for Polymorphisms Associated with Artemisinin-Based Combination Therapy Resistance in *Plasmodium falciparum* Isolates Collected in the State of Roraima, Brazil. *Am J Trop Med Hyg.* 102(2):310 (2020).
23. J. de Aguiar-Barros, *et al.* Molecular Surveillance of Artemisinin-Resistant *Plasmodium falciparum* Parasites in Mining Areas of the Roraima Indigenous Territory in Brazil. *Int J Environ Res Public Health.* 21(6):679 (2024).
24. R.L.D. Machado, *et al.* Correlation between *Plasmodium vivax* variants in Belém, Pará State, Brazil and symptoms and clearance of parasitaemia. *Braz J Infect Dis.* 7:176–178 (2003).
25. Y.C. Martins, Daniel-Ribeiro CT A hypothesis to explain malaria-induced neurocognitive sequelae. *Trends Parasitol.* 40:1077 (2024).
26. M.S. Moraes, *et al.* *Plasmodium falciparum* GPCR-like receptor SR25 mediates extracellular K⁺ sensing coupled to Ca²⁺ signaling and stress survival. *Sci Rep.* 7:9545 (2017).
27. B.K.M. Dias, *et al.* The *Plasmodium falciparum* eIK1 kinase (PfeIK1) is central for melatonin synchronization in the human malaria parasite. Melatonin blocks melatonin action on parasite cell cycle. *J Pineal Res.* 69:e12685 (2020).
28. E. Alves, *et al.* Biliverdin targets enolase and eukaryotic initiation factor 2 (eIF2 α) to reduce the growth of intraerythrocytic development of the malaria parasite *Plasmodium falciparum*. *Sci Rep.* 6:22093 (2016).

8.6 Conclusão

A crise climática é também uma crise cardiovascular. Os efeitos da poluição e das temperaturas extremas já estão refletidos nas estatísticas de mortalidade e nos serviços de saúde. A hipótese do “coração de verão” nos lembra que o impacto ambiental começa cedo e pode moldar nossa biologia de maneira profunda. Reconhecer essa conexão e agir de forma integrada entre ciência, políticas públicas e sociedade civil é imperativo para garantir um futuro mais saudável e resiliente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) já advertiu que a América Latina, incluindo o Brasil, deve experimentar um aumento na ocorrência de eventos extremos, como chuvas torrenciais e inundações, nos próximos anos. Isso sugere que, na ausência de intervenções estruturais e políticas públicas eficazes, a tendência é de elevação dos casos de leptospirose e outras doenças bacterianas, principalmente em áreas urbanas vulneráveis. O Brasil enfrenta desafios significativos de inundações catastróficas e altas taxas de desmatamento que podem amplificar a crescente prevalência de resistência aos antibióticos nos compartimentos humano-animal-ambiente, representando uma ameaça à saúde pública.

Embora existam vacinas disponíveis para algumas infecções por arbovírus, não há opções de tratamentos antivirais específicos, e a carência de testes diagnósticos em diversas regiões permanece um problema sem solução. Além disso, os métodos de tratamento existentes para doenças relacionadas a arbovírus concentram-se basicamente no manejo sintomático. A relação entre as mudanças climáticas e a transmissão de arbovírus é complexa, envolvendo fatores como uso do solo, urbanização e comportamento humano. O combate aos arbovírus exige um esforço conjunto, com vacinas, controle de vetores e aprimoramento de diagnósticos, tratamentos, vigilância e ações de saúde pública.

A malária permanece como um grave problema de saúde pública, exigindo abordagens integradas diante de suas múltiplas dimensões ecológicas, sociais e clínicas. As mudanças climáticas intensificam os riscos de transmissão, especialmente na região Amazônica, exigindo vigilância

reforçada e adaptação contínua das estratégias de controle. A crescente predominância de *P. vivax* impõe desafios adicionais, como recaídas e infecções assintomáticas. A resistência aos antimaláricos, aliada à mobilidade populacional, fragiliza os avanços obtidos, reforçando a necessidade de inovação terapêutica. Investimentos em pesquisa, desenvolvimento de vacinas e novos alvos moleculares são essenciais para alcançar a meta de eliminação até 2035.

Conclui-se que a saúde humana está profundamente entrelaçada às transformações ambientais e urbanas impulsionadas pelas mudanças climáticas. O modo como vivemos nas cidades revela tanto os avanços da civilização quanto as fragilidades estruturais que ampliam desigualdades e riscos à vida. A adaptação fisiológica tem limites, especialmente em uma população global cada vez mais idosa e vulnerável. Diante desse cenário, torna-se urgente alinhar ciência, ética e políticas públicas para reconstruir cidades mais justas, resilientes e saudáveis. A crise climática, enfim, é também um chamado à solidariedade e à reinvenção do nosso pacto coletivo de convivência.

9. DESASTRES, IMPACTOS E VULNERABILIDADES RELACIONADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Oswaldo L. L. Moraes⁴⁸, Regina Alvalá⁴⁹, Pedro Camarinha⁴⁹, Ana Paula Cunha⁴⁹, Silvia Saito⁴⁹, Marcelo Seluchi⁴⁹, Rachel Trajber⁴⁹

INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório mais recente do IPCC sobre mudança do clima, em especial sobre impactos, adaptação e vulnerabilidade (IPCC 2021), os desastres provocados pelas mudanças climáticas já são mais frequentes e intensos do que previstos pelos cientistas. Logo, o risco de desastres pode continuar a aumentar, mesmo que as nações consigam limitar as emissões de gases de efeito estufa que impulsionam o aquecimento global. Ainda que o aqui destacado explicitamente causas e efeitos, faz-se necessário uma abordagem mais aprofundada, particularmente para o Brasil, o que é priorizado neste Capítulo.

Prevê-se que as mudanças climáticas tenham uma série de consequências graves, algumas das quais terão impactos em longo prazo, como a propagação de doenças e a elevação do nível do mar, enquanto outras terão impactos mais imediatos, como chuvas intensas, inundações, deslizamentos de terra. Embora reconhecendo a importância das

48 Departamento para o Clima e Sustentabilidade, MCTI, Brasília, DF.

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

Autor correspondente: osvaldo.moraes@gmail.com

outras consequências previstas das mudanças climáticas, neste capítulo visou-se abordar os “eventos climáticos extremos” responsáveis por desastres geo-hidro-climáticos.

A série de eventos climáticos extremos registrados no Brasil nos últimos anos têm demandado esforços dos setores científico-acadêmicos com vistas à aprofundar e acelerar o *nexus* entre mudanças climáticas e desastres. Não obstante, as mudanças climáticas e seus impactos são questões científicas de grande complexidade, portanto, não há respostas simples para essa conexão. Entender o que a ciência pode estabelecer é cada vez mais relevante, especialmente para subsidiar decisões políticas.

Com foco inicial sobre as ameaças da natureza e suas inerentes complexidades, diversas linhas de evidências têm sido reunidas para criar um panorama da influência das mudanças climáticas nos eventos climáticos extremos (Drexler and Meisenzahl, 2024). Por exemplo, para ondas de calor e chuvas intensas, a influência já é clara. Em outros casos, como furacões, as evidências estão apenas começando a surgir; em outros casos, ainda não há indicações claras. No entanto, em todos os casos, a tendência para o futuro é preocupante: a partir de modelagem tem-se indicado que, a menos que medidas sérias sejam tomadas, o aquecimento global atingirá níveis nos quais vários tipos de eventos extremos são muito mais prováveis. Mas, seguindo o rigor científico o que não se pode afirmar, e talvez nunca se possa, é que qualquer evento específico possa ser atribuído diretamente às mudanças climáticas. Embora um evento específico possa ser mais provável em decorrência das mudanças climáticas, sempre haverá a possibilidade de que ele tenha ocorrido em circunstâncias inalteradas, dada a não linearidade do sistema climático. Qualquer evidência científica da relação entre desastres relacionados ao clima e mudanças climáticas terá, portanto, de se correlacionar com tendências estatisticamente significativas, e não a incidentes específicos. Deve-se, por critérios científicos, ressaltar que algumas tendências em condições climáticas severas parecem mais bem identificadas do que outras; no entanto, as principais barreiras à criteriosa compreensão são, em primeiro lugar, as estatísticas – a capacidade de identificar o sinal a partir do ruído da variação natural – e, em segundo lugar, o período limitado (no contexto temporal) em que o aquecimento vem ocorrendo. Cenários oriundos de modelagem que levam em conta novas emissões de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, o aquecimento global indicam que, infelizmente, o sinal se tornará muito mais claro no futuro (Hamdan et al. 2023).

Contudo, a atribuição de causas entre mudanças climáticas e eventos extremos e é apenas um dos elos entre mudanças climáticas e desastres. Um ano com “n” eventos extremos a mais do que a média pode ser muito menos impactante do que outro ano com “n” eventos extremos a menos do que a média. Em outras palavras, além do elemento de acaso no impacto do aumento de eventos climáticos extremos, é fundamental considerar que algumas áreas também são mais vulneráveis a danos, como ecossistemas frágeis ou áreas urbanizadas em planícies de inundação. Um evento extremo pode culminar em um desastre quando áreas vulneráveis são afetadas.

As mudanças climáticas certamente moldam os eventos climáticos. No entanto, descrever o clima e o tempo como causas dos desastres pode ser equivocado, uma vez que os desastres são causados pela combinação entre ameaças da natureza e as vulnerabilidades associadas às ações antrópicas. Assim, é necessário cautela em associar causas de eventos climáticos extremos e os desastres associados. Mesmo quando a ciência consegue, com rigor, atribuir tais eventos às mudanças climáticas, os danos resultantes são essencialmente decorrentes das vulnerabilidades existentes combinadas com as ameaças que deflagraram os eventos geo-hidrológicos.

As pessoas entendem que os danos que sofrem são devidos às suas vulnerabilidades. Como ressaltado por Wisner et al. (2004), não há crise sem vulnerabilidade. Um evento extremo pode não causar danos em comunidades bem preparadas. No entanto, uma comunidade vulnerável pode sofrer danos ainda que o evento extremo não seja tão extremo assim. De modo similar, os impactos podem se expandir e amplificar em uma relação direta com a intensidade da ameaça natural. Uma comunidade pode inferir os danos às suas vulnerabilidades, mesmo que o evento climático desencadeador tenha uma assinatura evidente de mudança climática (Ribot et al., 2020). Em outras palavras, atribuir o desastre apenas a um evento climático é, portanto, inadequado. Por outro lado, atribuir desastres apenas às vulnerabilidades reduz a importância do outro fator que o desencadeia e, particularmente, dos eventos climáticos induzidos ou agravados pelas emissões de gases de efeito estufa (Moraes 2023a). Ou seja, é cientificamente desafiador colocar em um mesmo cenário as causas locais (vulnerabilidades) com a causa global (o aumento das concentrações de gases de efeito estufa).

Conforme ressaltado, relacionar os desastres que vem sendo registrados diretamente como resultantes das mudanças climáticas pode não ser completamente apropriado. Logo, para a adequada avaliação, busca-se a correlação considerando-se o cruzamento de dados entre a tendência dos eventos extremos e a tendência no número de desastres, o que requer não apenas dados confiáveis, mas, também, um conjunto de dados amostral significativo para que as análises estatísticas possam ser representativas (Moraes e Lacerda, 2024).

Dados podem ser definidos como fatos que podem ser armazenados e investigados (Hackman et al. 2024). Frequentemente usado como sinônimo de informação, ressalta-se que há uma diferença sutil entre os dois. O termo dados refere-se aos detalhes brutos dos quais a informação é posteriormente derivada. Embora as definições de dados pareçam claras, referindo-se a fatos, números ou observações, também é evidente que, quando se trata do conteúdo dos dados, não há homogeneidade, causando confusão fácil em relação às maneiras como os dados são tratados, interpretados e apresentados.

A contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2021) incluiu uma análise da realidade das mudanças climáticas. Conforme este relatório *“agora temos uma visão muito mais clara do clima passado, presente e do possível futuro, e essas informações são essenciais para entender para onde estamos caminhando, o que pode ser feito e as múltiplas facetas de um clima em mudança para o qual precisamos nos preparar, em todas as regiões”*. As conclusões do Grupo de Trabalho I foram baseadas na integração de múltiplas linhas de evidências, incluindo observações *in situ* e remotas, informações paleoclimáticas, modelagem climática global e regional, bem como avanços nos métodos de análises e insight (percepções) do crescente campo dos serviços climáticos.

Do ponto de vista pragmático, para concluir que o clima mudou, é necessário averiguar que houve uma mudança perceptível no padrão de variação de longo prazo da variabilidade climática. Os relatórios V e VI do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), publicados em 2014 e 2023, respectivamente, mostram as evidências de variações, estatisticamente significativas, no estado médio do clima de longo prazo.

Para os propósitos pretendidos no presente Capítulo, isto é, entender a relação entre as mudanças climáticas e desastres, ilustramos com o indicador **Rx1day** o aumento das precipitações no Brasil. O **Rx1day** é

calculado considerando-se a precipitação máxima diária (em mm) durante um período de interesse. Na Figura 1 ilustra-se a variação da média anual, calculada para intervalos decadais, do **Rx1day**. As figuras centrais representam a diferença, deste índice, entre as décadas. Uma inspeção simples do mapa de “anomalias” entre as décadas 2011-2020 e 2001-2010 mostra que as precipitações diárias médias foram, majoritariamente, positivas. Certamente esse exemplo tem que ser considerado, também, com cuidado. Do ponto de vista meteorológico, as principais questões na adoção de um índice estão relacionadas à definição de eventos extremos, às mudanças em sua distribuição e sua intensidade (Gimeno et al., 2022). Pandergas (2028) destaca as muitas maneiras para definir precipitação extrema, assim como a escolha da definição afeta a resposta ao aquecimento global. Conforme esta autora, os pesquisadores devem escolher sua definição de precipitação extrema com cuidado e articulá-la claramente, assim como os usuários devem considerar como a precipitação extrema é definida ao interpretar análises de sua mudança com o aquecimento.

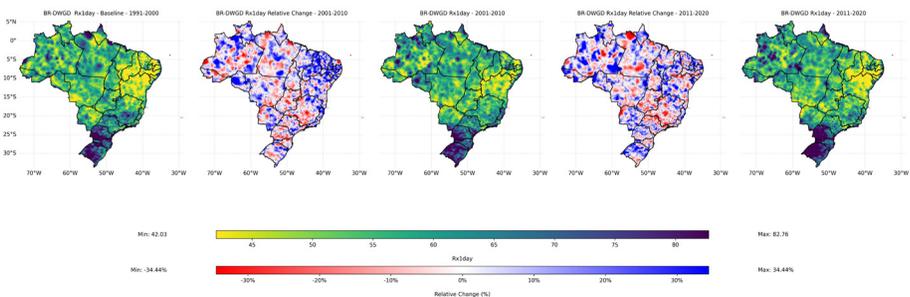


Figura 1: índice Rx1day.. Máxima precipitação diárias (em mm) nas três últimas décadas. As figuras intermediárias é a diferença entre décadas.

Embora no bojo de definição, do ponto de vista meteorológico, do que seja um vento extremo, não resta dúvida de que há critérios objetivos para estabelecer os diversos índices disponíveis. Contudo, para desastres, não há tal equivalência.

Osuteye et al. (2017) avaliaram as limitações e gargalos dos bancos de dados disponíveis. A ocorrência de desastres tem sido cada vez mais documentada e contabilizada em bancos de dados internacionais sobre desastres. O site da Plataforma Global de Informações sobre Riscos

(GRIP) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) disponibiliza uma lista abrangente de bancos de dados sobre desastres classificados como globais, regionais ou nacionais. Este site referencia a disponibilidade de quatro bancos de dados globais sobre desastres: EM-DAT, Número de Identificação Global de Desastres (GLIDE), Projeto de Banco de Dados de Desastres da Universidade de Richmond e NatCatService. Além disso, o Observatório de Inundações de Dartmouth conta com um arquivo com mais de 4.000 grandes eventos de inundação, que podem ser pesquisados por país. Outro banco de dados é o DesInventar, o qual é um catálogo de dados nacionais, que atualmente inclui 89 países e está crescendo em escopo.

Os bancos de dados têm diferentes limites sobre o que consideram ser um evento de desastre. No EM-DAT, para que um evento de desastre seja registrado, ele deve atender a um dos seguintes critérios: ter 10 ou mais mortes, 100 ou mais pessoas afetadas/feridas/desabrigadas, ou declaração do país de estado de emergência e/ou um apelo por assistência internacional (Moraes, 2023b). Enquanto a definição para o banco de dados DesInventar considera uma (1) ou mais perdas humanas ou US\$ 1 ou mais em perdas econômicas. O DesInventar considera como fontes de informações jornais nacionais e locais, relatórios policiais e de saúde pública e inclui como um evento de desastre ocorrências em que houve qualquer tipo de perda humana ou econômica. O EM-DAT é compilado de várias fontes, incluindo a ONU, agências governamentais e não governamentais, companhias de seguros, institutos de pesquisa e agências de notícias, e tem uma ampla gama de outras fontes. Portanto, esses dois bancos de dados podem retratar imagens bastante diferentes de perdas por desastres em um país.

No Brasil, a plataforma oficial de registro de desastres é o S2iD (<https://s2id.mi.gov.br/>). Nesta plataforma são inseridos os registros de desastres e a análise do reconhecimento federal da situação de emergência ou de estado de calamidade pública. No S2iD, o município deve registrar a ocorrência dos eventos e solicitar recursos federais para as ações locais de assistência humanitária e restabelecimento de serviços essenciais quando da ocorrência de desastres. O sistema classifica os desastres em dois grandes grupos: naturais e tecnológicos. O cluster referente aos desastres naturais contém os chamados hidrológicos, que abrange as inundações, enxurradas e alagamentos; os meteorológicos, que contemplam os ciclones, frentes frias, zonas de convergência, tempestades e tempera-

turas extremas; os climatológicos, que incorpora a seca, estiagem, incêndios florestais e baixa umidade do ar; os geológicos, que compreendem os terremotos, movimentos de massa e erosão. E, finalmente, os biológicos, englobando as doenças infecciosas virais, bacterianas, parasíticas, fúngicas e infestações/pragas de animais, de algas e outros tipos. O S2iD registra desastres desde 1991.

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres (ref), que compila os dados do S2iD, entre 1991 e 2020, o Brasil teve 23923 desastres reconhecidos. Ou seja, 23923 decretos municipais de estado de calamidade ou situação de emergência foram reconhecidos. Estes desastres contabilizaram 2297 mortes, afetaram mais de 77 milhões de pessoas e um impacto econômico superior a 300 bilhões de reais. Essa distribuição pode ser detalhada por tipologias e por décadas. Para efeitos de comparação com a figura acima, consideramos os desastres hidrológicos, meteorológicos e geológicos, particularmente os movimentos de massa. Nestes casos, o Atlas contabiliza 8998 desastres que causaram 2153 mortes, que corresponde a 93% das mortes totais, afetaram 51 milhões de pessoas (66% do total) e perdas econômicas superiores a 100 bilhões de reais (aproximadamente 33% do total). Chama a atenção, contudo, que nenhum decreto municipal foi reconhecido antes de 2003.

A Figura 2 apresenta o total decenal de desastres hidrometeorológicos reconhecidos, por região, para as décadas de 2001-2010 e 2011-2020. Na década de 1991-2000 não houve, conforme o S2iD, nenhum reconhecimento de decreto municipal de calamidade pública ou situação de emergência (aqui deve entrar um frase explicativa). Assim, conforme ressaltado, é necessário cautela para atribuir às mudanças climáticas o aumento no número de desastres observados, principalmente por que, conforme o S2iD, na região Nordeste o número de desastres na década de 2011-2020 foi inferior ao número de desastres reconhecidos na década de 2001-2010. Não obstante, o S2iD cumpre o seu propósito, que é de integração de diversos produtos da defesa civil nacional e de qualificar e dar transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil. Por outro lado, essa plataforma passou por reestruturações ao longo dos anos, o que significa que a metodologia para reconhecer os decretos municipais alterou-se com o tempo. Ou seja, não se pode, com rigor científico atestar que os números apresentados nessa figura representam os desastres que, efetivamente, ocorreram no país. Apesar de tais limitações na fonte de dados de desastres não resta dúvida, também, que os desastres causados por

eventos extremos de clima são os responsáveis pela quase totalidade de fatalidades e pela maioria no número de pessoas afetadas.

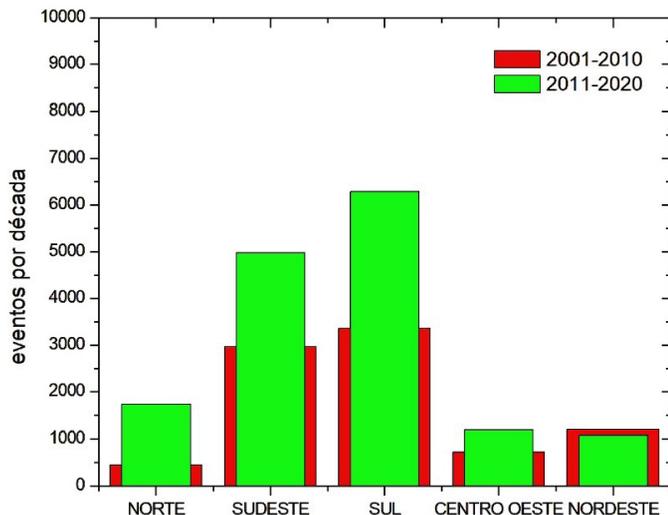


Figura 2: Desastres, por década e por região, no Brasil (fonte: S2iD)

Considerando as especificidades destacadas e as limitações de fontes de dados, avaliar o que se conhece sobre as mudanças climáticas e desastres decorrentes no Brasil é objetivo do presente Capítulo. Portanto, são destacados neste Capítulo (i) o panorama nacional dos desastres geohidrometeorológicos no Brasil; (ii) secas e seus impactos nos diferentes biomas; (iii) os avanços e desafios para a redução de vulnerabilidades a desastres no país; (iv) educação e Redução de Riscos de Desastres com Justiça Climática.

DESASTRES GEO-HIDROMETEOROLÓGICOS

Introdução conceitual e marco científico

O termo “geo-hidrometeorológico” utilizado neste Capítulo é formado pela união de três elementos que representam os domínios naturais dos fenômenos naturais que podem originar os desastres tratados neste tópico:

- Geo-, derivado de “geológico” (do grego gê, “Terra”), referindo-se a processos relacionados ao solo, rochas, relevo e movimentos gravitacionais de massa (ex.: deslizamentos, escorregamentos).
- Hidro-, derivado de hidrológico (do grego hydor, “água”), relacionado à dinâmica da água em superfície ou subsolo (ex.: enchentes, inundações, enxurradas).
- Meteorológico, referente a processos atmosféricos que atuam como gatilhos ou condicionantes dos fenômenos acima, especialmente as chuvas.

Assim, o termo busca integrar, de forma sintética, a natureza multi-causal e interdependente desses eventos, que não pertencem exclusivamente a um único domínio físico, mas resultam da interação entre condições geológicas, hidrológicas e meteorológicas. No contexto brasileiro, a definição utilizada neste Capítulo inclui eventos como inundações, alagamentos, enxurradas, deslizamentos de terra e outros movimentos de massa deflagrados por chuvas intensas e/ou volumosas.

