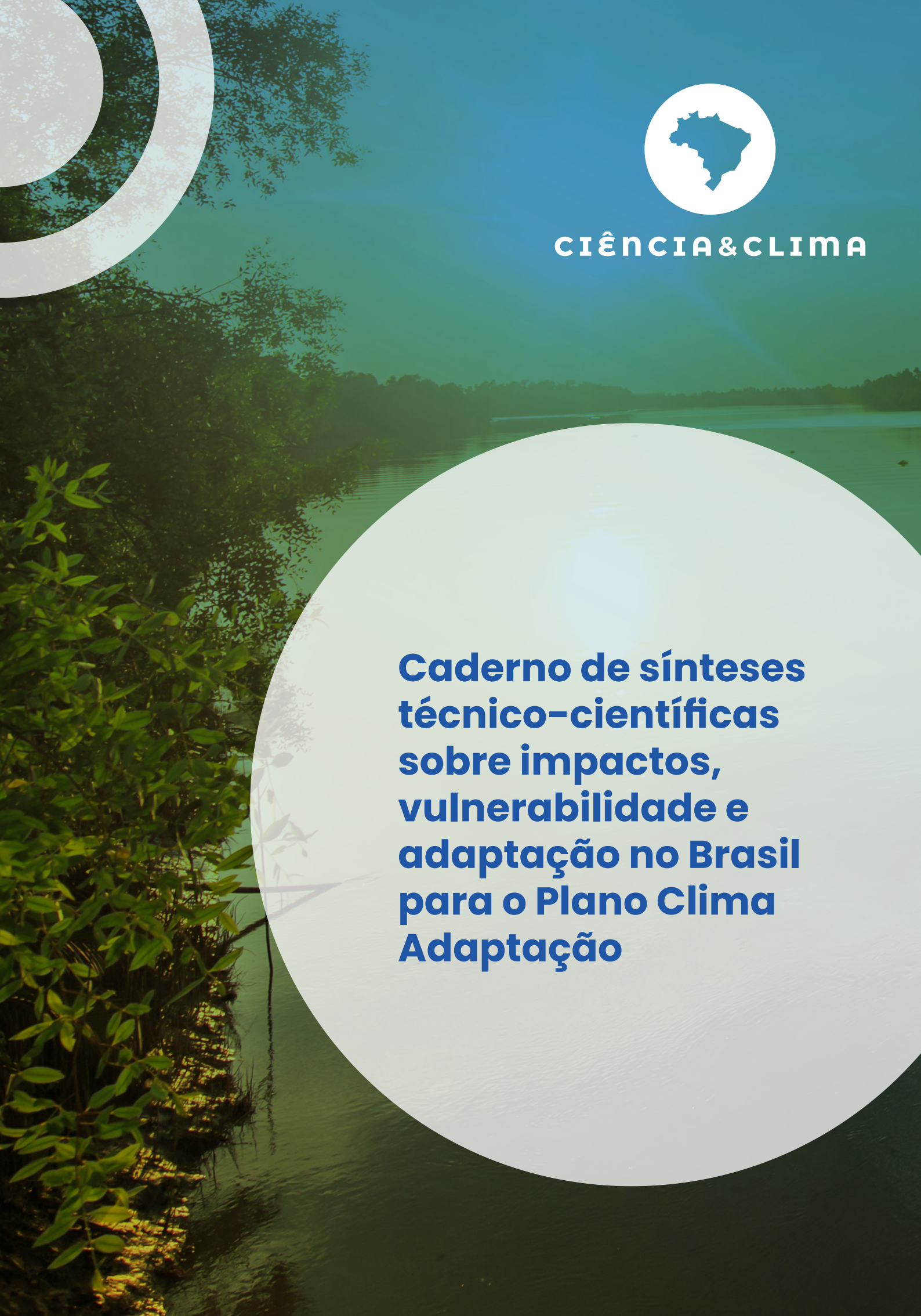

CIÊNCIA&CLIMA

Caderno de sínteses técnico-científicas sobre impactos, vulnerabilidade e adaptação no Brasil para o Plano Clima Adaptação

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Caderno de sínteses técnico-científicas sobre impactos, vulnerabilidade e adaptação no Brasil para o Plano Clima Adaptação

BRASIL 2025

CIÊNCIA&CLIMA

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

PRESIDENTE DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRA DE ESTADO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
Luciana Barbosa de Oliveira Santos

SECRETÁRIO EXECUTIVO
Luis Manuel Rebelo Fernandes

SECRETÁRIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS ESTRATÉGICOS
Andrea Brito Latgé

DIRETOR DO DEPARTAMENTO PARA O CLIMA E SUSTENTABILIDADE
Osvaldo Luiz Leal de Moraes

COORDENADOR-GERAL DE CIÊNCIA DO CLIMA
Márcio Rojas da Cruz

INSTITUIÇÕES COLABORADORAS

COORDENAÇÃO-GERAL DE CIÊNCIA DO CLIMA DO MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
Andréa Nascimento de Araújo
Diogo Victor Santos
Márcio Rojas da Cruz
Ricardo Vieira Araujo
Sávio Túlio Oselieri Raeder

DEPARTAMENTO DE POLÍTICAS PARA ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA À MUDANÇA DO CLIMA DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA
Adriana Brito da Silva
Inamara Santos Mélo
Pedro Alexandre Rodrigues Christ

PROJETO CIÊNCIA&CLIMA (BRA/23/G31 - QUINTA COMUNICAÇÃO NACIONAL, RELATÓRIO DE ATUALIZAÇÃO BIENAL E RELATÓRIOS BIENAIS DE TRANSPARÊNCIA À CONVENÇÃO DO CLIMA)
Danielly Godiva Santana Molleta
Jussara Peccini
Mariana Gutierres Arteiro da Paz
Natalia Torres D'Alessandro
Renata Patricia Soares Grisoli

PROJETO PROADAPTA DA AGÊNCIA ALEMÃ DE COOPERAÇÃO INTERNACIONAL (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT - GIZ)
Ana Carolina Câmara
Pablo Borges de Amorim

REDE CLIMA (REDE BRASILEIRA DE PESQUISAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS)
Jean Pierre Henry Balbaud Ometto
Moacyr Cunha de Araújo Filho

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO
CT COMUNICAÇÃO

©2025 - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) / Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

C122 Caderno de sínteses técnico-científicas sobre impactos, vulnerabilidade e adaptação no Brasil para o Plano Clima Adaptação / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. – Brasília: MCTI, 2025.

120 p.: il.

ISBN: 978-65-5471-008-4 (versão digital)
ISBN: 978-65-5471-000-8 (versão impressa)

1. Mudança climática – Impactos – Brasil. 2. Mudança climática – Riscos – Brasil. 3. Mudança climática – Plano de adaptação – Brasil. 4. Mudança climática – Agropecuária – Brasil. 5. Mudança climática – Biodiversidade – Brasil. 6. Urbanização – Impacto climático – Brasil. 7. Mudança climática – Impacto energético – Brasil. 8. Mudança climática – Racismo ambiental – Brasil. 9. Justiça climática – Brasil. 10. Mudança climática – Recursos hídricos – Brasil. 11. Mudança climática – Desastre ambiental – Gestão de riscos – Brasil. 12. Mudança climática – Impacto na saúde – Brasil. 13. Mudança climática – Insegurança alimentar – Brasil. 14. Mudança climática – Setor de transporte – Impactos – Brasil. 15. Mudança climática – Ecossistema oceânico – Impactos – Brasil. 16. Mudança climática – Região costeira – Impactos – Brasil. I. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. II. Rede Clima. III. Projeto Ciência e Clima. IV. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

CDU 551.583(81)

Ficha catalográfica elaborada por: Lorena Nelza F. Silva – CRB-1/2474

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)
Esplanada dos Ministérios, Bloco E
Telefone: 55 (61) 2033-7923
70067-900 - Brasília - DF
www.gov.br/mcti

FICHA TÉCNICA

AUTORIA E COORDENAÇÃO TÉCNICA

Diogo Victor Santos
Mariana Gutierres Arteiro da Paz
Natália Torres D´Alessandro
Pablo Borges de Amorim

PONTOS FOCAIS DA REDE CLIMA PARA COLABORAÇÃO COM O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DOS SUBSÍDIOS CIENTÍFICOS PARA AS ESTRATÉGIAS SETORIAIS E TEMÁTICAS DO PLANO CLIMA ADAPTAÇÃO

Ponto focal	Instituição	Setor / Tema
Alan Massaru Nakai	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
André Frossard Pereira de Lucena	Rede Clima e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ)	Energia
Arthur Welle	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Aryeverton Fortes de Oliveira	Rede Clima e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Camila Veneo Campos Fonseca	Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (IE-Unicamp)	Segurança Alimentar e Nutricional
Daniel Andres Rodriguez	Rede Clima e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ)	Recursos Hídricos
Daniel de Castro Victoria	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Giampaolo Queiroz Pellegrino	Rede Clima e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Izabela Penha de Oliveira Santos	Rede Clima e Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP)	Igualdade Racial e Combate ao Racismo
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
José Antonio Marengo Orsini	Rede Clima e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)	Redução e Gestão de Riscos de Desastres
Jussara Rafael Angelo	Rede Clima e Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIIAV-INPE)	Saúde
Margareth da Silva Copertino	Rede Clima e Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (IO-FURG)	Zona Costeira e Oceano
Maria Fernanda Lemos	Rede Clima e Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)	Cidades
Mariana Moncassim Vale	Rede Clima e Departamento de Ecologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)	Biodiversidade
Nicholas Magnus Deleuse Blikstad	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Patrícia Pinho	Rede Clima e Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM)	Povos indígenas (PI) e Povos e Comunidades Tradicionais (PCTs)
Renato José Santos Maciel	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária
Vânia Rosa Pereira	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Agricultura e Pecuária

Sumário

Lista de siglas 7

Apresentação 8

Agricultura e Pecuária 14

Biodiversidade 20

Cidades 34

Energia 44

Igualdade Racial e Combate ao Racismo 54

Povos Indígenas e Povos e Comunidades Tradicionais 62

Recursos Hídricos 68

Redução e Gestão de Riscos de Desastres 78

Saúde 86

Segurança Alimentar e Nutricional 92

Transportes 98

Zona Costeira e Oceano 112

Lista de siglas

ABEAR	Associação Brasileira das Empresas Aéreas
AdaptaBrasil MCTI	Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças do Clima
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
APS	Atenção Primária à Saúde
BA	Bahia
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CO_2	Dióxido de Carbono
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOTS	Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável
DSC	Doenças Sensíveis ao Clima
DSWR	*Downward Shortwave Radiation* (Radiação Solar Descendente de Onda Curta)
AbE	Adaptação Baseada em Ecossistemas
ENSO	*El Niño Southern Oscillation* - El Niño e La Niña
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ES	Espírito Santo
FP	Fundo de Pasto
GIZ	*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (Agência Alemã de Cooperação Internacional)
ICAO	*International Civil Aviation Organization* (Organização Internacional da Aviação Civil)
IDH-M	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima)
LTA	Leishmaniose Tegumentar Americana
LV	Leishmaniose Visceral
MA	Maranhão
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIDR	Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
MME	Ministério de Minas e Energia
ONG	Organização Não Governamental
PNRBH	Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas
PA	Pará
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
REDD+	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
Rede Clima	Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais
RJ	Rio de Janeiro
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SAN	Segurança Alimentar e Nutricional
SC	Santa Catarina
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIS-AP	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – Água Potável
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
SUS	Sistema Único de Saúde
TI	Território Indígena
UHE	Usina Hidrelétrica
VE	Vigilância Epidemiológica
Vigiagua	Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano

Apresentação

A atualização do Plano Clima Adaptação, iniciada em 2023, é um marco na agenda climática do País. A formulação desse novo plano, protagonizada pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) com o apoio técnico e científico do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), foi pautada pela ampla mobilização de evidências científicas e pelo envolvimento de diversos parceiros governamentais, acadêmicos, da sociedade civil organizada, entidades empresariais, além de povos e comunidades tradicionais. Na construção desta política pública, coube ao MCTI promover um alinhamento técnico e metodológico por meio de subsídios técnico-científicos e de oficinas com os ministérios setoriais envolvidos no Plano. O MCTI, portanto, apoiou a construção das bases metodológicas para a formulação dos Planos Setoriais e Temáticos, produzidos por cada Ministério responsável.