Ao contrário da ideia de que se trata de ocorrências puramente naturais, é importante compreender que o caráter catastrófico que estes eventos podem atingir depende, fundamentalmente, das vulnerabilidades humanas e territoriais envolvidas. Assim, ainda que o excesso de chuva seja o fator desencadeante tratado neste Capítulo, os danos e prejuízos são amplificados por processos antrópicos, como a urbanização desordenada, a ocupação de encostas e margens de rios, deficiências na infraestrutura urbana, precariedade habitacional e ausência de políticas eficazes de planejamento e gestão do território. Portanto, este tópico analisa os desastres de origem geo-hidrometeorológica e como se manifestam no território brasileiro, destacando suas particularidades e principais condicionantes perante a diversidade regional do país, sob a luz das evidências científicas que ajudam a compreender o que transforma um evento natural e um desastre socioambiental.

Panorama nacional e evidências observacionais

Entre 1991 e 2024, os desastres geo-hidrometeorológicos corresponderam a pouco mais de um terço (38,5%) de todos os eventos registra-

dos no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD)⁵⁰. Apesar de não constituírem a maioria absoluta dos registros, esses eventos foram responsáveis pela maior parte dos impactos humanos no período, concentrando 83,5% das mortes notificadas (4.549 de um total de 5.448) e 91% das pessoas desalojadas e desabrigadas (9,81 milhões em um total de 10,77 milhões). Esses números evidenciam que, embora relativamente menos frequentes do que outras tipologias de desastres, como as secas, os desastres geo-hidrometeorológicos se destacam pela magnitude das consequências sociais e humanitárias que provocam, muitas vezes de forma intensiva.

Os dados mencionados anteriormente revelam o alto potencial de letalidade e destruição desses eventos, sobretudo quando atingem áreas urbanas caracterizadas por múltiplas dimensões de vulnerabilidade, como a fragilidade e insuficiência das infraestruturas, a ocupação irregular em encostas e áreas de várzea, em grande parte decorrente da ausência de planejamento territorial e propulsão pela grande desigualdade social. Os desastres de origem geológica, em que se destacam os deslizamentos de terra são exemplo emblemático: bem menos frequentes que outros tipos de desastres, figuram entre os mais letais, em especial quando ocorrem em áreas densamente povoadas em encostas suscetíveis ou em suas proximidades imediatas. A tragédia de Petrópolis, em 15 de fevereiro de 2022, ilustra bem essa dinâmica: um episódio de chuva extrema, altamente concentrada no tempo e no espaço, desencadeou 269 deslizamentos de terra (Alcântara et al., 2023), mas um único grande deslizamento no Morro da Oficina destruiu dezenas de residências e foi responsável pela maior parte das 231 mortes registradas neste evento.

Por outro lado, os desastres de origem hidrológica, como inundações, enxurradas e alagamentos, apresentam elevada recorrência, com 13.324 registros (28,7% de todos os desastres reportados ao S2iD entre

50 As informações do S2iD foram acessadas por meio do Atlas Digital de Desastres, considerando, para este tópico, os registros classificados como “hidrológicos”. Essa categoria reúne ocorrências reportadas como alagamentos, enxurradas, inundações, movimentos de massa e chuvas intensas. Cabe destacar que “chuvas intensas” não configuram, no sentido estrito, uma ameaça independente, pois atuam como fator desencadeante dos demais fenômenos mencionados. Pode-se dizer que a presença dessa classificação nos registros oficiais sugere a ocorrência de desastres complexos em que várias tipologias de ameaças naturais ocorreram ao mesmo tempo, ou reflete a incerteza do agente declaratório quanto à caracterização do evento.

2001-2020), afetando praticamente todos os municípios brasileiros em alguma magnitude. Esses eventos são os principais responsáveis por desalojar e desabrigar as populações atingidas, provocando também impactos significativos sobre a infraestrutura urbana, mobilidade, saúde pública e a economia local. Tomando apenas as inundações como exemplo, elas representam 10% de todos os desastres registrados no S2iD no mesmo período (4.822 de um total de 46.423), mas foram responsáveis por 45,2% de todas as pessoas desalojadas e desabrigadas (3,28 milhões de um total de 7,25 milhões), além de terem causado 23% dos prejuízos materiais totais (R\$ 24,8 bilhões de um total de R\$ 107,8 bilhões), considerando perdas públicas e privadas. Esses números destacam que, mesmo quando não resultam em óbitos, os eventos hidrológicos têm um efeito devastador sobre as condições de vida das populações afetadas.

Após esta primeira contextualização dos tipos de desastres geo-hidrometeorológicos que ocorrem no Brasil, é mandatório compreender que a frequência e a gravidade destes desastres apresentam forte desigualdade territorial, seja em termos de quantidade ou impactos acumulados ao longo do tempo, com concentração mais expressiva na porção leste das regiões Sudeste, Sul e Nordeste. Uma análise superficial poderia sugerir que a explicação para essa concentração se limita às condições climáticas dessas regiões, caracterizadas por maior ocorrência de chuvas intensas e volumosas em determinados períodos do ano, especialmente pela proximidade do Oceano Atlântico e por serem regiões de passagens de frentes frias que se chocam com grandes massas de ar quente. Embora o fator climático seja parte do problema, ele não é suficiente para explicar a distribuição espacial destes desastres. Ao analisar municípios muito próximos e com clima praticamente idênticos, observa-se que nem todos possuem histórico expressivo de desastres. A presença de elementos físicos, como relevo acidentado ou extensas planícies inundáveis, tampouco oferece uma explicação completa, já que existem áreas com essas características que também apresentam menor incidência de desastres historicamente.

Portanto, é na análise em escala local que se revelam os elementos decisivos para a ocorrência e a magnitude dos desastres, frutos da combinação entre ameaças naturais e vulnerabilidades sociais e estruturais. O crescimento urbano desordenado, a impermeabilização extensiva do solo, a ocupação de “áreas de risco” sem infraestrutura adequada de drenagem ou de contenção e a carência de políticas habitacionais e de

prevenção são fatores determinantes para transformar um evento natural extremo em um desastre de grandes proporções. Neste sentido, os próximos tópicos desta sessão buscarão detalhar as principais características explicativas para compreender os principais *hotspots* de desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil, destacando o papel das vulnerabilidades como elemento central na produção do risco.

Cenários de risco regionais dos desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil

O risco de desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil apresenta significativa variabilidade regional, condicionada por fatores climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e, principalmente, socioespaciais. A seguir, são destacados os principais cenários de risco por região e por tipologia de desastre, bem como as evidências sobre os efeitos das mudanças climáticas.

Região Sudeste: aprofundamento conceitual e metodológico para elucidar a complexidades do risco de desastres geo-hidrometeorológicos

A Região Sudeste concentra aproximadamente 40% da população brasileira e registra o maior número de desastres geo-hidrometeorológicos do país (Avila et al., 2016; Saito et al., 2018) com predominância de deslizamentos de terra e enxurradas como os mais destrutivos e letais. Em razão dessa relevância, os cenários de risco nesta região serão analisados de forma mais aprofundada. Embora haja especificidades nos fatores condicionantes e desencadeadores dos desastres geo-hidrometeorológicos nesta região, as reflexões e análises desenvolvidas para o Sudeste constituem referência conceitual e metodológica para o entendimento das demais, cuja caracterização será apresentada de forma sintética.

O crescimento urbano acelerado e, em grande parte, desordenado, associado à ausência ou insuficiência de planejamento territorial, resultou na expansão de muitos assentamentos precários em áreas de alta suscetibilidade geo-hidrometeorológica (Alves et al., 2023; Hirye et al. 2023). Nesses locais, a impermeabilização extensa do solo e a deficiência dos sistemas de micro e macrodrenagem comprometem a infiltração e o escoamento das águas pluviais (Altafini et al., 2023). Isso provoca

acúmulo e concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais que, ao atingir encostas íngremes, promovem sua instabilidade e podem desencadear deslizamentos de terra, especialmente em solos coluvionares típicos dos domínios da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira (Oliveira et al., 2021; Vieira et al., 2016). Esses mesmos fatores (impermeabilização excessiva, drenagem precária e relevo acidentado) também favorecem a ocorrência de enxurradas intensas, particularmente em áreas urbanas densamente ocupadas. Nessas condições, o fluxo descontrolado da água provoca danos rápidos e localizados, muitas vezes ocorrendo de forma simultânea aos deslizamentos, o que amplifica significativamente os impactos dos eventos.

Cidades situadas em terrenos acidentados dessas cadeias montanhosas e de áreas serranas adjacentes, como Petrópolis (RJ), Angra dos Reis (RJ), Santos (SP), Campos do Jordão (SP) e diversos municípios da Zona da Mata Mineira e da Zona Serrana do Espírito Santo, apresentam elevado risco geo-hidrometeorológico, comprovado por seus históricos de grandes desastres (Bonini et al., 2021; Alcântara et al., 2023; Souza et al., 2023). Além disso, o Sudeste se destaca pelas regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro, Vitória e Belo Horizonte que enfrentam riscos agravados pelo adensamento populacional que aumenta a exposição humana em áreas de risco (Saito et al., 2018), sobretudo em decorrência das desigualdades socioespaciais e da ocupação de áreas suscetíveis, que ocorre majoritariamente por comunidades vulneráveis. Alterações antrópicas, como cortes irregulares de encostas, aterros mal executados e o lançamento de esgoto ou águas pluviais em áreas de declive e canais naturais, aumentam substancialmente a vulnerabilidade ambiental e, por consequência, o risco de desastres.

Do ponto de vista climático, os principais mecanismos associados às chuvas intensas no Sudeste incluem sistemas convectivos de mesoescala (Siqueira & Marques, 2016), frentes frias, o efeito orográfico das montanhas costeiras, jatos de baixos níveis (Santana et al., 2013) e o transporte de umidade amazônica. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) constitui o segundo sistema mais importante, responsável por 47% dos episódios de precipitação intensa no verão austral na região, sendo superada apenas pelas frentes frias (53%) (Lima et al., 2010). Segundo estudos conduzidos por Aguiar e Cataldi (2021), a probabilidade média de ocorrência de desastres, dada a presença da ZCAS no Sudeste brasileiro, é de 24%, enquanto a probabilidade condicional de ocorrência da ZCAS,

dado um desastre no Sudeste, é de 48%, em que se enquadra o grande desastre da Região Serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, quando as chuvas intensas foram geradas pelo deslocamento de uma frente fria que se acoplou à Zona de Convergência de Umidade, organizando a ZCAS (Aires et al., 2020).

Em muitos casos, a combinação dos diferentes sistemas e fatores climáticos previamente mencionados pode ocorrer simultaneamente e estabelecer cenários ainda mais extremos, como o desastre ocorrido em São Sebastião em fevereiro de 2023, quando a convergência de uma intensa frente fria, área de baixa pressão, aporte de umidade oceânica intensificado pelo aquecimento do mar e o efeito orográfico da Serra do Mar culminaram na chuva mais volumosa registrada no Brasil em apenas 12 horas, com acumulado de 683 mm que causaram deslizamentos generalizados e levaram 64 pessoas a óbito (G1, 2023; Marengo et al. 2024).

Este último desastre acima mencionado, em particular, sintetiza de forma clara a principal mensagem que se deseja destacar neste tópico. Embora o evento extremo meteorológico que culminou no desastre em São Sebastião tenha registrado seu maior índice pluviométrico no município vizinho de Bertioga, os impactos neste último município foram de menor magnitude e não resultaram em óbitos. Pode-se dizer que volumes extremos de precipitação atingiram toda a faixa litorânea entre os dois municípios (superiores à 500 mm); contudo, os impactos mais severos concentraram-se em bairros específicos de São Sebastião, especialmente na Vila do Sahy. Nessa localidade, vulnerabilidades socioambientais preexistentes e elevado grau de exposição potencializaram as consequências do evento.

Na costa norte de Bertioga, predominam condomínios de médio e alto padrão, implantados majoritariamente em planícies costeiras com boa drenagem natural e infraestrutura adequada. Já na costa sul de São Sebastião observa-se um contraste marcante: enquanto as áreas litorâneas mais valorizadas, com menor suscetibilidade a desastres, são ocupadas por residências e condomínios de alto padrão e beneficiadas por melhor infraestrutura nos seus entornos, o setor situado do outro lado da rodovia BR-101 abriga comunidades mais vulneráveis, com infraestrutura deficiente e localizadas em áreas de alta suscetibilidade a deslizamentos de terra, enxurradas, alagamentos e inundações de pequenos cursos d'água. Ainda sobre este desastre, fica uma última reflexão: Bastos Moroz & Thieken (2024) mostram que a ocupação/exposição urbana ocorrida

nas últimas duas décadas explica, pelo menos, 46% dos danos físicos e humanos ocorridos em São Sebastião, os quais poderiam ter sido evitados por políticas de ordenamento territorial e contenção da expansão urbana em áreas suscetíveis.

Em síntese, ressaltam-se novamente: eventos extremos de precipitação não são, por si só, os principais responsáveis pelos desastres geo-hidrometeorológicos. Embora funcionem como gatilhos dos fenômenos geo-hidrometeorológicos, os desastres resultam de um processo histórico de construção do risco, condicionado por desigualdades socioeconômicas, degradação ambiental e padrões de ocupação do território. Assim, quando esses eventos ocorrem, apenas evidenciam e amplificam vulnerabilidades e problemas estruturais preexistentes, convertendo os riscos em impactos concretos. Essa constatação torna-se ainda mais preocupante diante das evidências de aumento na frequência e intensidade desses eventos nas últimas décadas, associadas às mudanças climáticas e à variabilidade natural do clima (IPCC, 2022; Marengo et al., 2020), que trataremos adiante, e que podem se materializar em impactos de grandes proporções se ações de redução do risco de desastres (RRD) e adaptação não forem adotadas urgentemente.

Mudanças Climáticas e desastres geo-hidrometeorológicos no Sudeste

Antes de abordar diretamente sobre as mudanças climáticas, faz-se premente esclarecer que a relação entre o aquecimento global e a intensificação das chuvas extremas está fundamentada em um princípio termodinâmico amplamente reconhecido, descrito pela relação de Clausius-Clapeyron. De forma simplificada, esse princípio estabelece que, para cada aumento de aproximadamente 1°C na temperatura do ar, a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água cresce em torno de 7% (Trenberth et al., 2003; Allan & Soden, 2008). Esse acréscimo na capacidade de armazenamento de umidade implica que, em um clima mais quente, a atmosfera dispõe de maior quantidade de “combustível” para a formação de nuvens profundas e sistemas precipitantes. No entanto essa umidade extra não se traduz necessariamente em mais dias de chuva ao longo do ano, mas sim em eventos de chuva mais concentrados e intensos (Donat et al., 2016; Pendergrass & Knutti, 2018). É exatamente essa característica que eleva o risco de desastres geo-hidrometeorológicos.

Sobre este aspecto, há evidências robustas demonstrando que eventos de precipitação extrema estão se intensificando no Sudeste brasileiro, compatíveis com o aquecimento planetário observado no mesmo período, onde se destaca a tendência de aumento da precipitação máxima diária e de dias extremamente úmidos, particularmente no estado do Rio de Janeiro, onde a média dos eventos extremos diários aumentou até 5 mm/década (Luiz-Silva & Oscar-Júnior, 2022). Com base nos resultados recentes de Orlandi Simões et al. (2025), algumas áreas do Sudeste também apresentam sinais consistentes de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, especialmente durante o verão, implicando na redução no tempo de retorno estimado, como porções do Espírito Santo, do sul-central do Rio de Janeiro (incluindo a Região Serrana) e de áreas localizadas no norte e centro de Minas Gerais, onde as tendências positivas nos índices de extremos pluviométricos sugerem maior probabilidade de ocorrência de episódios severos no futuro próximo. Nesta mesma linha, o estudo conduzido por Ávila et al. (2016) avaliou dados observados entre 1978-2014 e evidenciou tendências estatisticamente significativas do aumento de eventos extremos de chuva nos domínios da Serra do Mar no estado do Rio de Janeiro.

Há de se ressaltar que, além destas tendências já evidenciadas no passado, estudos recentes, utilizando dados de modelagem climática e análise de risco, indicam que o Sudeste brasileiro poderá ser ainda mais impactado por eventos de origem geo-hidrometeorológica em decorrência da continuidade do aquecimento global. Nestes estudos, é praticamente consenso a tendência de aumento da frequência e magnitude dos eventos de chuvas extremas concentrados em 1 e 5 dias (Camarinha, 2016; Debortoli et al., 2016; Luiz-Silva & Oscar-Júnior, 2022; Santos, 2022); especialmente em cenários em que o aquecimento global supere 2°C (Marengo et al., 2021; Debortoli et al 2016; Brasil, 2016; Marengo et al., 2021; Santos, 2022; Brasil, 2020).

Apesar das evidências anteriormente apresentadas, seja para o Sudeste brasileiro ou qualquer outra região, ainda há debate sobre o papel específico das mudanças climáticas antropogênicas na ocorrência de eventos individuais, dada a complexidade de isolar a contribuição antrópica frente à variabilidade natural e a outros fatores meteorológicos regionais ou locais (Stott et al., 2016). Neste sentido, os “estudos de atribuição” têm se consolidado como ferramenta fundamental para reduzir essas incertezas, comparando, por meio de modelagem climática, a pro-

babilidade ou intensidade de um evento no clima atual (com o forçamento radiativo induzido por atividades humanas, especificamente as emissões de gases de efeito estufa) e em um cenário contrafactual sem esse forçamento (Vincent et al., 2020). Embora a atribuição de causalidade absoluta a um evento individual seja inviável, essa abordagem permite estimar como o aquecimento global altera a probabilidade e severidade de extremos (World Weather Attribution, 2023), fornecendo subsídios essenciais para avaliar a amplificação de impactos e orientar políticas de adaptação e gestão de riscos.

Para concluir esta seção, com o Sudeste brasileiro tendo sido priorizado como estudo de caso e seguirmos para análises sucintas das demais regiões, apresentam-se evidências científicas recentes que elucidam a relação entre mudanças climáticas e desastres geo-hidrometeorológicos de grande impacto. Um exemplo emblemático é o evento extremo ocorrido em Minas Gerais, em janeiro de 2020, caracterizado por precipitações recordes que resultaram em 56 óbitos e prejuízos estimados em R\$ 1,3 bilhão. Segundo análise de atribuição conduzida por Dalagnol (2021), aproximadamente 41% desses impactos podem ser associados ao aquecimento global induzido por atividades humanas, evidenciando a influência antrópica na intensificação de extremos pluviométricos e na amplificação de suas consequências socioeconômicas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2023) no estudo do desastre ocorrido na Baixada Santista (SP), em março de 2020, desencadeado por acumulados pluviométricos de até 350 mm em 48 horas, volumes suficientes para deflagrar enxurradas, alagamentos e, principalmente, deslizamentos de terra generalizados que ocasionaram 44 mortes, afetaram cerca de 2.800 pessoas e geraram prejuízos superiores a US\$ 43 milhões. As análises de atribuição indicaram que, no contexto dos atuais níveis de aquecimento, chuvas dessa magnitude tornaram-se 46% mais prováveis, e que entre 20% e 42% dos impactos observados podem ser atribuídos às mudanças climáticas antropogênicas.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Sul e mudanças climáticas associadas

A Região Sul do Brasil, caracterizada por seu clima subtropical e topografia diversificada, tem experimentado uma intensificação significativa de eventos extremos nas últimas décadas, com destaque os grandes

desastres ocorridos no Vale do Itajaí (2008) e no Rio Grande do Sul em 2023 (Alvalá et al., 2024) e, especialmente, abril-maio de 2024, considerado o desastre mais devastador enfrentado pela região, que afetou mais de 2.3 milhões de pessoas e resultando em 184 mortes e 42 desaparecidos (Reboita et al., 2024; Marengo et al., 2024). Este tópico examina os padrões de inundações, deslizamentos e suas relações com fatores ambientais, socioespaciais e com as mudanças climáticas, fornecendo uma base científica fundamentada para compreender a relação destes fenômenos com as ocorrências de desastres, especialmente nas últimas décadas.

A Região Sul do Brasil apresenta características geomorfológicas intrínsecas que amplificam significativamente a exposição a desastres relacionados ao clima por ser uma região bastante povoada. O relevo acidentado, caracterizado por planícies aluviais extensas intercaladas com áreas de planalto e serras, cria condições naturais propícias tanto para inundações quanto deslizamentos de terra (Marth et al., 2016). As declividades acentuadas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense, associadas a solos de estrutura sedimentar facilmente erodidos pela ação climática e antropogênica, criam cenários de alta instabilidade geotécnica (Barbosa, 2015). As planícies de inundação dos rios Taquari-Antas, Uruguai e Iguaçu, caracterizadas por baixas declividades e solos aluviais, são naturalmente sujeitas a inundações periódicas. Entretanto, a amplitude do relevo à jusante, a declividade das planícies e as intervenções antropogênicas diretas e indiretas tornaram-se fatores determinantes para a intensificação da suscetibilidade aos desastres, particularmente quando submetidos aos eventos intensos de chuvas que rapidamente promovem elevado escoamento superficial.

O processo de urbanização na Região Sul tem sido caracterizado pela ocupação sistemática de áreas consideradas inadequadas, incluindo vertentes de altas declividades, fundos de vales e planícies de inundação (Beltramin & Morais, 2024). A ausência de planejamento territorial adequado tem resultado na concentração de população em áreas de alta fragilidade ambiental e sujeitas à impactos de origem geo-hidrológica. Em Blumenau (SC), por exemplo, observa-se que populações de baixa renda são sistematicamente direcionadas para áreas de maior risco, incluindo margens de rios, encostas instáveis e áreas sujeitas a alagamentos, situação que amplifica exponencialmente suas vulnerabilidades (Souza et al., 2021).

Os ajustes fluviais decorrentes de canalizações inadequadas e gestão imprópria da drenagem urbana têm modificado significativamente os padrões de escoamento, criando novos focos de risco em áreas anteriormente estáveis (Beltramin & Morais, 2024). A retificação de cursos d'água sem consideração dos processos geomorfológicos naturais também tem resultado em erosão acelerada e instabilização de margens, o que acelera o processo de assoreamento de rios e córregos, aumentando a suscetibilidade às inundações. Junto a estes fatores, a degradação ambiental tem contribuído significativamente para o aumento do risco de desastres geo-hidrometeorológicos. A remoção da cobertura vegetal nativa, especialmente em encostas e áreas de preservação permanente, tem resultado na perda de estabilidade geotécnica e no aumento da erosão superficial (Silva et al., 2022), além de também acelerar os processos erosivos mencionados anteriormente.

A conversão de áreas florestais para usos agrícola e urbano também tem alterado significativamente os padrões de infiltração e escoamento superficial, de modo que estudos em algumas bacias hidrográficas da região Sul demonstram correlação direta entre a perda de cobertura florestal e o aumento da frequência e intensidade de inundações e deslizamentos (Canil et al., 2020). Além destes fatores, as modificações antropogênicas nos sistemas hídricos regionais incluem retificação de canais, construção de diques, aterramento de várzeas e alteração de padrões de drenagem natural (Beltramin & Morais, 2024). Estas intervenções têm resultado em alterações nos regimes de vazão, modificação de padrões de sedimentação e criação de novos pontos de instabilidade geomorfológica.

Desta forma, estes fatores de vulnerabilidade e elevada exposição se demonstram como ingredientes que favorecem a ocorrência de desastres quando eventos de chuvas volumosas e intensas se concretizam. Do ponto de vista climático, a Região Sul é caracterizada por um clima subtropical justamente marcado por episódios frequentes de chuvas persistentes e volumosas, os quais contribuem para a saturação do solo e a deflagração de eventos geo-hidrológicos extremos (Oliveira et al., 2019).

Os principais sistemas meteorológicos associados a desastres geo-hidrometeorológicos são, em geral, de escala sinótica, destacando-se os sistemas frontais, ciclones extratropicais, jatos de baixos níveis, ZCAS e os anticiclones subtropicais do Atlântico Sul e do Pacífico (Pugas et al., 2024). Sistemas oceânicos também exercem influência relevante, entre eles a Corrente do Brasil e a Corrente das Malvinas (Stramma et al., 1990),

bem como variabilidades de baixa frequência, como a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação Sul associada ao fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS). Este último apresenta papel destacado na variabilidade climática regional, uma vez que as fases El Niño e La Niña modulam significativamente a distribuição espacial e a intensidade das precipitações, além da frequência de eventos extremos (Fernandes & Rodrigues, 2018), sendo que eventos El Niño têm forte correlação com a ocorrência de deslizamentos de terra na região (Emberson et al., 2021). Tal modulação está associada, em parte, à influência exercida sobre a circulação atmosférica regional, especialmente na variabilidade e intensidade dos jatos de baixo nível, responsáveis pelo transporte de umidade para a região. Inclusive, nos estudos conduzidos após o grande desastre de 2024, evidenciou-se que eventos de El Niño têm aumentado de 2 a 5 vezes a probabilidade e de 3% a 10% a intensidade das chuvas extremas no Sul do Brasil, enquanto as mudanças climáticas induzidas pelo homem dobraram sua frequência e elevaram a intensidade em até 9%, amplificando o risco geo-hidrológico na região. (Clark et al., 2024).

A respeito das mudanças climáticas observadas mais relevantes, dados pluviométricos de 1961 a 2020 evidenciam aumento significativo na intensidade e na frequência de eventos extremos na Região Sul do Brasil (Martini, 2022; Fernandes & Rodrigues, 2018). Em estudo mais recente, Dunn et al. (2024) evidenciaram que a Região Sul do Brasil apresenta uma tendência consistente de aumento nos extremos de precipitação desde 1950. Utilizando dados observacionais e de reanálise para o período de 1950 a 2018, os autores analisaram diversos indicadores de eventos extremos de chuvas, identificando a região como uma das áreas com maiores extensões contíguas no mundo apresentando elevação sistemática, por década, tanto na frequência quanto na magnitude desses eventos.

Projeções climáticas para as próximas décadas indicam que essa será a região mais crítica do país quanto à intensificação de extremos de precipitação, com elevada confiabilidade devido à convergência entre diferentes modelos climáticos (Pillar & Overbeck, 2024; Gomes et al., 2022; Marengo et al., 2021). A Terceira Comunicação Nacional às Mudanças Climáticas (Brasil, 2016) já havia identificado esse elevado risco climático, destacando a vulnerabilidade a desastres geo-hidrológicos e projetando agravamento nas décadas seguintes com o avanço do aquecimento global (Camarinha et al. 2016, Debortoli et al. 2016; Debortoli et al. 2017). Essas conclusões foram reiteradas pela Quarta Comunicação Nacional do

Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Brasil, 2020) e corroboradas por estudos posteriores, como de Marengo et al. (2021), que mantêm a consistência no diagnóstico e prognóstico sobre a criticidade regional. Além disso, as projeções apontam aumento da variabilidade interanual, com alternância de períodos mais severos de secas e de chuvas extremas, intensificando o risco de inundações e movimentos de massa (Gomes et al., 2022; Martini, 2022).

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Nordeste e mudanças climáticas associadas

Embora geralmente associada à seca, a Região Nordeste apresenta cenários significativos de riscos para desastres induzidos por chuvas, especialmente nas faixas litorâneas e em áreas de clima tropical úmido. Capitais, como Recife (PE), Salvador (BA), Maceió (AL) e Fortaleza (CE) e cidades vizinhas que compõem suas regiões metropolitanas enfrentam episódios recorrentes de alagamentos urbanos causados pela combinação de marés elevadas, falhas de drenagem e chuvas intensas concentradas em curtos períodos. Essas cidades também apresentam riscos de deslizamentos em áreas densamente povoadas, situadas em morros e encostas costeiras com solos altamente suscetíveis à instabilização que são amplificados pelas alterações humanas durante sua ocupação, muitas vezes de forma irregular. A vulnerabilidade urbana, marcada por desigualdade social e infraestrutura deficiente, amplifica os efeitos desses eventos mesmo quando sua magnitude não é extrema.

Um dado de extrema importância para o entendimento dos desastres geo-hidrometeorológicos se refere à elevada exposição da população, especialmente nas regiões metropolitanas. Saito et al. (2018) identificaram que a região Nordeste concentra cerca de 15% da população brasileira residente em áreas de risco reconhecidas, totalizando mais de 2,7 milhões de pessoas, com alta concentração nas regiões metropolitanas de Salvador (BA), Recife (PE), Fortaleza (CE) e no leste alagoano, marcadas por elevada vulnerabilidade social. Em termos absolutos, a região Sudeste apresenta o maior contingente populacional exposto a riscos geo-hidrológicos; entretanto, na região Nordeste, aproximadamente 15 em cada 100 habitantes vive em áreas suscetíveis a deslizamentos ou inundações. Ademais, outras cidades nordestinas também demonstram padrões similares, onde a alta densidade populacional em ocupações ir-

regulares, desprovidas de infraestrutura adequada, intensifica a suscetibilidade a deslizamentos de terra, conforme observado por Almeida et al. (2014) no município de São Luís (MA).

Dentre os principais condicionantes naturais dos desastres mais relevantes na Região Nordeste, destaca-se a Formação Barreiras, uma formação geológica amplamente distribuída no litoral do Nordeste brasileiro, caracterizada por depósitos sedimentares arenosos e argilosos pouco consolidados (Arai, 2006). Sua baixa coesão e alta permeabilidade, aliadas à presença de declividades acentuadas e à atuação de regimes pluviométricos intensos em algumas épocas do ano, refletem em uma elevada suscetibilidade à instabilidade de taludes que recorrentemente causam deslizamentos de terra. Esse quadro é agravado pela ocupação urbana desordenada e pela ausência de sistemas adequados de drenagem superficial, fatores que favorecem a infiltração e a elevação da pressão neutra nos solos. Municípios como Salvador e Lauro de Freitas (BA), Recife e Jaboatão dos Guararapes (PE) e Natal (RN) apresentam histórico recorrente de eventos desse tipo, com registros de desastres significativos relacionados a períodos de chuvas intensas, relacionados, de um modo geral, à ocupação antrópica desordenada associada à Formação Barreiras (Coutinho & Silva, 2005).

Do ponto de vista climático, o Nordeste brasileiro está sujeito a um complexo sistema de fatores climáticos e meteorológicos que potencializam a ocorrência de desastres geo-hidrometeorológicos. As Ondas de Leste constituem o principal mecanismo atmosférico, sendo responsáveis por 50% dos episódios de chuva intensa e 60% do volume de precipitação no leste da região (Seigerman et al., 2024). Esses sistemas costumam ter duração de 3-8 dias, interagem com Sistemas Convectivos de Mesoescala que se propagam sobre o Atlântico Sul-equatorial, intensificando a atividade convectiva próxima ao litoral brasileiro (Seigerman et al., 2024), atingindo principalmente os municípios costeiros da faixa leste do Nordeste, justamente onde se concentra a maior parte da população.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também exerce influência determinante na precipitação interanual e interdecadal, especialmente nas regiões do Agreste, Sertão e Meio-Norte (dos Santos et al., 2023), porém menos relevante para explicar os principais desastres históricos. As condições oceânicas, particularmente as anomalias positivas de temperatura da superfície do mar sobre o Atlântico Sul-equatorial e a intensificação dos ventos alísios, favorecem o transporte excessivo de umidade

da África Ocidental para a América do Sul, contribuindo para eventos extremos (Seigerman et al., 2024).

Estudos recentes com modelos de projeção climática indicam que as mudanças climáticas no Nordeste brasileiro tendem a intensificar a variabilidade das precipitações extremas, com estimativas de aumento de até 140% no número de dias com chuvas intensas, acompanhadas de redução de até 15% nos dias secos, elevando os riscos geo-hidrológicos na região (Medeiros & Oliveira, 2023). Esse aumento é mais evidente em cenários de aquecimento global moderado e intermediário, considerados os mais prováveis nas próximas décadas. Em contrapartida, sob um cenário extremo de aquecimento de 4°C, a tendência é para um clima mais seco, com diminuição na frequência de eventos de chuvas intensas. No entanto, em relação à magnitude dos eventos extremos de precipitação, observa-se um aumento mais expressivo conforme a intensidade do aquecimento global cresce (Marengo et al, 2021; dos Santos et al., 2020), especialmente na faixa litorânea do extremo leste do Nordeste, entre Pernambuco e Natal, durante os meses de verão (dos Santos et al., 2020).

No entanto, diferentemente das Regiões Sul e Sudeste tratadas anteriormente, as evidências sobre as mudanças climáticas no Nordeste, tanto nas condições atuais quanto nas projeções futuras, apresentam maior grau de incertezas. No estudo de Avila-Diaz et al. (2020), por exemplo, observa-se que o sinal predominante na faixa leste da região indica redução no total anual de precipitação e nos eventos de chuvas de menor intensidade, concomitante a um aumento na frequência de dias com precipitação extrema, embora sem evidências conclusivas quanto à intensificação ou atenuação da magnitude destes eventos.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Norte e mudanças climáticas associadas

Na Região Norte, os desastres geo-hidrometeorológicos são dominados por inundações sazonais prolongadas associadas ao pulso de cheia dos grandes rios Amazônicos (ex.: Amazonas, Solimões, Madeira, Acre), cujo padrão hidrológico é governado por variações pluviométricas em bacias de larga escala e pela propagação da onda de cheia ao longo do canal principal. Essas cheias de longa duração causam inundação de várzeas e paleovárzeas, inundam áreas de produção e assentamentos ribeirinhos, e perturbam infraestruturas de transportes e serviços urba-

nos por semanas a meses, ampliando riscos sanitários, logísticos e socioeconômicos nas cidades de Manaus, Porto Velho, Rio Branco e Santarém (Pinel et al., 2019). Estudos observacionais e de reanálise recentes mostram que os episódios extremos de inundação na bacia amazônica aumentaram em frequência e duração nas últimas décadas, em parte decorrentes de mudanças na circulação atmosférica tropical e de alterações no balanço entre precipitação e escoamento, o que tem elevado a exposição das populações ribeirinhas e urbanas (Barichivich et al., 2018; Pinel et al., 2019).

Além das inundações de planície, processos erosivos e deslizamentos de terra localizados em áreas de margens de rios são processos relevantes e muitas vezes vinculados à dinâmica fluvial. A erosão de margem pode levar ao solapamento das margens, e a migração de meandros promovem perda abrupta de resistência do solo, gerando o fenômeno conhecido localmente como “terras caídas”, especialmente quando a coesão do solo é reduzida por saturação prolongada ou por alívio de tensões durante períodos de estiagens.

Nas áreas urbanas amazônicas, como Manaus, o risco associado aos deslizamentos de terra é amplificado por fatores antrópicos, mesmo em regiões com moderada suscetibilidade natural. Cortes irregulares de taludes, aterros mal executados, perda de cobertura vegetal e deficiência nos sistemas de drenagem alteram as condições geomorfológicas e hidrológicas locais favorecendo a ocorrência de escorregamentos mesmo em eventos pluviométricos de intensidade moderada (Ramos et al., 2019).

Quanto às mudanças climáticas e sua relação com os desastres geo-hidrometeorológicos mais relevantes na região, tem-se evidências de que o aquecimento substancial do Atlântico tropical, desde a década de 1990, tem sido um fator central na intensificação do ciclo hidrológico na Amazônia. Esse aquecimento aumenta o vapor de água atmosférico, que é transportado pelos ventos alísios para a bacia do norte da Amazônia, elevando a precipitação e a vazão, especialmente durante a estação chuvosa (Gloor et al. 2013; Barichivich et al. 2018; Wang et al. 2018). Marengo et al. (2024) evidenciam que estas alterações se refletiram em um aumento de cinco vezes nos eventos de inundações severas na Amazônia central nas últimas décadas (período entre 2001 e 2021), com a duração total em Manaus sendo 20% maior do que aquela durante o século XX inteiro. As tendências de precipitação variam entre o norte e o sul da Amazônia, com

o norte experimentando aumento da atividade convectiva e da chuva, em contraste com a diminuição na porção sul.

Um estudo conduzido por Pinho et al. (2024) destaca muito bem o impacto socioeconômico associado a estas mudanças climáticas, ainda que parcialmente. Entre 2006 e 2010, foi registrada uma média anual de aproximadamente 540 mil pessoas afetadas por eventos hidrológicos na região. No período mais recente, de 2018 a 2022, o número saltou para cerca de 1,78 milhão de pessoas por ano, representando um aumento de 229%. No mesmo intervalo, as perdas econômicas também se intensificaram de forma significativa, passando de uma média anual de US\$ 132,8 milhões (2006–2010) para US\$ 634,2 milhões (2018–2022) — um incremento de 377%.

Estudos que analisaram projeções climáticas para a Região Norte do Brasil indicam a persistência e, em alguns cenários, a intensificação das tendências observadas de aumento na ocorrência de eventos extremos, embora com níveis de incerteza mais elevados em comparação às regiões Sul e Sudeste (Debortoli et al., 2016; Marengo et al., 2021). De forma geral, os modelos climáticos apontam para uma redução no total anual de precipitação, concomitante a um aumento na frequência e na magnitude de eventos de chuvas intensas. A intensidade dessas alterações varia de fraca a moderada, dependendo do cenário de aquecimento global considerado, sendo mais pronunciadas sob maiores níveis de aquecimento (Avila-Diaz et al., 2020; Debortoli et al., 2016; Marengo et al., 2021). Esses resultados reforçam a importância de incorporar projeções climáticas derivadas de múltiplos modelos e cenários na formulação de estratégias de adaptação, considerando tanto a sensibilidade da região a variações hidrológicas quanto sua elevada vulnerabilidade socioambiental. Paralelamente, destaca-se a necessidade de ampliar e aprofundar os estudos observacionais, de modo a reduzir as incertezas associadas às projeções e aprimorar a base científica para a tomada de decisão.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Centro-Oeste e mudanças climáticas associadas

A região Centro-Oeste é a que apresenta a menor quantidade de registros históricos de desastres geo-hidrometeorológicos, muito em decorrência de suas características topográficas, onde predominam relevos suaves; de sua baixa densidade demográfica e do clima ser me-

nos propício a episódios de chuvas muito intensas e comparação com as demais regiões.

Ainda assim, o Centro-Oeste brasileiro tem apresentado aumento na ocorrência de enxurradas e inundações urbanas em suas áreas metropolitanas, fenômeno explicado por uma combinação de mudança no padrão de ocupação territorial, marcado pela expansão periurbana acelerada e impermeabilização do solo, e por variações recentes na intensidade de eventos de chuva de curta duração. Em cidades como Goiânia, Cuiabá e Campo Grande, a conversão rápida de superfícies permeáveis em áreas pavimentadas e edificadas, acompanhada de insuficiente atualização e manutenção dos sistemas de drenagem, reduz a capacidade de armazenamento e infiltração local e eleva o escoamento superficial, propiciando eventos de enxurradas de alta energia e curta duração que provocam danos pontuais e consideráveis (Souza et al., 2021). Estudos de suscetibilidade urbana e índices de inundação aplicados a bacias urbanas do Centro-Oeste mostram que unidades hidrogeomorfológicas locais e micro-declividades controlam onde o escoamento da água se concentra, de modo que mesmo chuvas de intensidades moderadas podem gerar alagamentos severos e inundações em setores com drenagem subdimensionada e ocupação de fundos de vale (Mattos et al., 2021; Moraes & Gonçalves, 2024).

Adicionalmente, análises de séries pluviométricas regionais e estudos de tendência indicam sinais heterogêneos no Centro-Oeste. Enquanto a precipitação anual total não apresenta aumento consistente em todas as sub-regiões, há evidências de crescimento na frequência e intensidade de eventos extremos de curta duração (análises pautadas pelos indicadores RX1day, R95p, etc.) especialmente em Goiás e Distrito Federal (Debortoli et al., 2016), o que, em conjunto com fatores de ocupação descritos anteriormente, amplifica os riscos urbanos contemporâneo (Valverde & Marengo, 2014; Battisti et al., 2025).

Os resultados de estudos que incorporam projeções do clima futuro são inconclusivos sobre os padrões de aumento de eventos extremos de precipitação para o futuro próximo, embora a tendência geral seja de aumento discreto tanto em frequência quanto magnitude (Debortoli et al., 2016; Marengo et al. 2021; Avila-Diaz et al., 2020). No entanto, para a segunda metade do século XXI e/ou em cenários que o aquecimento global supere 2°C, os resultados são mais consistentes ao indicar um aumento

significativo dos eventos extremos de precipitação (Debortoli et al., 2016; Marengo et al. 2021; Avila-Diaz et al., 2020).

De certa forma, esses padrões e incertezas supracitados também já foram identificados em análises baseadas em dados observacionais, como no estudo de dos Santos et al. (2021). Utilizando séries históricas de precipitação entre 1979 e 2019, o estudo avaliou índices extremos padronizados e verificou que o número de dias com precipitação muito intensa (R20mm) não apresentou mudanças estatisticamente significativas na maior parte das estações analisadas. Entretanto, observou-se tendência positiva em aproximadamente 25% dos locais para a ocorrência de dias com precipitação superior a 50 mm. Além disso, tanto a precipitação máxima em um único dia (Rx1day) quanto a precipitação máxima em cinco dias consecutivos (Rx5day) exibiram, predominantemente, tendências de aumento. Em contrapartida, a precipitação anual total apresentou tendências negativas em grande parte da porção leste da região Centro-Oeste, indicando possível redistribuição intra-anual das chuvas, com eventos mais concentrados e intensos, que propiciam a ocorrência de eventos hidrológicos.

Por fim, modelagens integradas que combinam mudanças de uso do solo e cenários de precipitação mais intensos mostram que o efeito conjunto das alterações do escoamento pela elevada impermeabilização de áreas urbanas e aumento da intensidade de chuva deve multiplicar a profundidade e o tempo de retorno das inundações e alagamentos urbanos, elevando a probabilidade de falhas em sistemas de drenagem projetados para climas históricos e amplificando o risco de desastres de origem hidrológica (Mattos et al., 2021).

SECAS NOS BIOMAS BRASILEIROS

A seca é um extremo climático relacionado à baixa disponibilidade hídrica causada pelo déficit de precipitação em comparação às condições normais e frequentemente agravada pelo aumento da demanda atmosférica por água após altas temperaturas ou ventos intensos (GAR, 2020). É importante ressaltar que os efeitos da seca se acumulam lentamente ao longo do tempo e podem perdurar por meses ou anos após o retorno das chuvas aos seus valores médios.

Eventos de seca podem resultar em desastres quando a demanda por água deixa de ser suprida, causando desequilíbrio hídrico para diferentes atividades humanas (Wilhite e Glantz, 1987, GAR 2020). Assim, a seca se configura como um risco quando há diminuição da capacidade dos diferentes sistemas de lidar com o déficit hídrico (Cunha et al. 2018, 2019). Esse risco pode resultar em impactos nos meios de subsistência das pessoas, nos setores produtivos, na saúde dos ecossistemas e até mesmo na vida de humanos e animais (Cunha et al., 2019; Marengo et al., 2021; Cuartas et al., 2022).

Em países menos desenvolvidos, os impactos nos meios de subsistência humanos estão frequentemente associados ao nível de pobreza, intensificando ainda mais as vulnerabilidades existentes. Além disso, secas mais recorrentes e intensas também podem acelerar os processos de degradação da terra, resultando na perda de serviços ecossistêmicos a longo prazo quando os pontos de inflexão são excedidos (Vogt et al., 2011; Spinoni et al., 2015).

O Brasil tem enfrentado eventos de seca de grande magnitude desde o início do século XXI, que causaram impactos significativos em diversos biomas, incluindo a Amazônia, o Pantanal, o Cerrado e a Caatinga. Esses eventos extremos não afetam apenas a biodiversidade desses ecossistemas, mas também comprometem as condições de vida das populações humanas (Cunha et al., 2019; Cuartas et al., 2022).

A série temporal do índice de seca, denominado SPEI (Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração) (Vicente-Serrano et al., 2010), mostra que, a partir da década de 90, as secas no Brasil se tornaram mais frequentes e intensas (valores de SPEI mais negativos e consecutivos, Figura 3a). O SPEI é um índice que considera tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial (estimada com base na temperatura do ar), fornecendo uma medida integrada da disponibilidade hídrica e das condições climáticas de uma região, sendo uma maneira simples de contabilizar desvios do balanço hídrico de uma determinada região.

Segundo dados do SPEI (Figura 3a), o país enfrentou três grandes secas (picos negativos e consecutivos do SPEI, abaixo de -1,0): a primeira entre 1997 e 1998, a segunda entre 2015 e 2016 e a última em 2023 e 2024. Vale ressaltar que a seca de 2015-2016 superou a de 1997-1998, mas a última de 2023-2024 apresentou valores mais negativos do SPEI, indicando ser a mais intensa da série histórica. Esse cenário se deveu não apenas ao déficit de chuvas, mas também à ocorrência simultânea de eventos de

seca e extremos de calor, especialmente entre os anos de 2023 e 2024. Em diferentes partes do globo, a ocorrência simultânea de múltiplos riscos climáticos, como seca e calor (composto seca-calor), também aumentou e projeta-se que aumente ainda mais neste século (Zscheischler et al. 2018, 2020; Vogel et al. 2020; IPCC 2021).

Em comparação com as décadas anteriores, nos últimos dez anos (2014 a 2024), as secas têm sido mais recorrentes e intensas nos biomas Cerrado, Amazônia e Pantanal (valores de SPEI persistentemente mais negativos, Figuras 3b, c, d e g), portanto, biomas fora do limite do semiárido brasileiro, região onde as secas costumavam ser mais recorrentes do que no restante do país.

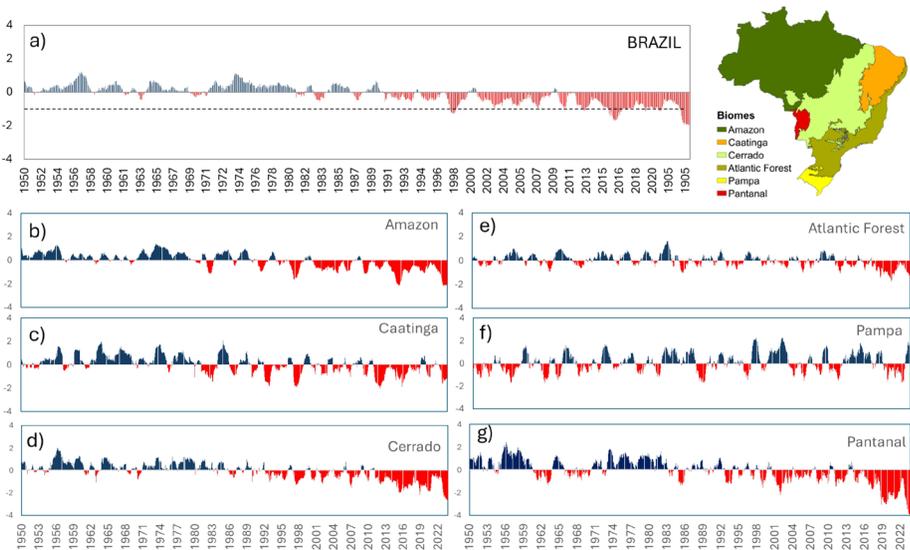


Figura 3: Evolução temporal das secas no Brasil considerando o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) de 1951 a 2024. As barras azuis indicam anos em que a precipitação foi maior que a evapotranspiração (balanço hídrico positivo), indicando períodos mais chuvosos, com maior disponibilidade hídrica, enquanto as barras vermelhas indicam anos em que a evapotranspiração foi maior que a precipitação (balanço hídrico negativo), resultando em condições mais secas, com menor disponibilidade hídrica. (Fonte dos dados do SPEI: Vicente-Serrano et al., 2010; pós-processamento e análise: CEMADEN/MCTI).