Nesse contexto, foi elaborado o **Caderno de sínteses técnico-científicas sobre impactos, vulnerabilidade e adaptação no Brasil para o Plano Clima Adaptação,** a partir da colaboração entre as equipes do MCTI, em especial do Projeto Ciência&Clima, e da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (Agência Alemã de Cooperação Internacional - GIZ). O Caderno reúne informações e conclusões relevantes que subsidiaram tecnicamente a construção do Plano, considerando a análise de conjuntos de referências bibliográficas e documentais selecionadas por tema. O objetivo foi incentivar que a formulação da Estratégia Nacional e dos Planos Setoriais e Temáticos de Adaptação fosse embasada em evidências científicas consistentes.

A Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima), por meio de pontos focais designados, desempenhou papel central na orientação do processo de seleção das referências, bem como na revisão dos resumos elaborados para cada tema ou setor abordado. Foram levantadas mais de 700 referências bibliográficas, das quais 220 foram selecionadas como as mais relevantes (Figura 1), considerando o contexto nacional, para compor este caderno. Essa contribuição analisou a literatura científica mais recente disponível durante o período de sua elaboração (entre 2023 e o início de 2024).

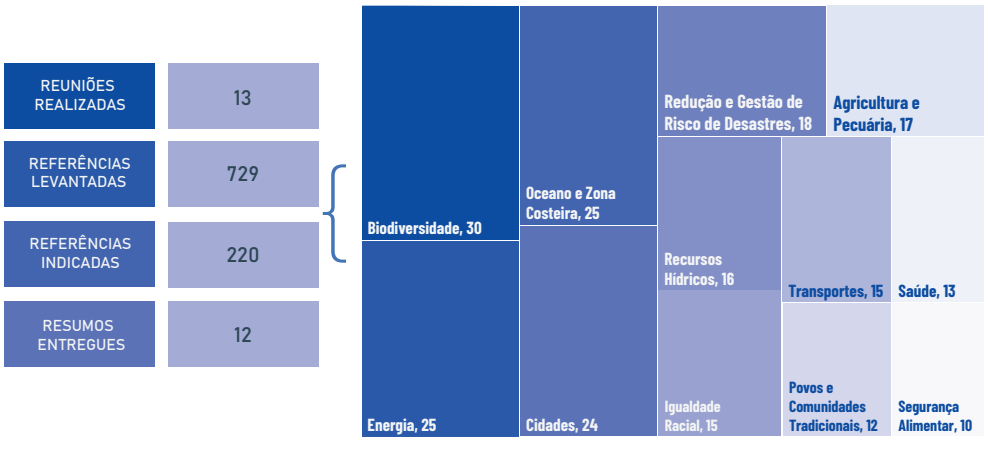

FIGURA 1. DADOS DO PROCESSO DE ELABORAÇÃO DAS SÍNTESES TÉCNICO-CIENTÍFICAS REALIZADO EM COLABORAÇÃO ENTRE MCTI, GIZ E REDE CLIMA

Fonte: elaboração própria.

O resultado aqui apresentado consiste em 12 sínteses organizadas por temas e setores estratégicos para a agenda nacional de adaptação à mudança do clima, a saber: Agricultura e Pecuária, Biodiversidade, Cidades, Energia, Igualdade Racial e Combate ao Racismo, Povos Indígenas e Povos e Comunidades Tradicionais, Recursos Hídricos, Redução e Gestão de Riscos de Desastres, Saúde, Segurança Alimentar e Nutricional, Transportes, Zona Costeira e Oceano.

As sínteses foram estruturadas nas seguintes seções: **Impactos Observados**, **Riscos e Vulnerabilidades**, e **Adaptação**. Essa composição busca fortalecer a agenda de adaptação a partir da perspectiva do risco e facilita a apropriação das informações na lógica das dimensões do risco proposta pelo IPCC — **ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade** (Figura 2).

Este caderno considera as definições de impactos, risco climático e adaptação[2] do IPCC. **Impactos observados** correspondem à materialização do risco no período passado, ou seja, são definidos como as consequências da mudança do clima nos sistemas naturais e humanos. Em geral, referem-se aos efeitos adversos (danos e prejuízos) sobre vidas, meios de subsistência, saúde e bem-estar, ecossistemas e espécies, ativos econômicos, sociais e culturais, serviços (incluindo serviços ecossistêmicos) e infraestrutura, podendo se manifestar de forma direta ou indireta. Por sua vez, os riscos climáticos dizem respeito ao potencial de ocorrência de consequências adversas (ou impactos) para sistemas humanos ou ecológicos. Os riscos climáticos resultam de interações dinâmicas entre as ameaças relacionadas ao clima e os níveis de exposição e vulnerabilidade dos sistemas humanos ou ecológicos afetados (Figura 2).

Já a **Adaptação** à mudança do clima é considerada como o processo pelo qual os sistemas naturais e humanos se ajustam às condições climáticas atuais e projetadas, bem como aos seus impactos. Esse processo engloba ações e medidas voltadas tanto para reduzir ou evitar danos potenciais quanto para aproveitar oportunidades benéficas[2]. Para ser efetiva, a adaptação deve considerar os riscos e vulnerabilidades existentes no presente, bem como aqueles que podem surgir sob diferentes cenários futuros, promovendo respostas planejadas e proativas frente às incertezas climáticas[2].