De acordo com dados do Índice Integrado de Secas - IDI (Cunha et al., 2019, Zeri et al., 2024), um índice operacional para monitoramento

de secas fornecido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN/MCTI, em termos de extensão, a seca de 2023-2024 lidera, abrangendo cerca de 5 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 59% do território brasileiro. Em segundo lugar, a seca de 2015-2016 afetou cerca de 4,6 milhões de km² (aproximadamente 54% do país). A seca de 1997-1998 atingiu cerca de 3,6 milhões de km², o equivalente a 42% do território nacional.

Dados do CEMADEN (Monitoramento de Seca para o Brasil — Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI) mostram que, em 2024, mais da metade do Brasil sofreu os impactos diretos da crise climática, na qual os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal enfrentaram a pior seca dos últimos 70 anos. Até setembro de 2024, aproximadamente 1.200 municípios no Brasil enfrentavam condições de seca severa. Em situação de seca extrema, havia 263 municípios brasileiros. O déficit pluviométrico observado desde a primavera de 2023 em uma área tão extensa do Brasil (abrangendo as regiões Norte a Sudeste do país), e a ocorrência de altas temperaturas, ondas de calor e baixa umidade relativa do ar, atingindo valores próximos a 7% em parte da região Centro-Oeste, impulsionaram a propagação de incêndios.

Embora historicamente as secas sejam mais recorrentes no semiárido, nos últimos anos, as secas têm sido bastante severas, causando impactos em diferentes regiões do Brasil.

No Bioma Amazônia, destacam-se as secas ocorridas em 1982-83, 1997-98, 2005, 2010, 2015-16 e, mais recentemente, em 2023-24 (Marengo, 2013; Jiménez-Muñoz et al., 2016; CEMADEN, 2023; Espinoza et al., 2023, Anderson et al., XX). Cada evento de seca apresenta um padrão diferente em termos de causas físicas e distribuição geográfica do déficit hídrico (Cunha et al., 2023). As secas de 1982-83, 1997-98, 2010 e 2015-16 foram associadas ao El Niño, enquanto a seca de 2005 foi associada ao Atlântico Tropical Norte (NTA) mais quente (Marengo, 2013; Aragão et al., 2018). Durante a seca de 2005, grande parte do sudoeste da Amazônia sofreu deficiência de chuvas; em 2010, as áreas que sofreram seca foram as partes central e oriental da Amazônia, e em 1983 e 1998, quase toda a Amazônia setentrional, central e oriental sofreu deficiência de chuvas (Alves et al., 2013). Por sua vez, a seca de 2015-16 ocorreu devido a um dos eventos El Niño mais fortes já registrados associados ao aquecimento da NTA, excedendo a extensão espacial dos impactos ocorridos em 2005 e 2010, particularmente nas partes oriental e meridional da Amazônia (Er-

fanian et al., 2017; Jiménez-Muñoz et al., 2016; Jiménez et al., 2018; Anderson et al., 2018).

Recentemente, em 2023-24, a Amazônia enfrentou outro evento histórico de seca, somado aos eventos extremos de calor (Figura 4). Segundo dados do IDI, a seca de 2023-2024, além de ser a maior em extensão territorial, também foi caracterizada pela mais longa seca já ocorrida fora do Semiárido. Parte do bioma registrou déficit hídrico por 18 a 20 meses consecutivos.

Os efeitos da seca foram visíveis na maioria dos principais rios da Amazônia, incluindo o Negro, o Solimões, o Purus, o Juruá e o Madeira, impactando severamente o transporte aquaviário, comprometendo o transporte de água e alimentos e isolando comunidades indígenas. Em outubro de 2023, o nível da água no porto de Manaus atingiu 12,70 m, o menor nível registrado desde 1902 (Espinoza et al., 2023).

A região Sul do país, que abrange majoritariamente os biomas Mata Atlântica e Pampa, também registrou eventos recorrentes de seca, especialmente nos anos de 2004-05, 2012-13 e 2019-22 (Berlato, 2005; Braz Pinto, 2017; Cardoso et al., 2020). Segundo Fernandes et al. (2021), este último evento pode estar associado à fase negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e às condições de neutralidade no Pacífico Equatorial.

Como consequência da seca de 2012, a maior parte da região Sul sofreu um esgotamento substancial das águas superficiais e subterrâneas, afetando o abastecimento de água em propriedades rurais e a produção agrícola e pecuária. No evento de seca de 2019 a 2020, o primeiro trimestre de 2020 foi o mais crítico em termos de intensidade e extensão, visto que 100% dos municípios de toda a região foram classificados como tendo condição de seca severa a excepcional (Fernandes et al., 2021 e CEMADEN-MCTI, 2024). O impacto dessa seca também pôde ser observado pela queda da vazão do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

É importante destacar que, até pouco antes da enchente histórica ocorrida no Rio Grande do Sul, em maio de 2024, estado que possui cerca de 68,8% de seu território coberto pelo bioma Pampa, a região enfrentava uma seca severa e prolongada. Os governos ainda realizavam ações de resposta à seca quando foram surpreendidos pela grande enchente, o que impôs um desafio adicional à gestão dos riscos de desastres relacionados a eventos extremos. Em um curto espaço de tempo, foi necessário passar da resposta a uma crise hídrica para o enfrentamento dos impactos causados por um evento hidrológico de grandes proporções.

Na região Sudeste, composta majoritariamente pelos biomas Mata Atlântica (cerca de 60% do território) e Cerrado (aproximadamente 30%), durante os verões de 2013-14 e 2014-15, a região enfrentou condições de seca e uma crise hídrica crítica com impactos em diversos setores da sociedade, incluindo abastecimento humano, agricultura e geração de energia hidrelétrica (Coelho et al., 2015; Nobre et al., 2016). A principal causa dessa condição atmosférica deveu-se à presença de um sistema de alta pressão conhecido como “bloqueios”, anormalmente intenso e persistente, impedindo a passagem de sistemas frontais (Marengo et al., 2015; Coelho et al., 2015). As bacias hidrográficas da região Sudeste, tanto para geração quanto para abastecimento de energia hidrelétrica, voltaram a apresentar condições críticas entre os anos de 2022 e 2024 (Cuartas et al., 2022; 2024; OMM, 2022).

O volume dos reservatórios de água atingiu seus níveis mais críticos. Em particular, o Sistema Cantareira de Abastecimento de Água, localizado na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais, enfrentou seu pior período de escassez hídrica, tendo que utilizar o volume morto entre 12 de julho de 2014 e 30 de dezembro de 2015 (537 dias). Na época, a escassez hídrica afetou mais de 8,8 milhões de pessoas (Deusdá et al., 2020; Cunha et al., 2019).

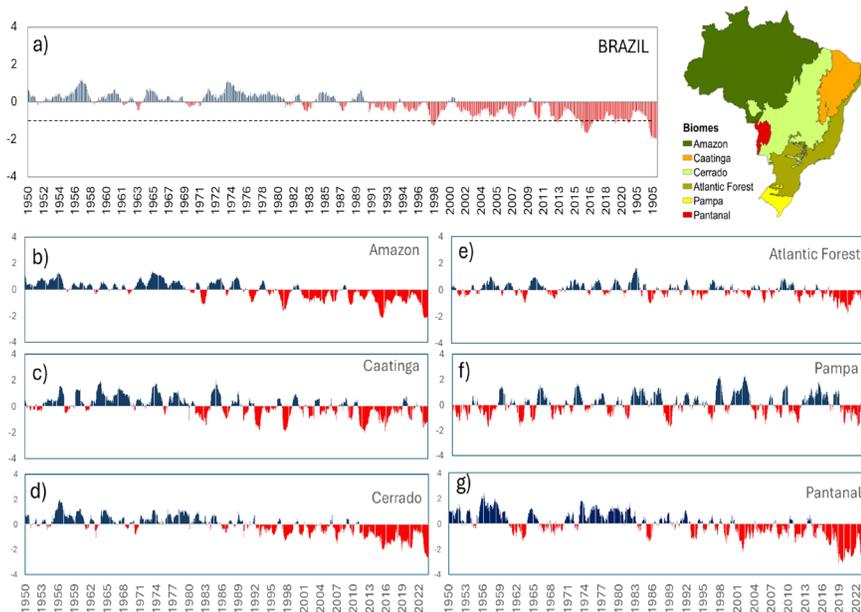


Figura 4: Mapas anuais do Índice Integrado de Secas (IIS, Fonte: CEMADEN/MCTI).

No que se refere ao bioma Caatinga, predominante no semiárido brasileiro, trata-se de uma área reconhecidamente vulnerável a fatores climáticos, especialmente devido à baixa disponibilidade hídrica e à alta vulnerabilidade socioeconômica (Marengo et al., 2018; Gomes e Wille-gaignon, 2021). Os principais eventos de seca na região foram 1982-1983, 1986-87, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2010 e 2012-2017 (Magalhães et al. 1988, Gutierrez et al. 2014, Wilhite et al. 2014, Marengo et al. 2016). Durante os anos de seca extrema de 1982-83 e 1997-98, tanto o fenômeno El Niño quanto a influência de águas mais quentes no Atlântico Tropical Norte (NTA) foram responsáveis por mudanças na circulação que reduziram a precipitação na região (Nobre et al., 2016; Marengo et al., 2013). Por outro lado, o início da seca de 2012 foi devido a um evento La Niña, no qual o resfriamento das águas do Pacífico central, juntamente com o aquecimento do NTA, favoreceu a posição da ZCIT mais ao norte de sua posição climatológica (Rodrigues e McPhaden, 2014). Em 2015, com a caracterização do El Niño, as condições de seca que ocorriam desde 2012 acabaram se intensificando e a seca entre 2012 e 2017 na região semiárida foi definida como o “evento” mais intenso dos últimos 30 anos (Brito et al., 2017; Cunha et al., 2018). Considerando os impactos acumulados entre 2012 e 2017, cerca de 1.100 municípios foram afetados (33,4 milhões de pessoas afetadas por ano), especialmente em relação ao abastecimento de água e perdas em sistemas agroprodutivos, com impactos estimados em aproximadamente R\$ 104 bilhões (Marengo et al., 2017). Em 2023, grande parte da Caatinga foi novamente afetada por outro evento de seca, menos intenso em termos de impactos, mas causando condições severas de seca em alguns municípios do oeste da Bahia, afetando áreas agrícolas e pastagens (CEMADEN, 2023, Boletim de Outubro). Os fatores climáticos atribuídos a este evento foram, novamente, devido à ação do El Niño e ao aquecimento da NTA (CEMADEN, 2023).

Embora as secas sejam cada vez mais recorrentes em todo o país, o semiárido nordestino ainda concentra os eventos mais intensos (excepcionais) da história recente do Brasil.

Conforme indicado pelas Figuras 3 e 4, nos últimos anos, entre todos os biomas brasileiros, a seca tem sido mais intensa, especialmente nos biomas Pantanal e Cerrado, que compõem a região central do país. Os biomas Pantanal enfrentaram uma seca severa entre 2019 e 2024, contribuindo para a propagação de incêndios e afetando a biodiversidade

natural e os setores do agronegócio e da pecuária. Essa seca prolongada impactou severamente os recursos hídricos no Pantanal. Em 2020, o nível do rio atingiu valores extremamente baixos e, em alguns trechos, o transporte teve que ser restringido. Níveis muito baixos dos rios afetaram a mobilidade de pessoas e o transporte de soja e minerais para o Oceano Atlântico através da Hidrovia Paraná-Paraguai (Marengo et al., 2021). No período chuvoso de 2023-24, a Bacia do Paraguai (bacia do bioma Pantanal) registrou déficits de precipitação em torno de 300 mm, o que indica que apenas 60% da precipitação esperada para o período chuvoso, iniciado em outubro de 2023, foi observada, prolongando assim os impactos das secas.

O Pantanal tem atraído atenção especial por ser um dos ecossistemas brasileiros mais ameaçados por pressões antrópicas diretas e mudanças climáticas. Cunha et al., 2023, mostraram que eventos compostos de seca e calor têm sido mais recorrentes e generalizados desde 2000 no Pantanal. Além disso, houve um padrão de mudança para condições mais quentes e secas nos últimos 40 anos, contribuindo também para a redução da disponibilidade hídrica e para a disseminação de incêndios no Pantanal. Tomasella et al. (2022), utilizando índices de seca (SPI e SPEI) derivados de dados de estações meteorológicas, mostraram uma tendência significativa para condições mais secas e quentes no Brasil Central (incluindo o Pantanal) em diferentes escalas de tempo, especialmente para escalas de tempo de 12 meses ou mais.

De acordo com dados da Produção Agrícola Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>), a produtividade do milho foi 50% menor na safra de 2020 em comparação com o ano anterior. Além disso, a severa seca de 2020 causou perdas de pelo menos 1 milhão de toneladas de grãos na colheita de soja. Diante dessa situação, o governo declarou estado de emergência para facilitar o acesso ao seguro agrícola (Cunha et al., 2023).

Além dos impactos na produtividade agrícola, as secas associadas a extremos de calor também estão relacionadas ao aumento do risco de incêndios, especialmente em regiões tropicais. Prevê-se que o Pantanal se torne mais inflamável em um futuro clima mais seco e quente, em combinação com paisagens modificadas pelo homem, e, portanto, particularmente vulnerável ao aumento do risco de incêndios (Ribeiro et al., 2022; Afroz et al., 2023). Embora pequenas queimadas sejam historicamente utilizadas para limpeza de terras para subsistência (atividades

agrícolas), a seca excepcionalmente longa de 2019 e 2020 encorajou muitas pessoas a atear fogo criminoso para expansão de área e terras (Libonati et al. 2020, 2022; Ribeiro et al. 2022). Essa situação culminou na queima de quase 30% do Bioma, matando 17 milhões de vertebrados (Ribeiro et al. 2022).

A maioria dos últimos grandes eventos de seca na região Central do país foi causada principalmente pela ocorrência de bloqueios atmosféricos que impediram a passagem de sistemas meteorológicos causadores de chuvas (Marengo et al., 2021). Alguns estudos indicam que os bloqueios atmosféricos estão ocorrendo com mais frequência globalmente desde o início do século (Lupo et al., 2021).

A frequência crescente de eventos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas, tem contribuído significativamente para mudanças nos padrões climáticos ao longo do tempo, intensificando o fenômeno da aridez. Esta, por sua vez, é caracterizada como uma condição climática de longa duração, resultante de um déficit hídrico. Esse déficit se deve à precipitação média insuficiente combinada a uma alta taxa de evapotranspiração, que consiste na perda de água para a atmosfera devido ao calor.

Tomasella et al. (2025), analisando uma série temporal do Índice de Aridez de 1961 a 2020, indicou uma tendência para condições mais secas no centro e nordeste do país, enquanto a região Sul apresentou mudanças para condições mais úmidas. Observou-se também a expansão de áreas semiáridas em detrimento de regiões secas, subúmidas e úmidas no Bioma Caatinga. Os autores também mostraram que essas tendências se aceleraram no período de 1991 a 2020, indicando intensificação. Durante esse período, foi observada pela primeira vez uma área de $> 4.200 \text{ km}^2$ dentro da categoria árida, de acordo com a classificação convencional (Figura 3). Além disso, novas áreas, com tamanhos variando de 1.200 a 11.500 km^2 , incluídas na categoria subúmida seca, foram detectadas no Brasil Central (parte do Cerrado e Pantanal). Além do Índice de Aridez, os autores também analisaram uma série temporal do Índice de Saúde da Vegetação (VHI, Kogan et al., XX), que também indicou tendências negativas em todos os biomas brasileiros, sugerindo um aumento do estresse da vegetação ao longo dos anos.

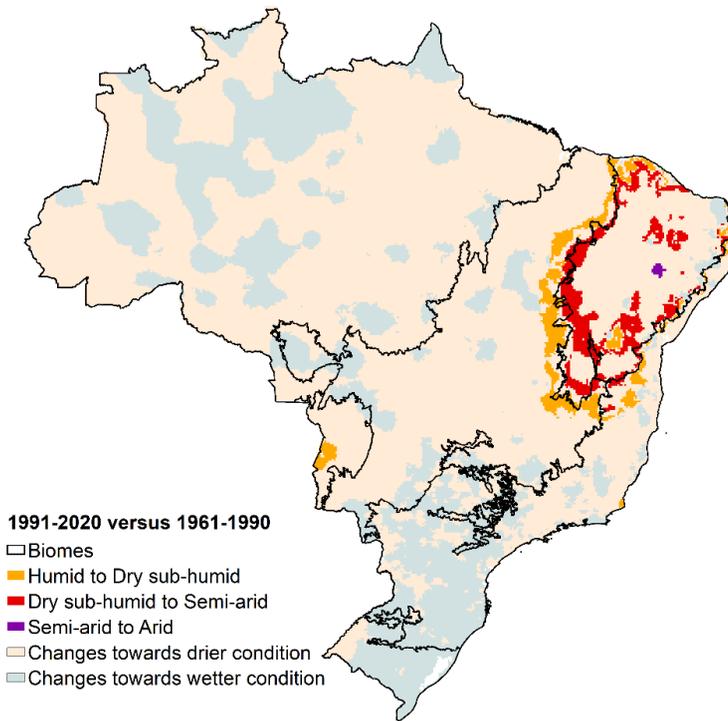


Figura 3: Mudanças nas classes de IA entre os períodos 1991-2020 e 1961-1990 (Fonte: Tomasella et al., 2025).

Diversos estudos já indicam que há fortes evidências de que as mudanças climáticas aumentarão o risco e a intensidade das secas em todo o mundo (IPCC, 2021, Cook et al., 2020, Marengo et al., 2021). No Brasil, estudos mostram que tais mudanças podem causar impactos significativos na produção agrícola por meio do aumento da frequência de secas no país (Assad et al., 2013; Marengo et al., 2017, 2020, 2021). Segundo Marengo et al. (2021), especialmente na região semiárida do Brasil, onde predomina a agricultura familiar de sequeiro e alta vulnerabilidade socioeconômica (Figura 3), as perdas de produtividade podem levar ao aumento da pobreza, aos conflitos por terra e à migração em massa para centros urbanos superpovoados.

De modo geral, todos os municípios com maior vulnerabilidade socioeconômica podem ser mais afetados quando ocorre um cenário de maior frequência, intensidade e duração de seca. Além dos municípios localizados na Caatinga, municípios localizados na porção Noroeste da

Amazônia (Figura 4) também podem ser mais impactados, pois são municípios caracterizados por menores índices de desenvolvimento, pobreza, menor assistência técnica e, em suma, menor capacidade de resposta.

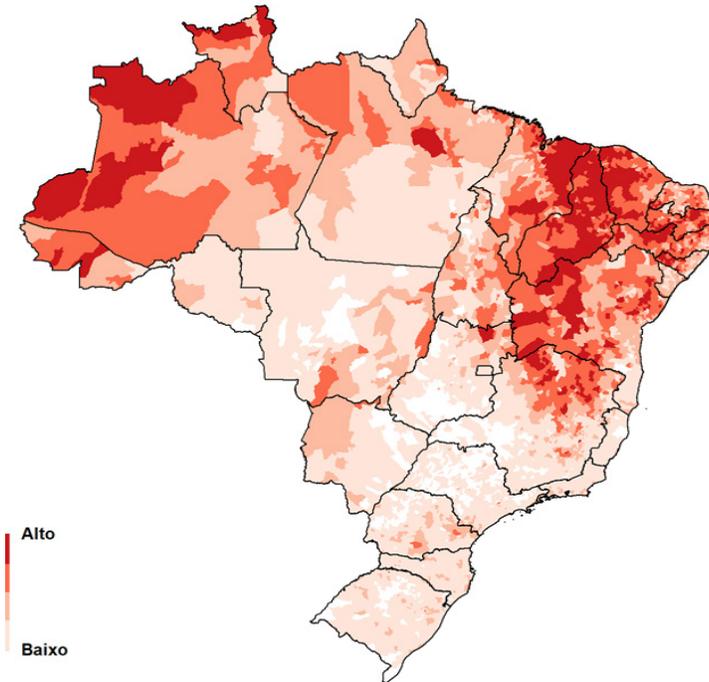


Figura 4: Vulnerabilidade socioeconômica à seca no Brasil. Tons mais escuros de vermelho indicam maior vulnerabilidade; tons mais claros indicam menor vulnerabilidade. (Fonte: CEMADEN/MCTI).

Além disso, cabe destacar que a matriz energética brasileira, embora considerada limpa e diversificada, ainda apresenta elevada dependência de energia hidrelétrica, que representa grande parcela da matriz, porém, expõe o país a crises hídricas causadas por secas intensas e prolongadas, que reduzem a geração de energia e podem levar ao acionamento de termelétricas, mais caras e poluentes.

A projeção de intensificação de secas e extremos de calor no Brasil acentua a pressão sobre a segurança alimentar, hídrica e energética do país, tornando ainda mais urgente a implementação de políticas públicas voltadas à redução das vulnerabilidades socioeconômicas e ao fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos do país.

AVANÇOS E DESAFIOS PARA A REDUÇÃO DE VULNERABILIDADES A DESASTRES NO BRASIL

A vulnerabilidade tem sido explorada por distintos referenciais conceituais, desde aqueles que associam diretamente aos danos diretos de desastres, até aqueles que entendem como resultado de fatores indiretos tais como níveis de exposição, graus de suscetibilidade e capacidades adaptativas das populações afetadas (Kim et al, 2021). Importante também destacar abordagens conceituais de vulnerabilidade que contemplam a sua composição multidimensional (Birkmann e Wisner, 2006) e global, composta de diferentes tipos de vulnerabilidades interconectadas, como social, econômica, física, institucional, ideológica, dentre outras (Wilchex-Chaux, 1993). Independentemente da abordagem adotada, é consenso de que altos níveis de vulnerabilidade a desastres podem levar a danos maiores ou a um tempo de recuperação mais longo dos sistemas afetados. Portanto, a vulnerabilidade é entendida como um processo progressivo, cuja construção remete a causas profundas, pressões dinâmicas e condições inseguras (Wisner et al. 2004).

A necessidade da análise multidisciplinar sobre a ocupação humana em áreas suscetíveis às ameaças naturais tem sido destacada em estudos desde a década de 1940 (White, 1945). Diante do atual contexto de mudanças climáticas, tal demanda se faz ainda mais premente, considerando os múltiplos fatores que envolvem vulnerabilidade e adaptação. A crescente complexidade é intensificada pela inadequação de ações humanas no território, a exemplo da ocupação em encostas ou planícies de inundação desrespeitando as condições naturais. Em termos globais, a expansão de assentamentos humanos em áreas inundáveis supera aquela em zonas seguras, ou seja, cada vez mais os países estão aumentando sua exposição a eventos extremos (Rentschler et al. 2023).

A vulnerabilidade é um elemento chave para definição do nível de risco de desastres, razão pela qual esforços têm sido priorizados para o desenvolvimento de formulação de políticas de gestão de risco de desastres. Agendas globais, a exemplo do Marco de Ação de Sendai (MAS) e Agenda 2030, adotam abordagens voltadas para redução de riscos de desastres. Assim, os países signatários se comprometem a alcançar as metas propostas em tais agendas, com vistas a reduzir perdas decorrentes de desastres, com foco na vulnerabilidade das populações. Dentre as prioridades de ação do MAS, destaca-se a compreensão do risco de de-

sastres, em todas as suas dimensões: vulnerabilidade, capacidade, exposição de pessoas e ativos, características do risco e meio ambiente.