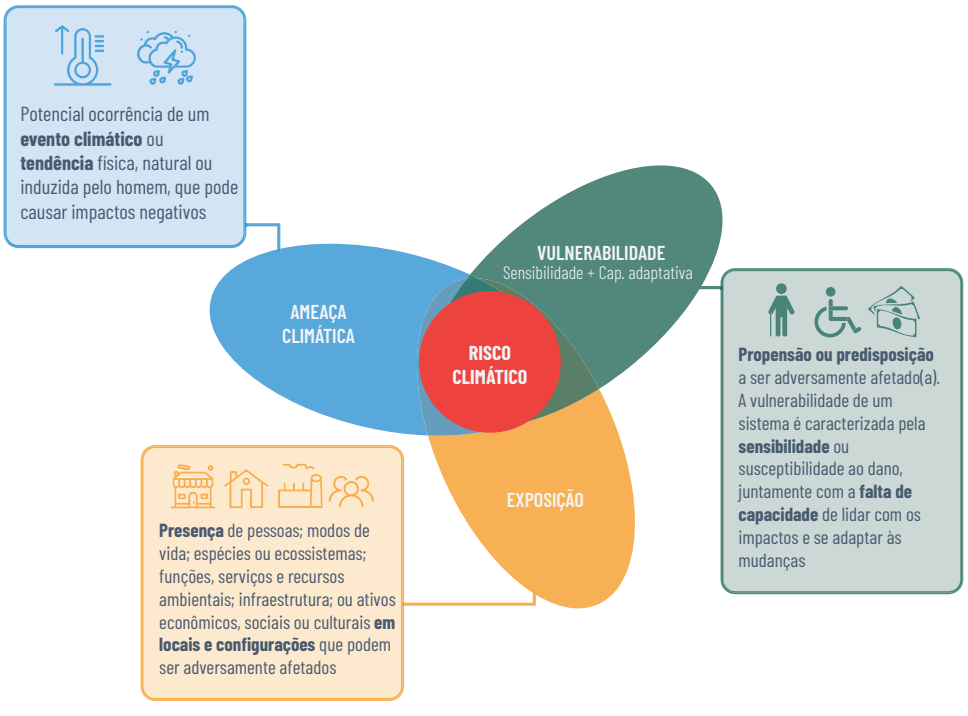

FIGURA 2. DIMENSÕES DO RISCO CLIMÁTICO

Fonte: IPCC, 2014[1], 2022[2].

O planejamento climático, ao adotar conceitos e dados fundamentados cientificamente, subsidia a formulação e a implementação de políticas de adaptação mais efetivas e resilientes, priorizando os principais riscos climáticos enfrentados no Brasil e considerando as especificidades de cada setor e tema. Esse esforço visa a construção de políticas públicas baseadas em evidências e tem potencial de promover respostas mais eficazes ao enfrentamento da mudança do clima e à promoção do desenvolvimento resiliente ao clima.

Soma-se ao presente esforço, outras iniciativas que o MCTI, em parceria com a Rede Clima, tem promovido no sentido de oferecer evidências científicas para as políticas climáticas. Em 2023, houve a criação do Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas (SIMACLIM), por meio do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT). O SIMACLIM tem como principal missão integrar pesquisas acumuladas e em curso de várias redes e grupos de pesquisa nacionais e internacionais, organizando informações e auxiliando no planejamento do Estado brasileiro para alcançar metas estabelecidas em acordos sobre Mudanças Climáticas. O Centro utiliza abordagens inter e transdisciplinares, essenciais para compreender as interações entre os sistemas sociais, biofísicos e ecológicos, caracterizando os riscos de impacto, a vulnerabilidade, as possibilidades de mitigação de suas causas, e as soluções de adaptação.

Por fim, ao reunir as referências mais atuais e baseadas na ciência, este caderno visa democratizar os esforços utilizados no desenvolvimento do Plano Clima Adaptação, de forma que estes conhecimentos possam ser

utilizados em diferentes escalas espaciais. Espera-se assim, que as informações aqui contidas sejam cada vez mais apropriadas por governos e organizações, auxiliando-os a compreender seus riscos mais críticos, a partir de dados e evidências para a tomada de decisão. Em se tratando de um tema complexo, ainda existem diversas lacunas de informação quanto aos riscos climáticos e opções de adaptação. Portanto, este caderno também visa inspirar e impulsionar a investigação científica orientada para as necessidades de adaptação do País, de forma a conectar a melhor ciência com a implementação de ações que contribuam de maneira efetiva com a redução dos riscos relacionados ao clima, protegendo assim as atividades produtivas, sistemas naturais e populações.

Referências

1. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. BARROS, V. R. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781107415379

2. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

Agricultura e Pecuária

Introdução

A mudança do clima apresenta desafios significativos para o setor agropecuário brasileiro, ampliando riscos e alterando o desempenho da produção. Decorrem disso desafios à estabilidade econômica dos produtores e, consequentemente, ao atendimento da demanda crescente dos produtos agropecuários[1,2]. Eventos extremos, mudança no padrão de precipitação e o aumento de temperatura são exemplos de ameaças climáticas que mais afetam o setor[3,4].

Os impactos climáticos na produção agrícola e pecuária podem ser diretos ou indiretos, o que aumenta a complexidade de avaliação e, consequentemente, do planejamento da adaptação para o setor. Dentre os impactos diretos na produção estão os prejuízos no crescimento, desenvolvimento, produtividade e na qualidade dos produtos da agropecuária. Por outro lado, dentre os impactos indiretos na produção estão alterações no comportamento de pragas e doenças, impactos nos animais polinizadores e predadores naturais, assim como impactos sobre a infraestrutura, como ocorrido no evento recente no estado do Rio Grande do Sul; problemas fitossanitários e de ambiência animal, que acabam interferindo, também, na produção[1,3,5,6,17].

A produção agrícola e pecuária muito se relaciona com a disponibilidade hídrica e qualidade do solo. Portanto, somam-se dentre os impactos indiretos, os relacionados ao aumento das demandas para irrigação, bem como a disponibilidade de água no solo, assim como a potencial perda de carbono associada com o aumento da temperatura do ar e incremento da perda de solo, por eventos extremos de chuva, poderão impactar a agropecuária Brasileira[3].

As perdas de produtividade e aumento da variabilidade da produção contribuem para o aumento dos preços dos alimentos e instabilidade econômica das cadeias produtivas, à medida que o fornecimento se torna cada vez mais precário[6,8]. Todos os aspectos da segurança alimentar são potencialmente afetados pela mudança do clima, incluindo acesso a alimentos, seu uso e a estabilidade de seus preços, o que contribui para impactos na Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) de toda a sociedade, e, em especial, para as comunidades mais vulneráveis[8]. Os efeitos econômicos para os produtores e para o setor do agronegócio está muito relacionado com a produtividade e com o mercado. Além de afetar toda a cadeia econômica do agronegócio, há impactos específicos sobre a agricultura familiar, que tem geral têm uma menor capacidade adaptativa, dada a baixa adoção tecnológica e menor recursos financeiros[8].