Conhecimento sobre população em áreas de risco de deslizamentos, inundações e enxurradas

Particularmente no Brasil, informações sobre as condições de vidas da população vivendo em áreas de riscos de desastres em escala nacional só foram obtidas a partir da criação de uma nova base de dados, denominada Base Territorial Estatística de Risco (BATER), cujas delimitações gráficas incorporam informações do censo populacional associadas às áreas de risco mapeadas. Tal metodologia foi inicialmente implementada para caracterização de três municípios pilotos, localizados no estado do Rio de Janeiro (Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo), e resultou de cooperação técnica entre o CEMADEN e o IBGE. No estudo, os resultados mostrados uma estimativa de aproximadamente 155.000 pessoas expostas ao risco de deslizamentos e/ou inundações em 1.357 áreas de risco (Assis Dias et al., 2018).

Cabe destacar que a associação de informações censitárias com áreas de risco não podia ser feita de forma direta e automatizada, devido às diferentes geometrias entre as áreas de risco e os setores censitários; portanto, a metodologia desenvolvida foi pioneira e representou um importante marco para o conhecimento da população exposta (Assis Dias et al., 2018). Vários estudos foram produzidos a partir de dados de BATER, proporcionando novo olhar para o tema. Alvalá et al. (2019), por exemplo, visando compreender as condições da população vivendo em áreas de riscos em escala intraurbana e a potencial aplicação de tais informações no sistema de alerta precoce brasileiro, identificaram que 825 municípios historicamente afetados por desastres no território brasileiro, contavam com população estimada de 8.266.566 pessoas vivendo em 27.660 áreas de riscos e em 2.470.506 domicílios. Esse resultado indicou que, para cada 100 habitantes, 9 viviam em áreas de risco de desastres no Brasil. Por sua vez, Saito et al (2019) revelaram que a população exposta a áreas de riscos de desastres concentra-se nas capitais e pequenas cidades do país, as quais são densamente povoadas mesmo em pequenas cidades, sugerindo que essa é uma realidade enfrentada não apenas pelas grandes cidades, assim como as áreas de risco de desastres existem mesmo dentro de municípios com alto nível de desenvolvimento humano. Os re-

sultados foram relevantes em contribuir para a compreensão da espacialização do risco de desastres no Brasil, um passo primordial para a redução de perdas humanas, revelando um problema atual enfrentado pelos municípios, independentemente da classificação de porte e do nível de desenvolvimento humano.

Indicadores, índices e cenários de vulnerabilidade

Muitos estudos têm sido conduzidos com vistas a examinar a vulnerabilidade a desastres e identificar indicadores para sua melhor compreensão. Rufat et al. (2015) analisaram os fatores de vulnerabilidade social em 67 estudos de casos de desastres associados à inundações, tendo concluído que a influência dos indicadores variou de acordo com o estágio do desastre e o cenário nacional; portanto, destacaram a necessidade de pesquisas e proveram recomendações para adaptação de indicadores contextualmente.

Os estudos sobre os efeitos da vulnerabilidade a desastres mostram que os danos diferem por elementos específicos do desenho da pesquisa dos estudos, incluindo regiões, tipos de desastres e unidade espacial de análise (Choo e Yoon, 2024). A partir dessa premissa, esses autores conduziram uma meta-análise visando analisar a conexão entre vários estudos para revelar a tendência comum da relação entre vulnerabilidade e danos causados por desastres, incluindo danos materiais e perdas humanas, examinando os efeitos comuns de fatores socioeconômicos (densidade populacional, PIB, domicílios de baixa renda e população idosa) nos danos causados por desastres a partir de 38 estudos. Neste contexto, consideraram uma análise de subgrupos para identificar a heterogeneidade dos efeitos por tipo de desastre e unidade espacial de análise dos estudos incluídos, cujos resultados mostraram que a população idosa e os domicílios de baixa renda estavam positivamente associados aos danos causados por desastres. No nível comunitário, a densidade populacional, a população idosa e os domicílios de baixa renda estavam positivamente associados aos danos causados por desastres, enquanto o PIB tendia a reduzir os danos causados por desastres em nível nacional.

No contexto brasileiro, Assis Dias et al. (2020) desenvolveram o InOV (Índice Operacional de Vulnerabilidade), com vistas a subsidiar o monitoramento e a emissão de alertas precoces para riscos de desastres no Brasil. Os dados de BATER foram cruciais para identificar áreas que

concentram grande número de populações expostas a áreas de riscos de deslizamentos. O InOV, baseado em indicadores que caracterizam as condições de exposição física dos moradores, bem como a capacidade de resposta da população para se recuperar após o desastre, foi desenvolvido para 443 municípios brasileiros, o que permitiu uma análise relacional das áreas de risco dentro de cada município. Portanto, o InOV pode subsidiar a identificação de áreas prioritárias, fornecendo informações adicionais sobre populações vulneráveis, bem como para auxiliar na identificação de áreas críticas no município que estão sob risco de desastre hidrometeorológico quando os limiares críticos de precipitação são ultrapassados.

Em termos de cenários de risco, a maioria da população urbana global vive em cidades pequenas, enquanto no Brasil, cerca de 45% reside em municípios com até 100 mil habitantes — muitos expostos a riscos como deslizamentos e inundações. O estudo conduzido por Ribeiro et al (2023) envolvendo 234 cidades das regiões Sul e Sudeste analisou a vulnerabilidade e a capacidade de enfrentamento desses municípios, divididos em duas faixas populacionais: de 20 mil a 50 mil habitantes (Classe A4) e de 50 mil a 100 mil (Classe A5). A partir de análise estatística de um conjunto de 30 indicadores quantitativos e 40 indicadores qualitativos revelou que apesar dos municípios apresentarem altos índices de desenvolvimento humano e disponibilidade de planos diretores, as vulnerabilidades estão associadas a : i) Dependência do setor agrícola ou de recursos externos; ii) Baixa escolaridade e renda (Classe A4) e Infraestrutura precária devido ao crescimento populacional acelerado (Classe A5). A análise concluiu que o porte da cidade, a estrutura econômica e as políticas públicas influenciam diretamente a vulnerabilidade. Além disso, instrumentos legais existentes são insuficientes para garantir infraestrutura adequada ou gestão eficaz de riscos em cidades pequenas.

Inclusão de vulnerabilidade em normativos

Mais recentemente, a Lei 14.750/2023 alterou a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei 12.608/2012) com intuito de “aprimorar os instrumentos de prevenção de acidentes ou desastres e de recuperação de áreas por eles atingidas, as ações de monitoramento de riscos de acidentes ou desastres e a produção de alertas antecipados”. Tal Lei incluiu diversos conceitos, dentre os quais o de vulnerabilidade como “fragili-

dade física, social, econômica ou ambiental de população ou ecossistema ante evento adverso de origem natural ou induzido pela ação humana” (Brasil, 2023).

A inclusão desse conceito na PNPDEC é um importante avanço tendo em vista que pode orientar medidas voltadas para redução de vulnerabilidades. Por outro lado, merece especial atenção o fato de associar vulnerabilidade a fragilidades, denotando forte viés socioeconômico nessa compreensão. Desastres no Brasil evidenciam que populações são duramente impactadas pelos desastres mesmo não apresentando tais fragilidades. Portanto, é fundamental a compreensão de que vulnerabilidade requer integração de múltiplos fatores, como ausência de articulação entre políticas públicas e infraestrutura urbana deficiente, que contribuem para a exposição ao risco das pessoas. Garantir a segurança das populações só será efetiva se incluída a sua totalidade, independentemente de sua condição econômica, sobretudo em contexto de convivência atual e futura com extremos.

Redução de vulnerabilidades institucionais

O Projeto Elos, conduzido pelo CEMADEN, em parceria com a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (Sedec/MDR) e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) foi uma iniciativa estratégica voltada para o fortalecimento da gestão de riscos de desastres nos municípios brasileiros. O Projeto produziu um diagnóstico das capacidades e necessidades das defesas civis municipais, considerando três eixos (estruturação, capacitação e governança), no intuito de subsidiar a implementação da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) nos municípios brasileiros.

A componente científica no projeto Elos foi fundamental para a solidez dos resultados alcançados, sobretudo na adoção dos procedimentos metodológicos adotados. Três instrumentos de pesquisa foram empregados: **i)** questionário online, por 1.993 municípios; **ii)** entrevistas em profundidade, realizadas com 31 municípios dos 26 estados brasileiros, além do Distrito Federal (DF), e, **iii)** grupos focais virtuais com 190 municípios, para promover espaços de discussão coletiva. A triangulação dos dados obtidos pela pesquisa evidenciou a fragilidade estrutural e institucional das defesas civis municipais, desde a deficiência de equipamentos básicos como computadores e viaturas, até a falta de reconhecimento profis-

sional (Brasil, 2021). Todos esses aspectos acabam por impactar diretamente nas ações de preparação, resposta e reconstrução a desastres no nível municipal.

O diagnóstico produzido constitui em subsídio fundamental para apoiar a redução de vulnerabilidades institucionais. Nesse sentido, outro resultado relevante foi a identificação dos desafios enfrentados pelas defesas civis para fortalecimento da PNPDEC como a i) demanda por profissionalização e valorização da atuação em proteção e defesa civil; ii) a escassez de recursos financeiros para implementar a PNPDEC no nível municipal; iii) ações de capacitação que considerem as especificidades das cinco regiões do país; iv) aperfeiçoamento dos processos de comunicação interna e institucional sobre riscos e desastres; e, v) fortalecimento da participação social e intersetorial (Marchezini et al, 2025).

Desafios

A produção científica brasileira vem colaborando fortemente para a consolidação de referenciais teóricos, construção de bases de dados, desenvolvimento de indicadores e métodos para avaliar as múltiplas dimensões de vulnerabilidade no país. Esses avanços contribuem para elaboração de cenários de risco de desastres mais assertivos, por exemplo, no contexto de monitoramento e alertas precoces, além de orientar ações para fortalecer as instituições e reduzir suas vulnerabilidades. Contudo, diante do crescente consenso de que as causas da vulnerabilidade são de ordem multifatorial, que interconectam entre causas profundas, condições inseguras e pressões dinâmicas (Wisner et al, 2004), trabalhar em sua redução exige invariavelmente em mudança de abordagens convencionais.

Embora esforços concretos tenham sido alcançados até o presente, trata-se de um processo progressivo e reduzir vulnerabilidades requer a articulação entre várias políticas públicas, como de meio ambiente, de urbanização, econômica, de educação, mudança climática, entre outras. Ademais, ainda é imperativo superar a concepção de que vulnerabilidade se restringe a condição de pobreza, para que as políticas alcancem todas as populações expostas às mudanças climáticas, em abordagem equitativa.

ENTRE SABERES E RESILIÊNCIA: EDUCAÇÃO E REDUÇÃO DE RISCOS DE DESASTRES COM JUSTIÇA CLIMÁTICA

Conforme ressaltado, os eventos climáticos extremos estão cada vez mais frequentes e letais, com seus efeitos impactando de forma desigual populações e ecossistemas. Inundações, secas severas, movimentos de massa, ondas de calor e incêndios florestais comprometem não apenas o ambiente, mas as sociedades. Nesse contexto de emergência climática, a Educação em Redução de Riscos de Desastres (ERRD) torna-se primordial em constituir instrumentos estratégicos para ampliar a percepção de risco, fomentar a participação cidadã e articular respostas multiescolares. Fundamentada na Educação Ambiental Climática (EAC), a ERRD promove uma leitura de mundo crítica e transformadora, ao agregar saberes científicos, tradicionais e locais na busca do fortalecimento de prevenção de riscos, capacidade adaptativa e da resiliência das comunidades no enfrentamento às mudanças do clima.

No escopo deste Capítulo, parte-se do pressuposto de que a educação deve constituir uma análise consistente do modelo que orienta as decisões globais de desenvolvimento, e exige a consideração de múltiplas dimensões – econômicas, políticas, técnicas, históricas, éticas, sociais, culturais, morais, estéticas e ambientais. Nessa perspectiva, a EAC e a ERRD assumem o papel de instigar questionamentos sobre a (IN)sustentabilidade sistêmica, valendo-se da observação, investigação, reflexão e ação junto com as pessoas e comunidades para encontrar caminhos transformadores da realidade.

Trata-se de enfrentar as causas profundas da emergência climática: o negacionismo, a falta de decisões políticas de enfrentamento, além das falsas soluções produzidas pelo capitalismo verde e pelo marketing ambiental (*greenwashing*), que visam perpetuar práticas insustentáveis efetuadas pelo modelo econômico vigente.

O desafio educacional se projeta no horizonte planetário. Atualizações do quadro das Fronteiras Planetárias⁵¹ (Rosckström et al., 2009)

51 São limites científicos planetários, definidos por um grupo de pesquisadores liderados pelo Centro de Resiliência de Estocolmo, que representam os limiares ambientais que não devem ser ultrapassados para garantir um espaço seguro de desenvolvimento humano na Terra. Os pesquisadores identificaram nove fronteiras para a zona de segurança: 1. Mudanças climáticas, 2. Integridade da biosfera, 3. Mudança de uso do solo, 4. Fluxos bioquímicos, 5. Destruição do ozônio estratosférico, 6. Uso da água doce, 7. Aci-

mostram que possivelmente seis, dos nove limites de segurança já foram ultrapassados, incluindo clima, integridade da biosfera e fluxos biogeoquímicos (Richardson et al., 2023). A superação desses limites converge com as fronteiras sociais (saúde, igualdade, paz e, com certeza, educação), pois as transgressões ambientais e as desigualdades se retroalimentam. Assim, a educação como ato político em seu sentido mais amplo é imprescindível para recuar das pressões sobre o sistema Terra e mitigar a injustiça climática. É fundamental atuar na perspectiva da mudança de paradigma baseada em conceitos e valores regenerativos, de forma coordenada, em busca de um futuro seguro e com justiça climática. Precisamos mudar o sistema, não o clima!

Embora os últimos Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023) reconheçam a educação como um fator inversamente proporcional à vulnerabilidade social — seja por meio do empoderamento de atores locais, da aprendizagem social ou do fortalecimento de arranjos institucionais —, eles mantêm uma perspectiva funcionalista da educação, abordando-a como vetor de mitigação e adaptação. De forma semelhante, o Marco de Ação de Hyogo (2005-2015) recomendava a inclusão do “tema da RRD na educação formal e não formal, e igualmente nas atividades de capacitação” (UNISDR, 2005), mas reduzia o papel educativo à mera conscientização sobre prevenção e cultura de segurança.

O Marco de Ação de Sendai (2015-2030) avança ao reforçar a importância de diversas medidas para a gestão e o gerenciamento para redução de riscos de desastres — entre elas as educacionais, “que previnam e reduzam a exposição a perigos e a vulnerabilidade a desastres, aumentem a preparação para resposta e recuperação e, assim, fortaleçam a resiliência” (UNRRD 2015, p. 12). Assim, o Marco de Ação de Sendai avança ao destacar como prioridade a ‘compreensão do risco de desastre’, e recomenda a educação, o compartilhamento de experiências, lições aprendidas, boas práticas e formações em RRD, “incluindo o uso de mecanismos existentes de formação e aprendizagem entre pares” (UNRRD, 2015, p.15). A Agenda 2030, com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), faz “um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os

dificação do oceano, 8. Carregamento de aerossóis atmosféricos e, 9. Incorporação de novas entidades.

lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade”⁵² e traz no ODS 13.3. “melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima” (ONU, 2015, p.32).

A análise dos documentos evidencia que, apesar de bem-intencionados e impulsionarem as agendas internacionais, eles apresentam limitações no tratamento da educação. Em todos os casos, a educação é abordada de forma genérica e reducionista, como um instrumento complementar, voltado sobretudo para a conscientização, disseminação de informações ou capacitação técnica — e não como prática emancipatória e política, capaz de questionar o modelo civilizatório vigente e criar caminhos efetivamente transformadores. Essa abordagem, ainda que relevante, revela-se acrítica, não sendo capaz de enfrentar as raízes da emergência climática e socioambiental, pois não problematiza as estruturas socioeconômicas, políticas e culturais que produzem os riscos e vulnerabilidades.

No Brasil, a fragilidade da ERRD e EAC reproduz essas características nos marcos legais, mas a sociedade se manifesta. Se, por um lado, a inclusão da ERRD de modo amplo no ensino formal — anteriormente proposta pela Política Nacional da Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012) por meio de alteração na Lei de Diretrizes e Bases da Educação - LDB (Lei nº 9394/1996) — foi revogada (Trajber & Olivato, 2017), culminando na Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2018) com raras e pontuais referências aos objetivos de aprendizagem relacionados a riscos, desastres e mudanças do clima (Matsuo e Silva, 2021); por outro lado, a mobilização da sociedade civil, com apoio de órgãos governamentais, resultou na elaboração das Diretrizes de Educação Ambiental Climática (2022-2023)⁵³. Esse documento foi criado participativamente para o enfrentamento da emergência climática, e inclui 10 diretrizes que tratam da necessidade de se ter um Programa Nacional de Educação Ambiental Climática, com escala, continuidade, sinergia, acesso a recursos e qualidade a processos

52 <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

53 As Diretrizes de Educação Ambiental Climática foram capitaneadas pelo Fundo Brasileiro de Educação Ambiental (FunBEA) com a parceria do Instituto Clima e Sociedade e do Programa Cemaden Educação - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.

transformadores, e com a priorização da justiça climática com medidas fundamentadas na equidade, inclusão e bem-viver.

Recentemente, foi promulgada a Lei nº 14.926/2024, que dá atenção às mudanças do clima, à proteção da biodiversidade e aos riscos e vulnerabilidades a desastres socioambientais no âmbito da Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/ 1999), sem, contudo, oferecer o necessário aprofundamento, nem diretrizes para sua implementação na educação formal e não-formal.

A ERRD “*deve cuidar sobretudo de evitar que os desastres aconteçam, apoiando a compreensão de suas causas, reduzindo as situações e populações vulneráveis, além de engajar a sociedade para trabalhar em parceria de forma preventiva. E também colaborar na preparação do exercício de autoproteção em situações de emergência que não puderam ser evitadas*” (Sulaiman et al., 2021, p. 143). É a integração entre EAC e ERRD, ao mobilizar a ciência cidadã e a cogestão de riscos, converte-se, portanto, em componente crítico de qualquer estratégia nacional de adaptação (Branco et al., 2025) podendo contribuir para (i) Ampliação da percepção de riscos: instrumentos de ciência cidadã (pluviômetros caseiros, apps de monitoramento) transformam dados locais em conhecimento acionável, catalisando respostas precoces; (ii) Empoderamento e coesão social: processos formativos participativos fortalecem redes de apoio, fundamentais para evacuações seguras e reconstrução pós-evento; (iii) Governança multinível: ao articular escolas, defesas civis, universidades e governos locais, a educação cria canais de comunicação horizontal que potencializam políticas nacionais de adaptação; (iv) Promoção da justiça climática: currículos críticos abordam desigualdades de raça, gênero e território, qualificando decisões que visem proteção de grupos em maior risco (crianças, idosos, populações negras e indígenas).

Os cenários concretos que seguem foram organizados por tipo de impacto e detalhados com local, ações e resultados. Embora sem a intenção de ser uma lista exaustiva, as práticas arroladas visam mostrar que a Educação em Redução de Riscos de Desastres tem impactos mensuráveis em termos de mudança de atitude, construção de saberes, formulação de políticas ou mesmo salvamento de vidas humanas. Apesar de dispersos, os cenários oferecem evidências sólidas para defender a ampliação dessas abordagens em currículos escolares, formação de professores e ações intersetoriais em todo o território nacional.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. D. F.; CATALDI, M. (2021). Social and environmental vulnerability in Southeast Brazil associated with the South Atlantic Convergence Zone. *Natural Hazards*, 109(1), 481-503. <https://doi.org/10.1007/S11069-021-04926-Z>
- AIRES, M.; MARTINS, C. L. F.; CURY, G. S. A.; FERNANDES, P. J. F.; OLIVEIRA, J. L. F. Simulação numérica do desastre de origem natural ocorrido em janeiro de 2011 no município de Nova Friburgo, RJ, utilizando o modelo BRAMS. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 65, n. 2, p. 217-235, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG217449994>.
- ALCÂNTARA, E.; MARENGO, J. A.; MANTOVANI, J. E.; LONDE, L. R.; SAN, R. L. Y.; PARK, E.; LIN, Y. N.; WANG, J.; MENDES, T.; CUNHA, A. P.; PAMPUCH, L.; SELUCHI, M.; SIMÕES, S.; CUARTAS, L. A.; GONCALVES, D.; MASSI, K.; ALVALÁ, R.; MORAES, O.; SOUZA FILHO, C.; MENDES, R.; NOBRE, C. A. (2023). Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1157-1188.
- ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, v. 321, n. 5895, p. 1481-1484, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1160787>.
- ALTAFINI, D.; BRAGA, A. C.; UGALDE, C. Mapping Urban Flood-Prone Areas' Spatial Structure and Their Tendencies of Change: A Network Study for Brazil's Porto Alegre Metropolitan Region. *Cartographica*, v. 58, n. 4, p. 258-275, 2023.
- ALVES, L. G. S.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. C.; NUMMER, A. V. Analysis of the 2022 Petrópolis landslide disaster. *Landslides*, v. 20, n. 10, p. 2287-2307, 2023.
- ANGELINE G. Pendergrass, What precipitation is extreme?. *Science* 360,1072-1073(2018).DOI:10.1126/science.aat1871
- ARAI, M. (2006). A grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Série Científica*, v. 6, n. 2, 1 – 6.
- AVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A. B.; BROMWICH, D. H.; AMORIM, M. C. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 11, 114029, 2016.
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V. H.; JUSTINO, F.; TORRES, R. R.; WILSON, A. B. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, [S. l.], v. 55, n. 5-6, p. 1403, 2020DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- BALLARIN, A.; WENDLAND, E.; ZAERPOUR, M.; HATAMI, S.; NETO, A. A. M.; PA-PALEXIOU, S. M. (2024). Frequency Rather Than Intensity Drives Projected Changes of Rainfall Events in Brazil. *Earth's Future*, 12(1)

BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J. C.; PATTNAYAK, K. C. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, [S. l.], v. 4, n. eaat8785, p. 1-7, set. 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aat8785

BATTISTI, R.; DAPPER, F. P.; SILVA, A. C. S.; MESQUITA, M.; SILVA, M. V. da; ANDRADE, R. R.; LOPES, A. G. C. Assessing Precipitation Trends Between 1960 and 2021 Using Multiple Trend Indexes in the Goiás State and Federal District, Brazil. *International Journal of Climatology*, [S. l.], v. 45, n. 5, p. e8750, abr. 2025. DOI: 10.1002/joc.8750

BELTRAMIN, K. K.; MORAIS, E. S. Fluvial adjustments due to straightening and inadequate management of urban drainage: the Maringá Stream catchment, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 25, n. 3, p. 45-62, 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: MCTI, 2020. 57 p. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4782>. Acesso em: 01 ago. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Brasília, DF: MMA, 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: MCTI, 2016. Disponível em: <https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4312>.

BONINI, J. E.; ROSS, J. L. S.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. (2021). Escorregamentos rasos em São Luiz do Paraitinga (SP, Brasil) (2009-2010). *Physisterrae*, 2(1), 187-217.

CAMARINHA, P. I. M. ; DEBORTOLI, N. S. ; RODRIGUES, R. . Natural Disasters Caused by Water. In: MCTI - Ministry of Science, Technology and Innovation. (Org.). Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1ed. 2016, v. 2, p. 145-159.