Impactos observados

Em série histórica entre 2013 e 2022 constatou-se que as chuvas e, sobretudo, as secas intensas afetaram a produção de alimentos, trazendo prejuízos de R$ 260 bilhões no período, sendo que só em 2022 as secas causaram perdas de R$ 57,4 bilhões, equivalen-

te a 22% do total do período analisado[9]. As regiões Nordeste e Sul foram as mais afetadas com danos e prejuízos de respectivamente, 38% e 31% em relação ao total[9]. O excesso de chuvas causou danos mais severos na produção agrícola nas regiões Centro-Oeste e Sul. Os danos causados pela seca estão concentrados nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul.

Os prejuízos financeiros, além de perdas econômicas, indicam a perda da produtividade agropecuária e de renda dos produtores no país. Um exemplo de impacto na produtividade foi na safrinha do milho de 2016, em decorrência da seca ocorrida na região central do Brasil, que apresentou um prejuízo em todo o país em 29,5%, mesmo com 10,3% de acréscimo na área plantada[1]. Outro exemplo pode ser observado no ano agrícola 2021/2022[9], cuja seca no país levou a perdas agrícolas na ordem de R$ 45,3 bilhões nos Estados do Sul e no Mato Grosso do Sul, sendo que 40% desse montante não estavam segurados. O volume de reembolso coberto pelo Proagro foi recorde, passando da média de R$ 2,2 bilhões nos dois anos anteriores para entre R$ 4,1 e R$ 5,7 bilhões. Os principais eventos climáticos causadores dessas perdas foram: seca (79,9%), seguida por chuva excessiva (7,5%), doença ou praga (4,9%) e geada (3,2%). Na região Sul, os principais produtos afetados com seca foram: soja, trigo, feijão e milho; com geada: o milho de segunda safra e trigo[9].

Adicionalmente aos prejuízos econômicos, a SAN é afetada em toda a sua cadeia[11,12,13]. Além da produção de alimentos, a mudança do clima tem influenciado a qualidade nutricional dos alimentos, bem como o aumento dos preços, o que impacta na oferta[10]. Em relação à qualidade nutricional, estudo em escala global detectou que níveis elevados de dióxido de carbono diminuem as concentrações de proteínas das culturas de trigo, cevada, arroz e batata em 10 a 15%[6].

Riscos e vulnerabilidades

A produtividade agropecuária no território brasileiro, segundo cenários projetados para 2050, tende a apresentar reduções na produção agrícola, em culturas como soja (79,6%), milho (51%), trigo (46,2%), feijão (23,1%), café (21,5%), arroz (15,2%), bovinos (7%), leite (18,8%) e ovo (3,4%)[14]. Assim, a projeção de oferta interna de produtos agrícolas sob os efeitos da mudança do clima, sugere a possibilidade de déficit para atender a demanda interna em 2050[6].

A queda de produtividade pelo território em projeções para 2050 foi identificada em análise regional, que considerou cana-de-açúcar, soja, milho, feijão, café e laranja[14]. O café apresenta maior queda de produtividade justamente na maior região produtora deste cultivo, o Sudeste (11,87% em Minas Gerais). A cana-de-açúcar sofre queda de produtividade concentrada nas regiões Sudeste, Centro Oeste e Nordeste, com destaque para Alagoas e São Paulo, com queda projetada em 22,83% e 20,42%, respectivamente. Os efeitos negativos sobre a produtividade do feijão são mais uniformes entre as regiões, exceto o Nordeste, onde o Estado do Ceará é o que apresenta maior queda, de 6,02%. A projeção de queda de produtividade da laranja está concentrada no Sudeste, pequena parcela no Nordeste e

Norte. O milho registra queda de produtividade em grande parte do Brasil. A magnitude dos impactos sobre a soja é maior em relação aos demais cultivos, e esse efeito se concentra nas regiões Sul, uma parcela no Nordeste e no Centro-Oeste, chegando à queda em 28,87% em Mato Grosso[14].

Estudos mostram que as práticas agrícolas são fundamentais para reduzir o risco na produção agropecuária. Além de melhorar a eficiência no campo, determinadas práticas agrícolas são consideradas ações estratégicas para reduzir as vulnerabilidades advindas dos impactos da mudança do clima. A irrigação e a adoção de práticas sustentáveis, como rotação de culturas, descanso do solo, proteção e recuperação de encostas e matas ciliares, dentre outras, contribuem para diminuir a vulnerabilidade, pois melhoram a qualidade dos serviços ecossistêmicos relacionados às atividades agropecuárias. O acesso a incentivos e programas como o Cisternas e PRONAF; a orientação técnica das boas práticas; a participação de associações; e a redução de conflitos no campo também contribuem para diminuir a vulnerabilidade da produção frente à mudança do clima. Os aspectos biofísicos, como a disponibilidade hídrica nas áreas produtoras, podem afetar a atividade agropecuária, visto que é um fator determinante para a produtividade. O déficit hídrico no solo em áreas agropecuárias e as perdas de cobertura vegetal natural também aumentam a vulnerabilidade das áreas cultivadas[6,14,15,16].

Em relação ao aspecto econômico, cenários de estudo realizado pelo MMA/Oxfam[6] indicam perdas esperadas decorrentes de variações de temperatura e precipitação futuras para arroz, feijão, milho e café produzidos exclusivamente pelos agricultores familiares, com impacto na elevação dos preços de alguns produtos alimentares básicos e choque relevante sobre a economia nacional[1,6,9].

Adaptação

A literatura demarca que dentre as ações e medidas de adaptação, o desenvolvimento de variedades e sistemas de manejo agrícolas adaptados à mudança do clima são muito importantes[6]. Da mesma forma, as ações de assistência técnica e transferência de renda e o monitoramento contínuo de riscos agroclimáticos merecem destaque. Além de ações focadas na produção, a melhoria da infraestrutura de distribuição e armazenamento de produtos agrícolas é fundamental para garantir que toda a cadeia da produção até o consumo final seja protegida.

Ações e medidas mais amplas, como a manutenção e recuperação de ambientes naturais, também contribuem para diminuir a vulnerabilidade do setor agropecuário. Com a manutenção dos serviços ecossistêmicos, tais como de provisão de água e suporte do solo, contribuem para manutenção e/ou aumento da produção agropecuária[2,12,17].

As ações devem considerar as peculiaridades de cada local e a justiça climática, visto que os impactos da mudança do clima na produção agrícola e pecuária são distintos nas

regiões brasileiras, por tipo de produção e características dos produtores. Algumas regiões, por exemplo, serão mais afetadas por ameaças específicas, como secas, do que outras; da mesma forma que existem impactos diferentes na agricultura de pequeno e grande porte, por exemplo. Portanto, a literatura recomenda que a adaptação climática para o setor agrícola e pecuário acompanhe a heterogeneidade das situações ambientais, sociais e econômicas, que condicionam o risco climático no país[1,3,6,9,15].

Referências

1. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev. 2024.

2. EMBRAPA. *Produção animal no Brasil: caracterização, simulação de cenários para pastagens e alternativas de adaptação às mudanças climáticas*. Santos, Menezes, P. et al. — São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2015. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1048019. Acesso em: 1 mar. 2024.

3. ASSAD, E. D. et al. *Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas. Working Paper*. São Paulo: WRI Brasil, [s.d.]. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/AF_WRI_WorkingPaper_MudancasClimaticas_SumarioExecutivo_DIGITAL.pdf . Acesso em: 26 fev. 2024.

4. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/#. Acesso em: 21 mar. 2024.

5. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *Nota Técnica nº 51/2021/SPR: Documento nº 02500.055902/2021-19. Impacto das Mudanças Climáticas na Demanda da Irrigação do Brasil*. Brasília, DF: CB, 2020. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0/attachments/Nota%20T%C3%A9cnica%2051-2021-SPR.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

6. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

7. ZILLI, M. et al. The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of The Total Environment*, v. 740, 139384, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384.

8. ASSAD, E. D.; RIBEIRO, R. R. R.; NAKAI, A. M. Assessments and how an increase in temperature may have an impact on agriculture in Brazil and mapping of the current and future situation. In: NOBRE, C. A. et al. (ed.). *Climate Change Risks in Brazil*. Springer Nature, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-92881-4_3

9. BANCO CENTRAL DO BRASIL (BC). *Relatório de Riscos e Oportunidades Sociais, Ambientais e Climáticas – Volume 2*. Brasília, DF: BC, dez. 2022. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/content/publicacoes/relatorio-risco-oportunidade/relatorio_de_riscos_e_oportunidades_sociais_ambientais_e_climaticas_2022.pdf. Acesso em: 10 jan. 2024.

10. FANZO, J. et al. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security*, v. 18, p. 12–19, set. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.06.001

11. MARENGO, J. A.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C. et al. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports*, v. 12, 457, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4.

12. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020–2030: Plano Operacional*. Brasília: MAPA/DEPROS, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

13. RATTIS, L.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N. et al. Climatic limit for agriculture in Brazil. *Nature Climate Change*, v. 11, p. 1098–1104, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01214-3.

14. SOUZA, B.; HADDAD, E. 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, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/17421772.2021.1934524

15. EMBRAPA. *Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira*. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira. Acesso em: 19 abr. 2024.

16. ADAPTABRASIL-MCTI. *SE Disponibilidade de Alimentos (seca)*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 21 mar. 2024.

17. SABOURIN, E. et al. (org.). *Public policies for adapting agriculture to climate change in semi-arid Northeast Brazil*. Rio de Janeiro: E-papers, 2022. DOI: 10.48207/9786587065373ff

Biodiversidade

Introdução

Os impactos da mudança do clima sobre a biodiversidade no Brasil representam uma nova e grave ameaça à rica diversidade de vida que caracteriza o país[1,2]. Da mudança do clima emergem como problemas críticos a perda de habitats, alterações nos padrões migratórios e uma acelerada taxa de extinção de espécies. A Floresta Amazônica, o Pantanal, o Cerrado e ecossistemas costeiros e marinhos, como restingas e recifes de corais, são especialmente vulneráveis à mudança do clima. Observa-se, além disso, o aumento da temperatura média no país, mudanças nos padrões de precipitação e a ocorrência mais frequente de eventos climáticos extremos. Estes eventos representam ameaças diretas não somente à biodiversidade, mas também às populações humanas que dependem desses ecossistemas para sua subsistência, cultura e saúde. Portanto, torna-se urgente a adoção de medidas de adaptação eficazes para proteger a biodiversidade brasileira e assegurar a resiliência das comunidades e dos ecossistemas brasileiros diante dos desafios impostos pela mudança do clima[1,2,3].

Impactos observados

A mudança do clima afeta a biodiversidade, especialmente no nível das espécies e populações, acelerando a taxa de extinção e reduzindo a diversidade. O Brasil, com 10% a 20% da biodiversidade mundial, enfrenta desafios diretos e indiretos devido a essas mudanças, incluindo alterações na temperatura, precipitação, e eventos extremos como enchentes e secas[4]. Existe sólida evidência de que a mudança do clima impacta a distribuição e a fenologia das espécies[2] afetando o desenvolvimento, mobilidade, taxas reprodutivas, mortalidade, imunidade a doenças das espécies, bem como a sua distribuição e sobrevivência.

Os impactos da mudança do clima na biodiversidade são vastos e variam entre os diferentes biomas. A degradação e a perda de habitat exacerbam esses efeitos, aumentando a vulnerabilidade das espécies especializadas. O nicho climático de uma espécie, que determina sua sensibilidade, é crucial para sua sobrevivência.

A síntese dos impactos observados da mudança do clima na biodiversidade, organizada por alguns biomas (Mata Atlântica e Amazônia), fauna e biodiversidade marinha é apresentada a seguir:

Mata Atlântica

- Alterações climáticas, somadas à degradação intensa resultante do crescimento econômico e populacional, são fatores preocupantes para este bioma[5].
- No sul do bioma foi registrado o primeiro caso observado no país de deslocamento de espécies (plantas), para maiores altitudes em resposta ao aumento da temperatura[6].