CAMARINHA, P. I. M. Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da Serra do Mar. 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.19.03.49/doc/publicacaquarta.comuo.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2025.

CANIL, K.; LAMPIS, A.; SANTOS, K. L. Vulnerability and the social construction of risk: a contribution to planning in the São Paulo Macrometropolis. *Environmental Science & Policy*, v. 108, p. 55-64, 2020.

CINTI, T. M.; MARQUES, M. L. Associação entre suscetibilidade à inundação e desenvolvimento da área urbanizada de Campinas-SP. *Seminário Internacional de Investigação em Urbanismo*, v. 12, n. 2, 2020.

CLARKE, B.; BARNES, C.; RODRIGUES, R.; ZACHARIAH, M.; ALVES, L. M.; HAAR-SMA, R.; PINTO, I.; YANG, W.; VAHLBERG, M.; VECCHI, G.; IZQUIERDO, K.; KIMU-TAI, J.; OTTO, F. E. L. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil. London: Grantham Institute, Imperial College London, 2024. Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/>. Acesso em: 07 ago. 2025.

COSTA, J. J. *et al.* Vulnerabilidades socioambientais à ocupação urbana: uma análise de Blumenau (SC) e Aracaju (SE). *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 14, n. 4, p. 56-75, 2020.

COUTINHO, R.Q.; SILVA, M.M. (2005). “Classificação e Mecanismos de Movimento de Massa”. Conferência. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Salvador, Bahia.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C. B.; CRESPO, N. M.; LUIZ, R.; CHIQUETTO, J. B.; MARQUES, M. T. A.; *et al.* Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, n. 1, e15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/CL12.15>.

DEBORTOLI, N. S. ; CAMARINHA, P. I. M. ; RODRIGUES, R. ; MARENGO, J. A. . Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais no Brasil, no contexto das Mudanças Climáticas. In: Breno Simonini Teixeira; Jose Antonio Marengo Orsini; Márcio Rojas da Cruz. (Org.). *Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil*. 1ed. Brasília: MCTI, 2016, v. 1, p. 321-386.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A. ; RODRIGUES, R. . An index of Brazil’s vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards (Dordrecht)*, v. 85, p. 1-25, 2017.

DREXLER, A. H., & MEISENZAHN, R. (2024). Special issue on climate change and natural disasters. *Journal of Risk and Insurance*, 91(2), 255-261. <https://doi.org/10.1111/jori.12474>

DONAT, M. G.; LOWE, T. R.; ALEXANDER, L. V.; FISCHER, E. M. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 508–513, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>.

DOS SANTOS L. O. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; GELI, H. M. E.; QUERINO, C. A. S.; RUHOFF, A. L.; IVO, I. O.; NETO, N. L. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. *Atmosphere*, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 426, 2023. DOI: 10.3390/atmos14030426.

DOS SANTOS, D. C., SANTOS, C. A. G., BRASIL NETO, R. M., DA SILVA, R. M., & DOS SANTOS, C. A. C. (2023). Precipitation variability using GPCC data and its relationship with atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. *Climate Dynamics*, 61(5-6), 2717-2738. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06838-z>

DUNN, R. J. H.; HEROLD, N.; ALEXANDER, L. V.; DONAT, M. G.; ALLAN, R.; BADDOR, M.; BRUNET, M.; CHENG, V.; Ibadullah, W. M. W.; Ibrahim, M. K. I. B.; KRUGER, A.; KUBOTA, H.; LIPPMANN, T. J. R.; MARENGO, J.; MBATHA, S.; MCGREE, S.; NGWENYA, S.; CAICEDO, J. D. P.; RAMOS, A.; SALINGER, J.; VAN DER SCHRIER, G.; SRIVASTAVA, A.; TREWIN, B.; YÁÑEZ, R. V.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.; JIMÉNEZ, C. V.; VOSE, R.; YUSSOF, M. N. A. B. H.; ZHANG, X. Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices: An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, [S. l.], v. 11, p. e2023EA003279, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>.

EMBERSON, R., KIRSCHBAUM, D., & STANLEY, T. (2021). Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature Communications*, 12(1), 2262.

FERNANDES, L.G.; RODRIGUES, R. R. Changes in the patterns of extreme rainfall events in southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1337-1350. 2018

FERREIRA, K.; ABIKO, A. K. Urban Resilience and Landslide Risk Management: The Case of Santos (Brazil). In: *Resilience and Urban Disasters*, p. 245-264. Springer, 2019.

G1. Chuva que caiu em 24 horas no Litoral Norte foi o maior registro da história do Brasil. *G1 Globo*, 20 fev. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/20/chuva-que-caiu-em-24-horas-no-litoral-norte-foi-o-maior-registro-da-historia-diz-governo-de-sao-paulo.ghtml> Acesso em: 9 ago. 2025.

GIMENO, L., SORÍ, R., VÁZQUEZ, M., STOJANOVIC, M., ALGARRA, I., EIRAS-BARCA, J., GIMENO-SOTELO, L., & NIETO, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611. <https://doi.org/10.1002/wat2.1611>

GLOOR, M.; BRIENEN, R.J.W.; GALBRAITH, D.; FELDPAUSCH, T.R.; SCHÖNGART, J.; GUYOT, J.-L.; ESPINOZA, J.C.; LLOYD, J.; PHILIPS, O.L. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters* 40: 1729-1733.

HACKMAN, L., Mack, P., Ménard, H., Behind every good research there are data. What are they and their importance to forensic science, *Forensic Science International: Synergy*, Volume 8, 2024, 100456, ISSN 2589-871X, <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2024.100456>.

HAMDAN, A., ALHAMAD, I. M., IKEMBA, S., & EWIM, D. R. (2023). Predicting future global temperature and greenhouse gas emissions via LSTM model. *Sustainable Energy Research*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40807-023-00092-x>

HIRYE, M. C. M.; ALVES, D. S.; FILARDO, A. S.; MCPHEARSON, T.; WAGNER, F. Assessing Landslide Drivers in Social-Ecological-Technological Systems: The Case of Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. *Remote Sensing*, v. 15, n. 12, 3048, 2023.

HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C. T. Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 7, n. 2, p. 111-122, 2016.

IMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNANDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1-2, p. 121-135, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00704-009-0207-9>.

IPCC. *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: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

IPCC. *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: Cambridge University Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. *Natural Hazards*, v. 113, n. 2, p. 1165-1198, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>.

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I.; ALVES, L. M.; DINIZ, F.; BETTS, R. A. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*, [S. l.], v. 3, p. 610433, mar. 2021. DOI: 10.3389/fclim.2021.610433.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J.-C.; FU, R.; JIMENEZ MUÑOZ, J. C.; ALVES, L. M.; DA ROCHA, H. R.; SCHÖNGART, J. Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *Acta Amazonica*, [S. l.], v. 54, p. e54es22098, 2024. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M. E.; CAMARINHA, P. I.; DOLIF, G.; SPERLING, V. B.; ALCÂNTARA, E. H.; RAMOS, A. M.; ANDRADE, M. M.; STABILE, R. A. & JOSÉ. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, [S. l.], v. 120, n. 8, p. 7997-8024, jun. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06558-5

MARENGO, J. A.; DOLIF, G.; CUARTAS, A.; CAMARINHA, P.; GONÇALVES, D.; LUIZ, R.; SILVA, L.; ALVALA, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MORAES, O. L.; SOARES, W. R.; NOBRE, C. (2024) O maior desastre climático do Brasil: Chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, 38(112), 203-228.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, bacia hidrográfica do Arroio Santa Isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 1, p. 27-42, 2016.

MARTINI, L. C. P. Changes in rainfall patterns in southern Brazil over 1961-2020 period detected by rain gauge data. *International Journal of Climatology*, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 1195-1208, fev. 2022. DOI: 10.1002/joc.7804.

MATTOS, T. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRUNO, L. S.; OLIVEIRA, N. D.; VASCONCELOS JÚNIOR, J. G.; LUCAS, M. C. Improving Urban Flood Resilience under Climate Change Scenarios in a Tropical Watershed Using Low-Impact Development Practices. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S. l.], v. 26, n. 12, p. 5021031, dez. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002143.

MEDEIROS, F. J. de; OLIVEIRA, C. P. de. Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, v. 43, n. 9, p. 3927-3948, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7759>.

MORAES, R. B. F. de; GONÇALVES, F. V. Development, Application, and Validation of the Urban Flood Susceptibility Index. *Water Resources Management*, [S. l.], v. 38, p. 2511-2525, 2024. DOI: 10.1007/s11269-024-03782-3

MORAES, O. L. L. (2023a) Proposing a metric to evaluate early warning system applicable to hydrometeorological disasters in Brazil. *Int J Disaster Risk Reduct* 87:103579. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103579>

MORAES, O. L. L. (2023b). An impact-based forecast system developed for hydrometeorological hazards. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 93, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103803>

MORAES, O. L. L. and LACERDA, R. S., The prevalence of objectivist risk in official DRR terminology and a consistent mathematical equation to define it, Interna-

tional Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 104, 2024, 104396, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104396>.

OLIVEIRA, T. G.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, R. M. Propriedades geológico-geotécnicas de um solo coluvionar em encosta natural cortada por uma dutovia. *Geociências*, v. 38, n. 4, p. 1013-1028, 2020.

ORLANDI SIMÕES, J. V.; ALVES, L. M.; PEDRA, G. U.; *et al.* Spatio-temporal assessment of extreme precipitation events in southeastern Brazil. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 11, p. 212, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02396-x>.

OSUTEYE, E., JOHNSON, C., & BROWN, D. (2017). The data gap: An analysis of data availability on disaster losses in sub-Saharan African cities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 26, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.026>

PICANÇO, J. L.; MESQUITA, M. J. M.; SOARES, L. F. The Hydrological Disasters Through Historical Survey in the Serra do Mar Range, Southern Brazil. In: *Advancing Culture of Living with Landslides*, p. 1007-1014. Springer, 2017.

PILLAR, V. D.; OVERBECK, G. E. A diversidade da vegetação no Sul do Brasil: padrões e processos. In: *SIMPÓSIO SOBRE A VEGETAÇÃO DO SUL DO BRASIL, 2024, Curitiba. Anais...* Curitiba: UFPR, 2024. p. 100-115.

PINHO, P.; SILVESTRINI, R. A.; FELLOWS, M.; PEREZ, L. P.; ALENCAR, A.; GUYOT, C.; MOUTINHO, P.; LAPOLA, D. M.; STRINGER, L. C. (2024). Escalating Climate Disasters in the Amazon (2006-2022): Vulnerabilities and Compound Risks. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5045887/v1>

PINTO, T. A. C.; MATTOS, E. V.; REBOITA, M. S.; SOUZA, D. O. D.; ODA, P. S. S.; MARTINS, F. B.; BISCARO, T.; FERREIRA, G. W. D. S. Synoptic and mesoscale atmospheric patterns that triggered the natural disasters in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil, in January 2020. *Atmosphere*, v. 16, n. 1, p. 102, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16010102>.

PUGAS, A. F.; SILVA, A. P. B.; SILVA, E. B.; ROLDAO, H. P.; QUADRO, M. F. L.; VICTOR, A.; MUZA, M. N. Analysis of Temporal Precipitation Variability in the State of Santa Catarina-Brazil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 34, p. 51-78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17164>.

RAMOS, C. M.; TORRES, A. P.; PEREIRA, I. N. A.; FROTA, C. A. Geotechnical Characteristics of Mass Movements in Manaus - AM. *International Journal for Innovation Education and Research*, [S. l.], v. 7, n. 12, p. 15-25, 2019. <http://dx.doi.org/10.31686/ijer.Vol7.Iss12.1838>

RODRIGUES, R. R.; MARINHO, D. F.; MATTOS, M. L. A. Impactos climáticos e variabilidade dos eventos extremos no Sul do Brasil. *Climatologia Brasileira*, v. 34, n. 2, p. 45-60, 2018.

SAITO, S. M. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 30, n. 2, p. 227-251, 2018.

SANTANA, R. A.; TOTA, J.; SANTOS, R. M.; VALE, R. S. Jatos de baixos níveis no sudoeste da Amazônia. *Ciência e Natureza*, v. 35, n. 2, p. 57-66, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X11684>.

SANTOS. Plano de Ação Climática de Santos (PACS). Santos, SP: Prefeitura Municipal de Santos, 2022. Disponível em: https://www.adaptacao.eco.br/_biblioteca/plano-de-acao-climatica-de-santos-pacs-relatorio-completo/. Acesso em: 25 jul. 2025.

SANTOS, D. J. dos; PEDRA, G. U.; SILVA, M. G. B. da; JÚNIOR, C. A. G.; ALVES, L. M.; SAMPAIO, G.; MARENGO, J. A. Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C. *Sustainability in Debate-Brasília, Brasília*, v. 11, n. 3, p. 57-73, dez. 2020. DOI: 10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933

SEIGERMAN, C. K., LEITE, N. S., MARTINS, E. S. P. R., & NELSON, D. R. At the extremes: Assessing interrelations among the impacts of and responses to extreme hydroclimatic events in Ceará, Northeast Brazil. *Journal of Hydrology*, 630, 130850. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130850>

SILVA, J. F. M.; OBESO, M. P.; MAKRAKIS, M. C.; MAKRAKIS, S. Environmental analysis of land use and occupation in nine watersheds contributing to the Iguaçu River, Brazil. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, e34868, 2022.

SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, V. S. Case study of intense mesoscale convective systems occurred between 02 and 03 January 2013 in the state of Rio de Janeiro: Structural and thermodynamic characteristics. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, p. 57-76, 2016. DOI: https://doi.org/10.11137/2016_2_57_76.

SOUZA, C. M. M. *et al.* Social environmental vulnerability approach on the COVID-19 epoch: a case study in Blumenau (SC), Brazil. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, e239101018739, 2021.

SOUZA, D. C.; CRESPO, N. M.; SILVA, D. V.; HARADA, L. M.; GODOY, R. M. P.; DOMINGUES, L. M.; LUIZ, R.; BORTOLOZO, C. A.; METODIEV, D.; ANDRADE, M. R. M.; HARTLEY, A. J.; ABREU, R. C.; LI, S.; LOTT, F. C.; SPARROW, S. (2023). Extreme rainfall and landslides as a response to human-induced climate change: a case study at Baixada Santista, Brazil, 2020. *Research Square*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06621-1>

STOTT, Peter A.; CHRISTIDIS, Nikolaos; OTTO, Friederike E. L.; SUN, Ying; VANDERLINDEN, Jean-Paul; VAN OLDENBORGH, Geert Jan; VAUTARD, Robert; VON STORCH, Hans; WALTON, Peter; YIOU, Pascal; ZWIERS, Francis W. Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 23-41, 2016. DOI: 10.1002/wcc.380.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R. G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20° S. *Deep-Sea Research*, v. 37, n. 12, p. 1875-1886, 1990. DOI: 10.1016/0198-0149(90)90083-8.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J.; SMITH, L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dynamics*, v. 20, n. 7, p. 741-758, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-002-0300-7>.

VIEIRA, B. C.; SOUZA, L. M.; ALCALDE, A. L.; DIAS, V. C.; BATEIRA, C.; MARTINS, T. D. Debris flows in southeast Brazil: susceptibility assessment for watersheds and vulnerability assessment of buildings. Universidade de Lisboa, 2019.

VINCENT, L. A. *et al.* Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of South America 1960-2014. *Journal of Climate*, v. 33, n. 21, p. 9499-9513, 2020. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-1012.1.

WANG, X.-Y.; LI, X.; ZHU, J.; TANAJURA, C.A.S. 2018. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environmental Research Letters* 13: 94015. doi:10.1088/1748-9326/aadbb9

WORLD WEATHER ATTRIBUTION. Rapid attribution analysis of extreme weather events. 2023. Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/>. Acesso em: 01 ago. 2025.

BRANCO, EVANDRO ALBIACH; JESUS, FERNANDA SANTOS MOTA DE; PAZ, MARIANA GUTIERRES ARTEIRO DA; RAYMUNDO, MARIA HENRIQUETA ANDRADE. Educação Ambiental e Sustentabilidades Outras. *Revista Territorial, Goiás, outras*, p. 26-55, 2025. Dossiê: Educação Ambiental e Sustentabilidades Outras. ISSN: 2317-0360.

BRASIL. Educação em clima de riscos de desastres / Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. – reimpr. rev. – São José dos Campos, SP: Cemaden, 2024.

BRASIL. Presidência da República. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. São Paulo: Fundação Carlos Alberto Vanzolini, 2018

MARCHEZINI, V., SAITO, S. M., LONDE, L. R., & DAMACENA, F. D. L. (2025). Implementation challenges of disaster risk management policies: The organizational capacities of municipal civil defense units. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119, 105291.

MATSUO, P. M., & SILVA, R. L. F. (2021). Desastres no Brasil? Práticas e abordagens em educação em redução de riscos e desastres. *Educar em Revista*, 37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-4060.78161>.

MATSUO, P. M. (2023). Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres. Coimbra: RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 159 p. DOI: https://doi.org/10.34037/978-989-9053-17-5_04

ONU - Organização das Nações Unidas. (2015). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 07 Ago. 2025.

RICHARDSON, K., STEFFEN, W., LUCHT, W., BENDTSEN, J., CORNELL, S. E., DONGES, J. F., ... & ROCKSTRÖM, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.

RIO GRANDE DO SUL. Comitê Gestor do Plano Rio Grande. Resolução nº 05/2025, de 1º de julho de 2025. Dispõe sobre as iniciativas encaminhadas pelas secretarias finalísticas à Secretaria da Reconstrução Gaúcha, visando a inclusão na carteira do Plano Rio Grande, Programa de Reconstrução, Adaptação e Resiliência Climática do Estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul: Caderno do Governo, Porto Alegre, p. 13, 1 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1286178>>. Acesso em: 9 ago. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Complementar Nº 16.263, de 27 de Dezembro de 2024. Institui a Política Estadual de Proteção e Defesa Civil - PEPDEC. 2024. Disponível em: <https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1181541>. Acesso em: 30 jul. 2025.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN III, F. S., LAMBIN, E., ... & FOLEY, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

SULAIMAN, S. N.; TRAJBER, R.; MATSUO, P. M.; FERREIRA, K. UM CAMINHO ESTRATÉGICO Educação e engajamento social na construção de comunidades e cidades resilientes. GIRD+10: Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres. Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021(143-151p.)

TRAJBER, Rachel; BRIANEZI, Thaís; BIASOLI, Semíramis. (Coord.). Diretrizes de Educação Ambiental Climática. FunBEA, ICS - Instituto Clima e Sociedade, Cemaden Educação. 2024 (versão eletrônica). Disponível em: <https://educacao.cemaden.gov.br/midioteca/diretrizes-de-educacao-ambiental-climatica/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

UNDRR Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres 2015-2030 <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

UNISDR, Marco de Ação de Hyogo 2005-2015: aumento da resiliência das nações e das comunidades frente aos desastres.

WISNER, BEN & BLAIKIE, PIERS & CANNON, TERRY & DAVIS, IAN. (2004). *At Risk: Natural Hazards*.

10. MUDANÇAS CLIMÁTICAS: IMPACTOS ECONÔMICOS IDENTIFICADOS E PROJETADOS NO BRASIL

Eduardo Amaral Haddad⁵⁴, Andréa Bento Carvalho⁵⁵,
Jaqueline Coelho Visentin⁵⁴

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um dos maiores desafios contemporâneos para o desenvolvimento sustentável, exigindo respostas baseadas em evidências científicas e articulações entre diversas disciplinas. Os impactos projetados para o Brasil, um país de dimensões continentais com forte heterogeneidade socioeconômica e ambiental, reforçam a urgência de desenvolver capacidades técnicas e institucionais voltadas à mitigação, adaptação e formulação de políticas climáticas eficazes.

Nesse contexto, duas iniciativas científicas brasileiras vêm desempenhando um papel fundamental: a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC2). Ambas se consolidaram como plataformas estratégicas de geração e difusão de conhecimento, estruturadas por meio de redes colaborativas e interdisciplinares, envolvendo dezenas de instituições de pesquisa em todas as regiões do país. Com enfoques complementares, essas iniciativas têm contribuído de forma decisiva para a compreensão dos impactos eco-

54 Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, SP.

55 Universidade Federal do Rio Grande. FURG, Rio Grande, RS

Autor correspondente: ehaddad@usp.br

nômicos das mudanças climáticas no Brasil e para a formulação de instrumentos de política pública voltados à transição para uma economia de baixo carbono.

Este capítulo sintetiza os avanços científicos produzidos no âmbito da sub-rede Economia da Rede Clima e do subcomponente de economia do INCT-MC2. Apresentamos aqui as metodologias desenvolvidas, os principais resultados obtidos e as implicações para a agenda climática brasileira, com ênfase nos impactos econômicos regionais, nos instrumentos de mitigação, nas vulnerabilidades socioambientais e na construção de políticas públicas baseadas em evidências.

O texto está organizado da seguinte forma: a segunda seção apresenta o papel da ciência econômica nas mudanças climáticas e a contribuição institucional da Rede Clima e do INCT-MC2. A terceira seção detalha as abordagens metodológicas e modelos analíticos utilizados, com ênfase na complementaridade entre simulações preditivas (*ex-ante*) e mensuração empírica (*ex-post*). Em seguida, são discutidos os principais resultados temáticos, organizados em eixos como agricultura, água, energia, emissões e desigualdades regionais, dentre outros. O capítulo se encerra com uma discussão sobre os caminhos futuros para a ciência econômica do clima no Brasil seguida pela conclusão.

O PAPEL DA CIÊNCIA ECONÔMICA NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas não são apenas um fenômeno ambiental: seus efeitos permeiam sistemas econômicos, produtivos e sociais, afetando padrões de consumo, produção, investimentos, comércio e políticas públicas. Como tal, sua análise exige ferramentas que combinem a complexidade física do sistema climático com as estruturas institucionais, tecnológicas e distributivas da economia.

No Brasil, a constituição de redes de pesquisa como a Rede Clima e o INCT-MC2 foi fundamental para estruturar essa resposta integrada. Criada em 2007, a Rede Clima tem por missão gerar e disseminar conhecimento científico sobre as causas e efeitos das mudanças climáticas globais e regionais, promovendo o apoio à diplomacia climática brasileira, à formulação de políticas públicas e à adaptação dos sistemas sociais, econômicos e naturais.

A sub-rede Economia da Rede Clima, coordenada atualmente por Edson Paulo Domingues (UFMG) e Eduardo Haddad (USP), atua desde sua criação na construção de metodologias aplicadas para análise de impactos socioeconômicos, com destaque para modelagem integrada, simulações de políticas de mitigação e avaliação dos efeitos distributivos das mudanças climáticas.

Complementarmente, o INCT-MC2, em sua Fase 2 (2016-2025), desenvolveu um programa estruturado em torno de eixos temáticos com forte articulação interdisciplinar (Marengo et al., 2025). O subcomponente de economia, coordenado por Eduardo Haddad (USP) e José Féres (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA), consolidou-se como centro de excelência metodológica e analítica, desenvolvendo ferramentas robustas para mensuração de impactos econômicos, modelagem de risco e desenho de instrumentos de adaptação e mitigação.

Entre as contribuições mais relevantes das duas redes destacam-se a produção das primeiras estimativas robustas dos impactos econômicos das mudanças climáticas no Brasil com base em modelos de equilíbrio geral computável (EGC), o desenvolvimento de simulações regionais e setoriais para diversos tipos de eventos climáticos extremos, a integração entre ciência econômica e temas como agricultura, disponibilidade hídrica, energia, saúde e demografia, além da formulação de propostas para mercados de carbono, instrumentos de precificação de emissões e medidas de adaptação baseadas em risco.

Essa atuação tem permitido qualificar o debate público, apoiar estratégias nacionais de desenvolvimento sustentável e ampliar a capacidade do Brasil de se posicionar de forma estratégica em negociações internacionais, como no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

ABORDAGENS METODOLÓGICAS: DA MODELAGEM ESTRUTURAL ÀS EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS

A compreensão dos efeitos econômicos das mudanças climáticas requer a articulação entre diferentes ferramentas analíticas. A sub-rede Economia da Rede Clima e o componente de economia do INCT-MC2 estruturaram suas agendas de pesquisa a partir de dois grandes eixos metodológicos: avaliações *ex-ante*, centradas na modelagem estrutural, e

avaliações *ex-post*, voltadas à análise empírica com identificação causal. A integração entre esses dois eixos fortaleceu a capacidade de diagnóstico, simulação e desenho de políticas públicas em múltiplas escalas, do local ao global.

Avaliações Ex-Ante: Modelos de Simulação

O eixo de avaliações *ex-ante* baseou-se na construção de modelos computacionais para antecipar os efeitos econômicos diretos e indiretos das mudanças climáticas. Utilizando estruturas como as matrizes de insumo-produto inter-regionais, modelos de EGC e Modelos Integrados de Avaliação (IAM), foi possível projetar os impactos sobre setores produtivos e regiões específicas, analisar o efeito de políticas de mitigação e adaptação, simular cenários de escassez hídrica, desastres naturais e transformações tecnológicas, bem como estimar os efeitos distributivos e regionais de eventos climáticos e instrumentos econômicos.

Esses modelos foram aplicados a múltiplas escalas: desde a construção de sistemas inter-regionais para os 27 estados brasileiros e os mais de 5500 municípios do país (com a metodologia IIOAS – Interregional Input-Output Adjustment System), até a adaptação das ferramentas para contextos internacionais como Angola, Chile, Colômbia, Egito, Líbano, Marrocos e México⁵⁶. A capacidade de calibrar os modelos com base em

56 Mais detalhes ver: HADDAD, Eduardo A. Trade and Interdependence in Lebanon: An Interregional Input-Output Perspective. *Journal of Development and Economic Policies*, v. 16, n. 1, p. 5–45, 2014.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* The economic impacts of flooding in Egyptian port cities. Policy Paper. PP02/25. Jan, 2025. Disponível em: <https://www.policycenter.ma/publications/economic-impacts-flooding-egyptian-port-cities>.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Assessing the economic impacts of Al-Haouz earthquake: damages and recovery strategy. 2024.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Economic impacts of the 2023 earthquake in Morocco. 2024.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Uneven integration: the case of Angola. 2020. Disponível em: <www.policycenter.ma>.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Interstate input-output model for Mexico, 2013. *Análisis Económico*, n. 90, p. 7–43, 2020.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Interregional Input-Output Matrix for Colombia, 2012. Bogotá: 2016.

HADDAD, Eduardo Amaral; BONET, Jaime; HEWINGS, Geoffrey J. D. *The Colombian Economy and Its Regional Structural Challenges: A Linkages Approach.*: Springer, 2023.

LEÓN, J. A. *et al.* Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

dados escassos ou incompletos, utilizando procedimentos estatísticos e contábeis, representou um diferencial metodológico relevante.

Dentre as inovações, destaca-se a incorporação de módulos específicos para água, agricultura, carbono e energia, como no modelo BMA-RIA-H₂O, voltado à avaliação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica nas doze regiões hidrográficas brasileiras.

Avaliações Ex-Post: Identificação Causal e Evidência Empírica

Complementarmente, o eixo *ex-post* mobilizou ferramentas econométricas avançadas para mensurar os efeitos observados de eventos climáticos extremos e intervenções públicas sobre variáveis econômicas. Técnicas como Diferenças em Diferenças (DiD), Controle Sintético, Regressão com Descontinuidade e Variáveis Instrumentais foram amplamente utilizadas.

Esse conjunto de métodos permitiu quantificar os impactos de secas, inundações e ondas de calor sobre o Produto Interno Bruto (PIB), o emprego e os preços; avaliar o efeito de políticas públicas de mitigação e regulação ambiental; identificar grupos populacionais e regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas; e estimar elasticidades de resposta à escassez de recursos naturais, como a água.

A Integração dos Eixos e a Geração de Evidência para Políticas Públicas

A força analítica das redes de pesquisa reside na integração entre os dois eixos. A articulação entre a capacidade preditiva dos modelos estruturais e o realismo dos dados empíricos permite validar cenários e calibrar modelos com base em evidência observada, incorporar incertezas e riscos à simulação de políticas públicas, traduzir resultados econômicos em estatísticas acionáveis por gestores públicos e diplomatas, e responder a diferentes escalas de tempo e espaço, desde impactos de longo prazo até choques de curta duração.

Esse modelo de ciência aplicada fortalece o papel da economia como elo entre os sistemas naturais e sociais, oferecendo insumos técnicos cruciais para a formulação de estratégias nacionais e subnacionais de transição climática.

IMPACTOS ECONÔMICOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: EVIDÊNCIAS TEMÁTICAS

Os efeitos das mudanças climáticas sobre a economia brasileira são múltiplos e heterogêneos. Diversos estudos desenvolvidos no âmbito da Rede Clima e do INCT-MC2 apontam que os impactos variam significativamente entre setores e regiões, refletindo desigualdades estruturais, padrões de uso da terra, dependência de recursos naturais e vulnerabilidades socioeconômicas. Nesta seção, organizamos os resultados por grandes temas.

Agricultura: Vulnerabilidade e Transformações Produtivas

A agricultura é um dos setores mais expostos aos efeitos das mudanças climáticas no Brasil, tanto por sua relevância econômica quanto pela sua forte dependência de variáveis como temperatura, regime de chuvas e disponibilidade hídrica. Essa vulnerabilidade é acentuada pela estrutura heterogênea do setor, que combina grandes empreendimentos altamente mecanizados com formas tradicionais de agricultura familiar.

Pesquisas recentes (Tanure, 2020; Souza e Haddad, 2022) revelam que os impactos sobre a produtividade agrícola não são uniformes. Regiões como o Norte e o Nordeste, onde predomina a agricultura familiar, tendem a enfrentar perdas mais severas, especialmente em cultivos como mandioca, milho e feijão. Em contrapartida, culturas como a soja e a cana-de-açúcar, com maior capacidade de adaptação tecnológica e infraestrutura de irrigação, demonstram maior resiliência frente às alterações climáticas.

Projeções indicam que, até o final do século, as perdas no PIB relacionadas aos impactos climáticos sobre a agricultura podem variar entre 0,4% e 1,8% ao ano, conforme o cenário de emissões adotado (RCP 2.6 ou RCP 8.5). Os efeitos indiretos, transmitidos pelas cadeias produtivas e pelos vínculos intersetoriais, tendem a amplificar os prejuízos diretos, reforçando a urgência de políticas de adaptação com abordagem sistêmica.

Nesse contexto, Visentin et al. (2025) propuseram uma abordagem integrada para avaliar os efeitos econômicos das secas sobre a agricultura irrigada em cenários de mudanças climáticas. A estrutura combina diferentes modelos (econométrico, hidrológico, de EGC e de transferência de risco) para captar desde a sensibilidade da produtividade agrícola

à redução de Água Azul até os efeitos econômicos regionais e os custos de prêmios de seguro climático. Os resultados sugerem que mesmo reduções moderadas na disponibilidade hídrica podem desencadear efeitos em cadeia relevantes, impactando não apenas a produção agropecuária, mas também a segurança alimentar nacional.

Outro aspecto importante no debate sobre resiliência agrícola refere-se ao uso de insumos químicos. Estudo de Rodrigues et al. (2023) investigou a produtividade e os efeitos colaterais do uso de pesticidas no Brasil, aplicando modelos de controle de danos e regressão estatística. Os achados apontam para o uso excessivo desses insumos, com mais de 4.000 municípios aplicando doses acima do nível ótimo já em 2006. Além de gerar ineficiências econômicas, esse padrão intensifica riscos ambientais, como a perda de biodiversidade, a emergência de pragas resistentes e a contaminação de recursos naturais. Tais evidências indicam a necessidade de políticas públicas voltadas ao uso racional de pesticidas e à promoção de alternativas sustentáveis de controle fitossanitário.

Embora a maior parte dos estudos sobre impactos climáticos na agricultura se concentre nas zonas rurais, há uma crescente atenção aos efeitos das mudanças climáticas em contextos urbanos. Pesquisa de Oliveira, Palialol e Pereda (2021) mostra que choques de temperatura afetam negativamente a produtividade do trabalho urbano, medida por salários. Esses achados abrem caminho para novos estudos sobre os impactos econômicos das ondas de calor nas cidades brasileiras, com implicações diretas para a formulação de políticas públicas voltadas à saúde, ao planejamento urbano e à redução das desigualdades socioespaciais.

Água: Escassez, Enchente, Vulnerabilidade e Resiliência

A água ocupa posição estratégica na interface entre clima, economia e sociedade. Entre todos os meios de propagação dos efeitos das mudanças climáticas, é provavelmente o mais imediato e tangível, dada sua centralidade para o bem-estar humano, a produção agrícola, a geração de energia e a manutenção dos ecossistemas. No Brasil, alterações no regime hidrológico já são observadas, e projeções indicam que eventos extremos, tais como secas prolongadas e inundações intensas, devem se tornar mais frequentes e severos ao longo do século XXI.

A escassez hídrica desponta como um dos principais vetores de impacto econômico no contexto das mudanças climáticas. O modelo

BMARIA-H2O, desenvolvido no âmbito do INCT-MC2, simula os efeitos da redução da disponibilidade de água sobre as regiões hidrográficas brasileiras e estima perdas econômicas acumuladas de até R\$ 29,7 bilhões até 2099 em cenários mais críticos. Os efeitos são particularmente intensos nas bacias do Atlântico Nordeste Oriental e Ocidental, Parnaíba e São Francisco, com impactos significativos sobre setores intensivos em água, como agricultura irrigada, pecuária, celulose e papel, além dos próprios serviços de água e esgoto.

Estudos como o de Rocha (2022) indicam que a baixa elasticidade-preço da demanda por água dificulta o ajuste espontâneo diante de choques de oferta, transformando a escassez em um gatilho para desequilíbrios econômicos abruptos. A recomendação é clara: fortalecer a governança hídrica, com políticas que combinem infraestrutura, reuso, tecnologias eficientes e mecanismos de precificação justa, como tarifas progressivas e compensações ambientais.

A vulnerabilidade hídrica urbana também exige atenção. No caso da Região Metropolitana de São Paulo, Vieira e Haddad (2020) desenvolveram o índice ponderado de tempo de deslocamento (Weighted TTI), que permite mensurar o impacto de inundações sobre a mobilidade urbana e, por extensão, sobre a produtividade econômica. Combinando dados da plataforma Uber Movement e pesquisas domiciliares de mobilidade, o índice se revela uma ferramenta valiosa para orientar políticas públicas de transporte e adaptação climática em grandes centros urbanos.

Além disso, as interações entre clima, água e produção agrícola são particularmente sensíveis. Simões (2025), por meio de modelos inter-regionais de insumo-produto e equilíbrio geral computável, estimou os impactos econômicos diretos e indiretos das perdas de produtividade agrícola decorrentes de eventos hidrológicos. Seus resultados revelam que perdas diretas de R\$ 8,5 bilhões em culturas como soja, milho e arroz podem desencadear impactos sistêmicos equivalentes a até 0,14% da produção nacional, com multiplicadores médios de 3,5 vezes. Tais efeitos se concentram no interior do país, evidenciando a importância de políticas públicas territoriais e voltadas à resiliência hídrica e produtiva.

Emissões, Consumo e Políticas de Mitigação

O Brasil apresenta uma configuração singular em sua trajetória de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), com forte concentração nos

setores de uso da terra, agropecuária e transportes. Essa composição confere desafios específicos à formulação de políticas de mitigação, que devem considerar não apenas os volumes de emissões, mas também a distribuição setorial e regional dos impactos econômicos associados.

Estudos desenvolvidos nas redes de pesquisa associadas ao INCT-MC2 indicam que há margem para adoção de instrumentos econômicos, tais como mercados de carbono e taxaço sobre emissões, como alternativas mais eficientes ao tradicional comando e controle. A tese de Carvalho (2022) demonstra que, para o cumprimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) brasileiras, os mecanismos de mercado apresentam menor custo econômico agregado, embora impliquem efeitos distributivos que exigem atenção.

Três cenários de política foram testados: (i) mercado de carbono abrangente, com todos os setores; (ii) mercado restrito a subsectores; e (iii) políticas sem flexibilidade, baseadas em metas compulsórias. Os resultados mostram que o mercado amplo é ambientalmente mais eficaz, mas acarreta maior impacto redistributivo. Já o mercado restrito exige preços de carbono mais elevados, afetando mais intensamente setores como a pecuária e o transporte rodoviário.

Simultaneamente, mudanças demográficas e nos padrões de consumo também interferem na dinâmica de emissões. Pesquisas de Carvalho, Santiago e Perobelli (2017, 2018) e Carvalho et al. (2021) revelam que o envelhecimento populacional e o crescimento da renda tendem a reduzir a intensidade de carbono per capita, embora possam desencadear mudanças setoriais que exigem monitoramento contínuo para compatibilizar crescimento econômico e metas ambientais.

A literatura também tem se voltado à análise dos efeitos distributivos de políticas de precificação do carbono. Moz-Christofolletti e Pereda (2021) avaliaram os impactos socioeconômicos de uma hipotética taxaço sobre carbono no Brasil, com base em um modelo híbrido de insumo-produto e um sistema censurado de equações de demanda (QUAIDS). Considerando dois cenários de taxaço (USD 40/tCO₂ e USD 80/tCO₂), os resultados indicam que a medida seria eficaz na redução das emissões, com potencial de queda de até 4,2%, mas apresentaria caráter levemente regressivo, mesmo com a aplicação de transferências compensatórias. A perda de bem-estar varia de 0,06% para os domicílios mais ricos até 0,10% para os mais pobres, evidenciando a importância de calibrar as po-

líticas com mecanismos redistributivos que mitiguem seus efeitos adversos sobre a equidade.

A análise histórica das emissões brasileiras, realizada por Albuquerque et al. (2020), reforça a necessidade de ação. O estudo, baseado nos dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), mostra que, após um período de declínio entre 2004 e 2010, as emissões voltaram a crescer, alcançando 2,17 bilhões de toneladas de CO₂e em 2019, um aumento de 9,6% em relação ao ano anterior. O desmatamento foi responsável por 44% do total, seguido pela agropecuária (28%) e pelo setor energético (19%). Os autores destacam a crescente intensidade de carbono da economia brasileira e a dificuldade de cumprimento das metas pactuadas, como as previstas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Nesse contexto, estratégias de eficiência energética se apresentam como alternativas promissoras. Magalhães e Domingues (2016), utilizando um modelo de equilíbrio geral computável, demonstram que políticas de eficiência energética podem conciliar metas ambientais com desenvolvimento econômico e redução de desigualdades. Os resultados apontam ganhos sociais e ambientais simultâneos, reforçando o potencial dessas políticas como parte de uma transição justa para uma economia de baixo carbono.

Complementarmente, Souza, Ribeiro e Perobelli (2016), com base em uma matriz insumo-produto nacional, estimam os efeitos econômicos de diferentes níveis de redução nas emissões. Os resultados indicam que uma queda de 1% nas emissões totais pode gerar uma redução de até 0,60% na produção agregada, dependendo da rigidez das políticas implementadas. Tais achados reforçam a recomendação de políticas setoriais calibradas, capazes de minimizar custos de transição no curto prazo e, ao mesmo tempo, promover transformações estruturais de longo prazo, compatíveis com os compromissos climáticos do Brasil.

Crescimento Regional e Desigualdades

As mudanças climáticas aprofundam desigualdades regionais historicamente consolidadas no Brasil. As regiões Norte e Nordeste despontam como particularmente vulneráveis, tanto pelos impactos diretos sobre setores sensíveis, como a agricultura e os recursos hídricos, quanto pela limitada capacidade de resposta institucional, financeira e tecnológica.

Pesquisas recentes, como as de Tanure (2020) e Rocha (2022), demonstram que eventuais perdas agregadas do PIB nacional podem ser parcialmente compensadas por ganhos em estados do Sul e Sudeste, como São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul. Contudo, esse aparente reequilíbrio mascara perdas severas de bem-estar nas regiões menos desenvolvidas, sugerindo que as mudanças climáticas têm implicações redistributivas relevantes para o território nacional.

Estudo de Sass (2021) evidencia esse tipo de vulnerabilidade no contexto urbano ao avaliar os efeitos das secas sobre a atividade industrial da Região Metropolitana de São Paulo. Combinando um modelo econométrico e um modelo espacial de equilíbrio geral (baseado na estrutura do modelo BMARIA), a autora identifica maior sensibilidade entre setores intensivos em capital e tecnologia, como o químico, o farmacêutico e o eletrônico. A escassez hídrica afeta diretamente a produtividade desses setores, com repercussões negativas sobre a renda e o emprego em municípios metropolitanos, além de impactos indiretos sobre transporte, construção civil e serviços pessoais. A análise por sub-bacia hidrográfica reforça que os prejuízos econômicos são mais intensos onde a disponibilidade hídrica é mais restrita, sublinhando a urgência de estratégias integradas para mitigar riscos climáticos nas áreas urbanas.

A relevância das assimetrias regionais também foi destacada no Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, divulgado em 2014. Em seu capítulo econômico sobre Impactos, Vulnerabilidade e Adaptação, o relatório consolida evidências empíricas da primeira década do século XXI, com base em modelos econométricos, de equilíbrio geral e simulações climáticas do IPCC (2007). A síntese aponta que os efeitos das mudanças climáticas são altamente heterogêneos entre setores e regiões, com a agricultura e a pecuária entre os mais vulneráveis, particularmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Em contraste, a região Sul tende a apresentar ganhos relativos em determinados cenários, com crescimento projetado de até 2% no PIB regional até 2050, além da migração de culturas como café, mandioca e cana-de-açúcar. Esses deslocamentos geoeconômicos também estariam associados ao aumento da pobreza, da migração interna e da concentração econômica no Centro-Sul do país, exigindo respostas políticas pautadas por justiça territorial e social.

Nesse debate, ganha centralidade a discussão sobre o papel dos recursos naturais no desenvolvimento regional. Haddad e Araújo (2025)

oferecem importante contribuição ao quantificar a relevância da economia azul no Brasil, utilizando um modelo interestadual de insumo-produto para mapear interdependências entre regiões costeiras e interiores. Os resultados revelam que, em 2019, as atividades diretamente ligadas à economia do mar representaram 2,91% do PIB nacional e 1,07% do emprego, com destaque para os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo. Quando considerados os efeitos indiretos, esses valores sobem para 6,39% do PIB e 4,45% do emprego, com multiplicadores expressivos para PIB (2,20) e emprego (4,16). O estudo mostra ainda que estados sem litoral, como Minas Gerais, também se beneficiam por meio de vínculos produtivos, ressaltando a importância de políticas inter-regionais coordenadas para o desenvolvimento sustentável da economia costeira.

Diante dessas evidências, as redes de pesquisa recomendam que as políticas públicas de adaptação climática incorporem critérios distributivos, territoriais e intergeracionais. Instrumentos como fundos compensatórios, investimentos direcionados a regiões mais vulneráveis e redes de proteção social resilientes devem ser parte de uma estratégia mais ampla de transição justa, capaz de reduzir as desigualdades agravadas pela crise climática.

Contribuições para a Formulação de Políticas Públicas e a Adaptação Climática

O papel da ciência econômica não se limita à análise de impactos ou à construção de cenários. Uma de suas missões centrais, especialmente em contextos de crise climática, é fornecer subsídios qualificados para a formulação e avaliação de políticas públicas. Tanto a sub-rede Economia da Rede Clima quanto o subcomponente de economia do INCT-MC2 atuaram diretamente nesse sentido, contribuindo para o desenho de instrumentos de mitigação e adaptação, a orientação de políticas setoriais e o apoio técnico à diplomacia climática brasileira.

Desde a ratificação do Acordo de Paris em 2016, o Brasil assumiu compromissos climáticos progressivos por meio de suas NDCs. As metas mais recentes preveem a redução entre 59% e 67% das emissões líquidas de GEE até 2035, em comparação aos níveis de 2005 (BRASIL, 2024). Para que essas metas sejam alcançadas com responsabilidade e eficiência, é indispensável contar com instrumentos analíticos capazes de estimar os custos, benefícios e impactos distributivos das alternativas de política.

Nesse contexto, as redes de pesquisa apoiadas pela ciência climática brasileira têm desempenhado papel fundamental. Estudos conduzidos no âmbito dessas redes exploraram os efeitos econômicos de diferentes formatos de mercados de carbono (Carvalho, 2022), simularam políticas industriais baseadas em tecnologias limpas (Tanure, Porsse e Domingues, 2021), analisaram impactos setoriais de taxações e subsídios ambientais, e avaliaram os efeitos esperados sobre o bem-estar, o emprego e o crescimento econômico.

As simulações realizadas oferecem subsídios valiosos para orientar políticas públicas, ao evidenciar os trade-offs entre sustentabilidade ambiental, justiça social e viabilidade econômica. Ao informar tomadores de decisão sobre os efeitos diferenciados das políticas climáticas, esses estudos promovem maior transparência, previsibilidade e aderência social às medidas adotadas.

Essas evidências reforçam a importância de um desenho institucional cuidadoso para os instrumentos de precificação de carbono. Ao combinar eficiência ambiental com compensações sociais adequadas, é possível avançar em direção a uma transição ecológica que seja também justa e inclusiva.

Reformas Tributárias e Instrumentos Econômicos

Uma frente emergente de pesquisa tem se concentrado na interseção entre política tributária e sustentabilidade ambiental. Iniciado em 2024 com o apoio do Bezos Earth Fund e do Instituto Clima e Sociedade, um novo projeto tem explorado os possíveis efeitos da reforma tributária brasileira sobre o uso da terra, o desmatamento e a alocação setorial de recursos, a partir da lente da transição ecológica. O objetivo é identificar mecanismos que aliem eficiência econômica à justiça ambiental, por meio de instrumentos como incentivos fiscais a setores de baixo carbono, desoneração de tecnologias limpas e penalizações direcionadas a atividades de alta intensidade de carbono ou associadas ao desmatamento.

Essa agenda responde a uma demanda crescente por políticas fiscais que sejam coerentes com as metas climáticas nacionais, ao mesmo tempo em que fortalece o papel da ciência econômica na concepção de instrumentos regulatórios que promovam inovação, transparência e equidade.

Nesse contexto, Araújo e Féres (2024) analisaram os efeitos de uma medida regulatória específica: a revogação, em fevereiro de 2020, da exigência de autorização prévia para exportações de madeira nativa, promovida por despacho interpretativo do Ibama. Com essa mudança, suspenderam-se também as inspeções físicas das cargas destinadas à exportação. Utilizando modelos de regressão com dados em painel, os autores estimaram um aumento de 10,5% no volume exportado de madeira ainda no ano de 2020, mesmo após o controle por preços e mercados de destino. Os resultados sugerem que a flexibilização regulatória pode ter facilitado a intensificação do comércio (possivelmente ilegal) de madeira nativa, com implicações para o desmatamento.