Amazônia

- A Amazônia enfrenta estresses sem precedentes devido ao aumento de temperaturas, secas extremas, desmatamento e incêndios, aumentando o risco de um colapso em larga escala do sistema florestal. Observações de 1981 a 2020 indicam um aquecimento generalizado durante a estação seca, com um aumento da temperatura a uma taxa de 0,06°C por ano em algumas áreas. Entre 2001 e 2018, foram registrados eventos de seca extrema, evidenciando um aumento na frequência e intensidade desses eventos. Aproximadamente 30% das áreas anteriormente desmatadas estão em estado de floresta secundária, enquanto 38% do bioma foi afetado por secas extremas, incêndios, exploração madeireira e efeitos de borda[7].

- Devido ao desmatamento e à mudança do clima, a Amazônia, que antes ajudava a absorver o CO_2 da atmosfera, agora passou a liberar mais do que retém[8]. Esse fenômeno, especialmente pronunciado no sudeste da Amazônia, significa que, em vez de frear o aquecimento global, a floresta pode estar começando a contribuir para agravá-lo.

- Seca histórica no Amazonas em 2023, atribuída à mudança do clima[9], transformou rios em bancos de areia, isolando mais de 600 mil pessoas e deixando comunidades sem água potável e alimentos. No mesmo ano, a elevação da temperatura das águas causou mortandade de peixes, afetando estoques e reprodução, assim como de centenas de botos-cor-de-rosa (*Inia geoffrensis*)[10].

Fauna - geral

- Invertebrados, como lepidópteros e abelhas, enfrentam perdas significativas de habitat adequado, afetando os serviços ecossistêmicos de polinização[5].

- As espécies altamente especializadas em seus habitats estão enfrentando pressões crescentes devido à mudança do clima, levando a mudanças imprevisíveis na organização das comunidades biológicas. Espécies que habitam grandes cadeias de montanhas estão entre as mais vulneráveis, devido à sensibilidade às variações climáticas e à redução da disponibilidade de áreas apropriadas[11].

- Mudanças significativas na qualidade e na área do habitat são esperadas não só em grandes cadeias de montanhas, como os Andes, os Alpes e o Himalaia, mas também em cadeias montanhosas menores, como Espinhaço, Mantiqueira e Serra do Mar no Brasil, que abrigam uma biodiversidade rica e única[11].

- Modelos de nicho ecológico são cruciais para entender as possíveis mudanças nas distribuições de espécies causadas pela mudança do clima, reforçando estratégias de conservação. A análise sugere que as distribuições das espécies nas montanhas do leste brasileiro devem se deslocar para altitudes e/ou latitudes mais altas, enfrentando uma forte contração de área devido à descontinuidade das áreas montanhosas[11].

Biodiversidade marinha

- Os impactos da mudança do clima também são observados sobre a biodiversidade marinha e costeira, afetando diretamente a vida e os ecossistemas nos quais dependem para sua subsistência. A erosão costeira e as inundações provocadas por tempestades resultam em perda de biodiversidade e de produção pesqueira, evidenciando a vulnerabilidade desses ambientes à mudança do clima. Essas alterações não se limitam apenas à perda de habitats, mas também afetam a reprodução de espécies marinhas e a dinâmica dos ecossistemas[1].

- O aquecimento e a acidificação dos oceanos, assim como a elevação do nível do mar contribuem para a perda de ecossistemas críticos, como recifes de corais, bancos de algas e gramas marinhas, enfraquecendo as defesas costeiras e aumentando a exposição a tempestades e ondas oceânicas. Essas mudanças afetam não apenas os ecossistemas marinhos, mas também a economia e o bem-estar humano, por meio da redução dos estoques pesqueiros e da perda de infraestrutura costeira[1,3,12].

- O aumento na temperatura do ar e das águas afeta os processos químicos e biológicos essenciais para a manutenção da qualidade das águas e das comunidades aquáticas. A redução nas concentrações de oxigênio dissolvido e o aumento da estratificação vertical dos corpos d'água favorecem a proliferação de algas, alterando negativamente a biodiversidade aquática[1,13].

- A mudança do clima e dos oceanos também impactam a construção dos recifes de corais. Em favor dos briozoários, os corais têm diminuído sua participação no crescimento do recife, como exemplo dos recifes de Abrolhos. Esse fenômeno ilustra a rápida resposta dos ecossistemas marinhos às alterações climáticas e destaca a importância de entender e reduzir os impactos dessas mudanças na biodiversidade marinha e costeira[14].

- Já se observa um deslocamento do pescado das regiões tropicais para as regiões temperadas, que passam a ter maior diversidade devido ao deslocamento das espécies tropicais para o norte e para o sul, em resposta à mudança do clima[15].

Riscos e vulnerabilidades

Alterações nos padrões de temperatura e precipitação impactarão diversas regiões do país, levando a consequências significativas se não houver mudanças na tendência atual. Essas incluem a diminuição da produção agrícola, alterações nos habitats e na distribuição de espécies, que por sua vez aumentará a disseminação de doenças transmitidas por vetores, além de intensificar a agressividade das invasões por espécies exóticas[16].

As pressões climáticas abrangem uma série de fenômenos que representam ameaças significativas aos sistemas naturais e humanos. O aumento da temperatura global e as mudanças nos padrões de precipitação,

incluindo maior intensidade e frequência dos eventos extremos, constituem desafios críticos. Adicionam-se a esses as ondas de calor mais severas, a elevação do nível do mar, o aumento da temperatura dos oceanos e a sua acidificação. Esses fenômenos não só desestabilizam os ecossistemas, mas também afetam a vida humana diretamente, por meio da alteração de habitats, do escasseamento de recursos naturais, da redução da segurança alimentar e hídrica, e do incremento de riscos à saúde pública[1,4].

Fatores não climáticos também desempenham um papel crucial no aumento da vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente à mudança do clima. As pressões decorrentes das mudanças no uso da terra, sobre-exploração dos recursos naturais, crescimento populacional, alterações nos padrões de consumo e tecnológicos, bem como das atividades socioeconômicas, exacerbam a fragilidade dos ecossistemas e da biodiversidade. Adicionalmente, a pobreza, a marginalização social baseada em gênero, etnia, raça e classe social, e as desigualdades socioeconômicas, incluindo a falta de acesso à educação, saúde, moradia, tecnologias e infraestrutura, intensificam a vulnerabilidade de comunidades inteiras. Populações tradicionais, povos indígenas, produtores familiares e populações urbanas vivendo em favelas, que dependem fortemente da estabilidade climática e da integridade dos ecossistemas para sua subsistência, estão particularmente em risco, evidenciando a necessidade de abordagens integradas que considerem tanto os fatores climáticos quanto não climáticos na redução dos impactos adversos da mudança do clima[1,4].