Complementarmente, Haddad et al. (2024) quantificaram os vetores econômicos da pressão sobre a cobertura florestal na Amazônia Legal, com foco nas demandas doméstica, regional e internacional. Utilizando uma matriz inter-regional de insumo-produto desagregada em 27 regiões da Amazônia Legal, combinada a dados setoriais de emissões e desmatamento, o estudo revela que aproximadamente 60% da área desmatada atende à demanda do restante do país, sobretudo do Centro-Sul. A demanda internacional responde por cerca de 23%, enquanto a demanda local representa apenas 17%. A produção de carne bovina aparece como principal responsável pela perda de cobertura vegetal, respondendo por mais de 93% do desmatamento estimado, majoritariamente voltada ao consumo interno. Os autores defendem que políticas fiscais e regulatórias voltadas à rastreabilidade da produção e à indução de mudanças na estrutura da demanda nacional podem ser decisivas para conter o avanço do desmatamento.

No campo dos instrumentos de mercado, Neto e Remígio (2019) analisaram os aspectos legais, tributários e financeiros relacionados às Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil. O estudo mostra que os elevados custos de transação e a indefinição da natureza jurídica das RCEs impõem obstáculos à expansão desses instrumentos. Em particular, os autores destacam que os proponentes frequentemente antecipam a venda de créditos com deságio elevado, diante de incertezas quanto ao recebimento das receitas e às altas taxas de juros cobradas por instituições financeiras. Além disso, a carga tributária incidente sobre a negociação e o recebimento das RCEs contribui para reduzir sua efetividade econômica. Diante desse quadro, os autores recomendam a construção de um mar-

co legal claro, que proporcione segurança jurídica e estabilidade fiscal, como passo essencial para a consolidação de mecanismos de mercado voltados à transição para uma economia de baixo carbono.

Por fim, a análise de Ruggiero et al. (2022) oferece uma perspectiva inovadora sobre os efeitos de incentivos fiscais ecológicos descentralizados. Os autores avaliaram o impacto do ICMS Ecológico – mecanismo de transferência fiscal que recompensa municípios pela manutenção de áreas protegidas – na criação de novas unidades de conservação na Mata Atlântica. Utilizando uma abordagem econométrica de diferenças em diferenças (DiD) com dados de 1.467 municípios entre 1987 e 2016, o estudo identificou efeitos positivos, sobretudo na criação de áreas protegidas menos restritivas e de baixo custo, especialmente quando propostas em nível municipal. Os resultados reforçam o papel potencial de instrumentos fiscais intergovernamentais na indução de comportamentos ambientais desejáveis em contextos subnacionais, desde que desenhados com atenção às capacidades institucionais e aos incentivos locais.

Diplomacia Climática e Negociações Internacionais

As redes de pesquisa também têm atuado como suporte técnico qualificado à presença brasileira em fóruns multilaterais. Os modelos desenvolvidos, especialmente aqueles com detalhamento regional, possibilitam avaliar os efeitos das políticas climáticas internacionais sobre a economia brasileira, antecipando riscos para cadeias produtivas e identificando oportunidades associadas à transição para mercados mais sustentáveis.

Além disso, os dados e evidências gerados pelos pesquisadores têm subsidiado relatórios técnicos, construído posições de negociação e fundamentado argumentos levados aos processos conduzidos pela UNFCCC, ampliando a capacidade estratégica do Brasil na arena diplomática.

A incorporação de ferramentas de modelagem econômica calibradas à realidade brasileira fortalece a legitimidade da participação nacional em negociações internacionais, ao mesmo tempo em que contribui para o alinhamento técnico das decisões internas com os compromissos assumidos no Acordo de Paris.

Nesse contexto, Luedemann, Marengo e Klug (2016) destacam o papel central das cidades como atores estratégicos nos esforços de mitigação e adaptação climática. Os autores analisam a trajetória de polí-

ticas públicas nacionais como o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres e a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), ambos lançados em 2011, como exemplos de abordagens integradas e multiescalares. Essas iniciativas reforçam a resiliência urbana e fornecem uma base técnica para a atuação internacional do Brasil em temas de adaptação.

A experiência brasileira, nesse sentido, é apontada como referência relevante para países em desenvolvimento, especialmente aqueles com padrões de urbanização semelhantes. O estudo também ressalta o potencial transformador da cooperação internacional entre cidades da América Latina, Ásia e África, espaços nos quais as vulnerabilidades sociais e ambientais se entrelaçam. Essa articulação sul-sul é vista como uma via promissora para fortalecer capacidades locais e construir soluções climáticas centradas na redução de desigualdades.

Integração com o Setor Financeiro e Bancos de Desenvolvimento

Outro avanço relevante tem sido a incorporação de critérios climáticos nos processos de análise de crédito e investimento, em parceria com instituições financeiras públicas como o Banco do Nordeste. Foram desenvolvidas ferramentas para estimar pegadas de carbono, consumo hídrico e intensidade energética por cadeia produtiva, bem como para avaliar riscos climáticos em projetos financiados e integrar critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) às decisões financeiras (Haddad et al., 2024d).

Essas inovações respondem diretamente ao Artigo 2.1.c do Acordo de Paris, que prevê a necessidade de alinhar os fluxos financeiros com uma trajetória de desenvolvimento de baixas emissões e resiliência climática. Ao traduzirem os riscos e oportunidades climáticas em métricas operacionais, essas ferramentas aproximam o sistema financeiro dos compromissos de transição ecológica.

Tozato et al. (2019) discutem os desafios metodológicos e institucionais para identificar e rastrear os gastos públicos relacionados ao clima no Brasil, à luz das obrigações assumidas em acordos internacionais como as Ações Nacionalmente Apropriadas de Mitigação (NAMAs) e as NDCs. A partir de uma análise documental e entrevistas com atores-chave, os autores destacam a fragmentação das informações orçamentárias

e a ausência de mecanismos sistemáticos para contabilização de despesas climáticas.

A pesquisa mostra que, embora o país tenha desenvolvido experiências pontuais, como o marcador “Agenda Clima” no Plano Plurianual 2012-2015 e parcerias com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), ainda prevalece a dificuldade de distinguir e qualificar gastos climáticos no orçamento público. Essa limitação compromete a transparência, o planejamento de longo prazo e a consistência das ações climáticas. Os autores também alertam para a coexistência de subsídios a combustíveis fósseis com iniciativas de mitigação, o que pode minar os avanços rumo a uma economia de baixo carbono.

Esses resultados reforçam a importância de um sistema de classificação orçamentária que permita identificar ações positivas e negativas para o clima, bem como de marcos regulatórios claros que orientem os investimentos públicos. O fortalecimento da governança fiscal climática é condição essencial para mobilizar recursos de forma coerente com os compromissos nacionais e internacionais.

CAMINHOS PARA O AGORA: INOVAÇÃO, JUSTIÇA CLIMÁTICA E INTEGRAÇÃO INTERDISCIPLINAR

A consolidação da ciência econômica do clima no Brasil nas últimas duas décadas representa uma conquista significativa. No entanto, os desafios futuros exigem avanços ainda mais ambiciosos, tanto do ponto de vista metodológico quanto institucional. As redes de pesquisa têm papel fundamental não apenas na geração de evidências, mas também na articulação entre ciência, política e sociedade. Nesta seção, destacamos três vetores estratégicos para o fortalecimento dessa agenda: inovação metodológica, justiça climática e integração interdisciplinar.

Inovação Metodológica: Dados, Modelos e Tecnologias

O aprofundamento dos impactos climáticos e a complexificação das dinâmicas econômicas exigem o contínuo aprimoramento dos modelos analíticos. Entre as direções prioritárias, destacam-se: a integração multiescalar, com modelos que combinem diferentes níveis geográficos – como municípios, estados, bacias hidrográficas e regiões econômicas

– preservando o detalhamento setorial; a modelagem acoplada, por meio de IAM, que articulam sistemas econômicos, hidrológicos, climáticos e ecológicos – como no modelo BMARIA-H2O e nas simulações desenvolvidas em Visentin et al. (2025), voltadas à formulação de seguros multianuais contra eventos hidrológicos extremos; o uso de *big data* e técnicas de aprendizado de máquina, para enriquecer bancos de dados, detectar padrões não-lineares e melhorar a capacidade preditiva dos modelos; e, por fim, a incorporação explícita de incertezas e riscos, por meio de simulações probabilísticas, cenários estocásticos e análises de sensibilidade, que ampliam a robustez das recomendações para políticas públicas.

Além disso, é fundamental fortalecer e expandir plataformas de dados abertos e ferramentas de simulação acessíveis, capazes de instrumentalizar gestores públicos, formuladores de políticas e organizações da sociedade civil. Democratizar o acesso a essas ferramentas significa ampliar o potencial de resposta da sociedade frente aos desafios climáticos, promovendo a apropriação local da ciência e a construção coletiva de soluções.

O estudo Economia do Clima (Margulis e Dubeux, 2011) desponta como referência nacional no uso de modelagem integrada e multissetorial voltada à análise de impactos econômicos do clima. Em escala internacional, destacam-se iniciativas metodológicas inovadoras como a de León, Haddad e Araújo (2022), que, embora aplicada ao contexto de desastres geológicos e não ao Brasil, apresenta uma estrutura acoplada capaz de capturar os efeitos em cadeia de eventos extremos sobre a economia, revelando potencial de adaptação para cenários climáticos. O uso combinado de modelos inter-regionais multissetoriais e redes complexas de propagação de choques ilustra como abordagens híbridas podem avançar a fronteira do conhecimento e servir de base para medidas adaptativas, como sistemas de seguros e redes de proteção socioeconômica.

Justiça Climática: Desigualdades, Inclusão e Responsabilidades

Os efeitos das mudanças climáticas não são neutros: afetam de maneira desproporcional os mais pobres, as regiões periféricas e grupos historicamente vulnerabilizados. A ciência econômica deve, portanto, contribuir para uma abordagem de justiça climática por meio da análise dos impactos distributivos de políticas climáticas, considerando variáveis como renda, raça, gênero, localização geográfica e acesso a bens públi-

cos; para construção de instrumentos compensatórios, como transferências condicionadas, fundos de adaptação e mecanismos de seguridade voltados às populações em risco; e dar atenção à economia informal e às cadeias produtivas locais, frequentemente ausentes nos modelos tradicionais, mas essenciais para a resiliência comunitária.

A incorporação da justiça climática como princípio estruturante amplia a legitimidade das políticas públicas e assegura que a transição para uma economia de baixo carbono ocorra de maneira justa e inclusiva.

Integração Interdisciplinar: Uma Nova Arquitetura da Pesquisa

As experiências da Rede Clima e do INCT-MC2 demonstram que os maiores avanços científicos decorrem da colaboração entre diferentes áreas do conhecimento. Superar os silos disciplinares é condição indispensável para lidar com a complexidade dos desafios climáticos contemporâneos.

Formar uma nova geração de pesquisadores requer ambientes de pesquisa colaborativos, com acesso a métodos variados, inserção em redes internacionais e foco na resolução de problemas concretos. Iniciativas como o Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa (ONSEAdapta) sinalizam esse caminho, ao integrar engenharia, ciências naturais, economia e políticas públicas.

A construção dessa nova arquitetura interdisciplinar demanda também o fortalecimento da comunicação científica. Dados e modelos precisam ser compreensíveis, acessíveis e aplicáveis por gestores públicos, atores privados e organizações da sociedade civil. Um exemplo emblemático é o trabalho de Zatz (2025), que integra comunicação e economia ao apresentar, em formato jornalístico, indicadores da economia do mar no Brasil aliados a narrativas locais, como a da comunidade caiçara. Outro exemplo relevante é o estudo de Tafarello et al. (2025), que articula educação e economia na análise de práticas pedagógicas voltadas à gestão adaptativa da água doce e costeira. O trabalho investiga como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 14 e 15 podem ser incorporados ao ensino básico, propondo estratégias didático-pedagógicas alinhadas ao Planejamento Espacial Marinho (PEM), ao Currículo Azul e a instrumentos econômicos de incentivo à conservação.

Essas experiências reforçam que a ciência econômica do clima deve ser construída em diálogo com outros saberes e setores sociais, formando uma base comum de conhecimento orientada à ação.

CONCLUSÃO: O PAPEL DA ECONOMIA NA TRANSIÇÃO CLIMÁTICA BRASILEIRA

A emergência climática é um desafio civilizatório. Para enfrentá-lo, é preciso alinhar os sistemas produtivos, institucionais e financeiros a um novo paradigma de desenvolvimento sustentável e inclusivo. A economia, como ciência social aplicada, possui instrumentos poderosos para identificar as causas, mapear os impactos e propor soluções para a crise climática, desde que mobilizada com rigor técnico, sensibilidade social e compromisso com o bem comum.

Neste capítulo, apresentamos uma síntese das principais contribuições da Rede Clima e do INCT-MC2, duas iniciativas centrais na construção de uma ciência climática brasileira robusta e orientada à ação. Mostramos como essas redes desenvolveram modelos analíticos sofisticados, capazes de antecipar impactos econômicos, avaliar políticas públicas e simular cenários climáticos; evidenciaram as desigualdades regionais e setoriais nos efeitos das mudanças climáticas sobre o Brasil; ofereceram subsídios concretos para a formulação das NDCs e para a atuação diplomática do Brasil em fóruns internacionais; promoveram a integração entre academia, governo, setor produtivo e sociedade civil; e articularam uma nova geração de pesquisadores e ferramentas, capazes de responder aos desafios emergentes com inovação e compromisso ético.

As evidências apresentadas indicam que o Brasil tem capacidade técnica, institucional e científica para liderar soluções climáticas ambiciosas. No entanto, essa capacidade precisa ser traduzida em políticas públicas consistentes, estratégias de financiamento adequadas e um pacto social que coloque a sustentabilidade ambiental no centro da agenda nacional.

A 30ª Conferência das Partes da UNFCCC (COP-30), a ser realizada em solo brasileiro, representa uma oportunidade histórica para reposicionar o país como referência global na luta contra as mudanças climáticas. A ciência econômica, ao contribuir com dados, modelos e argumentos, pode e deve ser um dos pilares dessa liderança.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE *et al.* Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019. 2020. Observatório do Clima. Disponível em: <http://seeg.eco.br>. Acesso em: 10/07/2025.

ANDRADE, Israel.; CARVALHO, Andrea B. Planejamento Espacial Marinho como ferramenta de gestão de política pública para a Amazônia Azul. Textos para Discussão. IPEA. Brasília, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/3dcdd7d5-9978-4b0f-8627-127b8811afa5/content>. Acesso em: 10/07/2025.

ARAÚJO, Cláudio; FÉRES, José Gustavo. Passando a boiada: efeitos da suspensão da inspeção de exportações de produtos de madeira nativa. Radar: tecnologia, produção e comércio exterior: n. 75.: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 29 abr. 2024.

BRANCO, Danyelle; FÉRES, José. Weather shocks and labor allocation: evidence from Northeastern Brazil. Anais do 45º Encontro Nacional de Economia ANPEC. 2017. Disponível em: <https://en.anpec.org.br/previous-editions.php?r=encontro-2017>. Acesso em: 19/07/2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). “Nova NDC do Brasil representa paradigma para o desenvolvimento do país”, diz Marina na COP29. Brasília: MMA, 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/nova-ndc-do-brasil-representa-paradigma-para-o-desenvolvimento-do-pais-diz-marina-na-cop29>. BRASIL. *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: estratégias setoriais e temáticas*. Vol. II. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2016.

CARVALHO, Terciane S; SANTIAGO, Flaviane S; PEROBELLI, Fernando S. Mudanças demográficas no Brasil e seus impactos sobre as emissões de gases de efeito estufa: uma análise de insumo-produto. Anais do 45º Encontro Nacional de Economia ANPEC. 2017. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2017/submissao/files_l/i11-1fc8b5b5ccec736c4b048ab2f193dca.pdf. Acesso em: 19/07/2025.

CARVALHO, Terciane Sabadini; SANTIAGO, Flaviane; PEROBELLI, Fernando Salgueiro. Demographic changes and its impacts on consumption and greenhouse gas emissions in Brazil: a computable general equilibrium model approach. 2018. Disponível em: <https://ageconsearch.umn.edu/record/332970/files/8948.pdf>

CARVALHO, Terciane S.; SANTIAGO, Flaviane S.; PEROBELLI, Fernando S. Demographic change in Brazil and its impacts on CO2 emissions. *Economic Systems Research*, v. 33, n. 2, p. 197-213, 2021.

CARVALHO, Micaele M. de. Efetividade econômica, social e ambiental da precipitação de carbono na economia brasileira para o alcance de metas de redução

de emissões de gases de efeito estufa. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2022.

COI-UNESCO. 2022. Um Novo Currículo Azul – Um guia prático para formuladores de políticas, Paris (Manuais e Guias da COI, 90).

HADDAD, Eduardo A. Trade and Interdependence in Lebanon: An Interregional Input-Output Perspective. *Journal of Development and Economic Policies*, v. 16, n. 1, p. 5–45, 2014.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* The economic impacts of flooding in Egyptian port cities. Policy Paper. PP02/25. Jan, 2025. Disponível em: <https://www.policycenter.ma/publications/economic-impacts-flooding-egyptian-port-cities>. Acesso em: 19/07/2025.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Assessing the economic impacts of Al-Haouz earthquake: damages and recovery strategy. 2024a.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Economic impacts of the 2023 earthquake in Morocco. 2024b.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Economic drivers of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. *Nature Sustainability*, 1 set. 2024c.

HADDAD, Eduardo Amaral *et al.* (org.). A matriz de insumo-produto e a estrutura produtiva da região nordeste. Fortaleza: BNB, 2024d.

HADDAD, Eduardo *et al.* Impactos multissetoriais, riscos, vulnerabilidades e oportunidades. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). Primeiro Relatório de Avaliação Nacional – Volume 2: Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação. Brasília: UNESCO, 2014.

HADDAD, Eduardo A.; ARAÚJO, Inácio F. Shades of blue: the regional structure of the ocean economy in Brazil. *npj Ocean Sustainability*, v. 4, n. 1, p. 15, 23 abr. 2025.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Uneven integration: the case of Angola. 2020a. Disponível em: <www.policycenter.ma>.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Interstate input-output model for Mexico, 2013. *Análisis Económico*, n. 90, p. 7–43, 2020b.

HADDAD, Eduardo A. *et al.* Interregional Input-Output Matrix for Colombia, 2012. Bogotá: 2016.

HADDAD, Eduardo Amaral; BONET, Jaime; HEWINGS, Geoffrey J. D. The Colombian Economy and Its Regional Structural Challenges: A Linkages Approach.: Springer, 2023.

LEÓN, J. A. *et al.* Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

LUEDEMANN, Gustavo; MARENCO, José A.; KLUG Letícia B. International Agreements, Climate Change and Urban Challenges. In: BALBIM, Renato (Ed.). The geopolitics of cities: old challenges, new issues. Chapter: 11. Ipea, 2016

MAGALHAES, Aline; DOMINGUES, Edson Paulo. Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono? Economia Aplicada, v. 20, n. 3, 2016, pp. 273-310.

MARGULIS, Sergio; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt. Economia da mudança do clima no Brasil. 2011.

MOHOR, Guilherme S; MENDIONDO, Eduardo Mario. Economic indicators of hydrologic drought insurance under water demand and climate change scenarios in a Brazilian context. Ecological Economics, v. 140, p. 66–78, 1 out. 2017.

MOZ-CHRISTOFOLETTI, Maria Alice; PEREDA, Paula Carvalho. Winners and Losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. Ecological Economics 183 (2021) 106945.

NETO, Habib Jorge, F; REMIGIO, Hipolito G. Legal nature and credit and tax issues of certified emission reductions. In: Legacy of the CDM: lessons learned and impacts from the Clean Development Mechanism in Brazil as insights for new mechanisms. FRANGETTO & LUEDEMANN, G.; VEIGA, ANA PAULA (Orgs.). Ipea. Brasília, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9534> . Acesso em 05/07/2025.

OLIVEIRA, Jaqueline; PALIALOL, Bruno; PEREDA, Paula. Do temperature shocks affect non-agriculture wages in Brazil? Evidence from individual-level panel data. Environment and Development Economics, v. 26, n. 5–6, p. 450–465, 5 out. 2021.

ROCHA, Ademir. Climate Change, Water Resources and Economic Impacts: An Analysis of Brazilian Hydrographic Regions. Tese de Doutorado. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2022.

RODRIGUES, Loredany C. C.; FÉRES, José Gustavo; COELHO, Alexandre Bragança. Pesticide use in Brazil: virtuous or vicious cycle? Anais do 51º Encontro Nacional de Economia (ANPEC). Rio de Janeiro, 2023.

RUGGIERO, P. G. C. *et al.* The Brazilian intergovernmental fiscal transfer for conservation: A successful but self-limiting incentive program. Ecological Economics, v. 191, 1 jan. 2022.

SASS, Karine. Mudanças climáticas, secas e impactos econômicos: uma análise para a Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021.

SIMÕES, Marcelo P. Avaliação do impacto sistêmico da perda de produtividade agrícola no Rio Grande do Sul via Insumo-Produto e Equilíbrio Geral Computável: Universidade de São Paulo, 2025.

SOUZA, Bruno; HADDAD, Eduardo. Climate change in Brazil: dealing with uncertainty in agricultural productivity models and the implications for economy-wide impacts. *Spatial Economic Analysis*, v. 17, n. 1, p. 83–100, 2022.

SOUZA, Kenia B; RIBEIRO, Luiz Carlos de S; PEROBELLI, Fernando S. Reducing Brazilian greenhouse gas emissions: scenario simulations of targets and policies. *Economic Systems Research*, 2016.

TAFARELLO, Denise.; CARVALHO, Andrea B.; GOMES, Ana Paula A.; BENSO, Marcos Roberto.; CALIJURI, Maria do Carmo.; MEDIONDO, Mario Eduardo. Como práticas de educação ambiental climática contribuem para segurança hídrica e gestão adaptativa? XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória. 2025.

TANURE, Tarik M. do P. Mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

TANURE, Tarciane Marques do Prado; PORSSE, Alexandre Alves; DOMINGUES, Edson Paulo. Política industrial verde no Brasil: impactos econômicos de opções de mitigação de gases de efeito estufa – uma análise através de equilíbrio geral computável (EGC). *Anais do XXIV Encontro de Economia da Região Sul – ANPEC Sul*, 2021.

TOZATO, Heloisa; LUEDEMANN, Gustavo; FRANGETTO, Flavia W. & MOREIRA, Carmen T.C. Abordagens metodológicas para a identificação dos gastos com mudança do clima: desafios para o Brasil. *Boletim regional, urbano e ambiental*, 21, 149-162, Julh-dez, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9683> . Acesso em: 22/07/2025.

VIEIRA, Renato S.; HADDAD, Eduardo A. A weighted travel time index based on data from Uber Movement. *EPJ Data Science*, v. 9, n. 1, 1 dez. 2020.

VISENTIN, Jaqueline C. *et al.* Insurance for adaptation to hydrological anomalies: analysis using Computable General Equilibrium Models for Brazilian hydrographic regions: INCT para Mudanças Climáticas Fase 2. Conferência de resultados. Caderno de resumos, 2025.

ZATZ, Diana. (2025). Economia do mar. *Revista Climacon*. 2025. No prelo.

ZHOU, Lei; CHEN, Zhenhua. Are CGE models reliable for disaster impact analyses? *Economic Systems Research*, v. 33, n. 1, p. 20–46, 2021.

Aloisio Lopes P. de Melo

Secretário Nacional de Mudanças do Clima do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Engenheiro Agrônomo pela ESALQ/USP, com especialização em Economia da Mudança do Clima pela Cambridge University e mestrado em Desenvolvimento e Agricultura pela UFRRJ. Membro da carreira de Especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental.

COP30
BRASIL
AMAZÔNIA
BELÉM 2025

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO

ISBN: 978-85-7013-244-4



9 788570 132444