As alterações no uso da terra têm sido um fator crucial na modificação dos ecossistemas terrestres e marinhos ao longo da história[16]. Até 1970, houve uma redução média na abundância de espécies de 22,6%, com a mudança climática tendo um papel menor. Contudo, a influência da mudança climática na perda de biodiversidade tem aumentado, podendo ser responsável por até 10% de uma possível redução de 45% na biodiversidade até 2050[17]. Cerca de 82% dos mamíferos brasileiros prestam pelo menos um dos 11 serviços ecossistêmicos (SE)[18]. No entanto, a mudança do clima coloca esses serviços em risco, sobretudo na densamente povoada Mata Atlântica e no produtivo Cerrado, onde se prevê a maior perda de serviços ecossistêmicos[19].

O uso da terra e a mudança do clima são as principais pressões que resultam na perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Devido à sua natureza e à história da agricultura até o momento, ela tem sido o principal agente de mudança no uso da terra impactando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Dados os atuais acordos globais para clima e biodiversidade e demandas do mercado, o desafio e a oportunidade estão em aproximar o setor agrícola da agenda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos, tornando-os assim grandes aliados[16].

O Brasil possui uma significativa biodiversidade global, enfrentando desafios devido à perda de habitat por mudanças no uso da terra, como expansão agropecuária e urbana. Biomas como Mata Atlântica, com cerca de 28% de sua cobertura original, Cerrado e Caatinga, com mais de 50% transformados em áreas urbanas ou agrícolas, estão vulneráveis[20,21,22].

Secas na região Amazônica têm afetado a vida em todas as suas formas. Dificuldades de locomoção e circulação de bens devido a rios secos; economia, saúde da população e ecossistemas afetados; aumento da vulnerabilidade à estiagem e redução do risco de enchentes. Incerteza sobre a severidade das próximas estações de seca e cheia agravam a situação[10].

Observa-se uma redução das áreas de floresta e uma possível transição para ecossistemas degradados de dossel aberto na região Amazônica, enquanto em algumas regiões do oeste e norte há expansão de florestas tropicais. Ocorre um aumento das temperaturas e o prolongamento das estações secas, evidenciando mudanças do clima significativas, nesta região. Espécies como o açaí podem ter sua distribuição natural ampliada, ao passo que outras, como o jaborandi, podem perder todas as populações naturais devido à perda de adequação climática[5].

A maioria das projeções sinalizam impactos negativos e extinção de espécies, sendo que as endêmicas, especialmente do Cerrado e Mata Atlântica, são mais suscetíveis[23].

No Cerrado, erca de 20% das espécies de vertebrados estão sob ameaça, com espécies como o tamanduá-bandeira e o tatu-canastra podendo sofrer redução na distribuição geográfica[5].

Projeções indicam uma severidade climática, especialmente para a flora, com impactos significativos na biodiversidade do Cerrado[5]. A mangaba e a arnica podem ter mais de 90% de sua distribuição atual reduzida. O pequi, importante para a economia local, pode enfrentar diminuição significativa, afetando a diversidade genética. Outras espécies, como o baru, não devem ser impactadas significativamente[5].

A degradação do habitat e os impactos da mudança do clima ameaçam a sobrevivência das espécies, alterando padrões de temperatura e precipitação. A fragmentação dos habitats reduz a capacidade de dispersão das espécies para ambientes favoráveis, aumentando o risco de extinção para espécies dependentes de condições climáticas específicas[21].

A fragmentação dos corpos d'água e as modificações em suas vazões, devido a variados aproveitamentos dos recursos hídricos, afetam negativamente as espécies e ecossistemas aquáticos [1,2]. Esse quadro se agrava devido a fatores não climáticos, como a poluição e canalização dos rios, a perda da vegetação ao longo das suas margens e a construção de barragens, diminuindo a capacidade de resposta da biodiversidade às mudanças do clima.

A transformação e a fragmentação dos habitats naturais, frequentes incêndios, deficiências no monitoramento ambiental e vulnerabilidades na gestão e governança impactam diretamente a capacidade adaptativa dos ecossistemas e das espécies à mudança do clima. A alteração no uso do solo, especificamente, promove a fragmentação dos habitats, afetando adversamente a continuidade dos espaços necessários para a sobrevivência da fauna. Essa fragmentação eleva o efeito de borda, comprometendo a capacidade de resistência dos ecossistemas a múltiplos impactos, intensificados pela mudança do clima. Isso resulta em maior suscetibilidade a incêndios, redução de habitats disponíveis, nas alterações na distribuição e composição de espécies e na vegetação [1,2].

As Unidades de Conservação brasileiras podem se tornar menos eficazes na proteção da biodiversidade em um futuro próximo, de acordo com projeções baseadas em modelos climáticos. A análise espacial revela um padrão de áreas de baixa condutância na superfície da paisagem, indicando que, apesar de existirem alguns trechos bem conectados que sugerem corredores ecológicos potenciais, a fragmentação do habitat é um problema significativo. Esses corredores são essenciais para a movimentação de espécies em resposta à mudança do clima, permitindo a migração e a dispersão necessárias para a adaptação e sobrevivência das espécies[16,19].

A fragmentação da Mata Atlântica, exacerbada por alterações no regime de precipitação e secas prolongadas, resulta em significativa perda de sua produtividade primária e capacidade de estocagem de carbono. A criação de bordas de fragmentação impacta negativamente a vegetação, biodiversidade e biomassa. Florestas menos fragmentadas conseguem reter até três vezes mais carbono do que as altamente fragmentadas. Além disso, com apenas cerca de 28% de sua cobertura vegetal original restante, a Mata Atlântica mostra-se como o bioma com menor capacidade de adaptação aos impactos da mudança do clima[1,22].

A perda de conectividade florestal em decorrência da mudança do clima na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica aponta para uma redução na capacidade de dispersão de anfíbios. Esta situação é especialmente preocupante, pois os anfíbios desempenham funções ecológicas cruciais, como a regulação de pragas e a manutenção da saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres. A diminuição da dispersão dessas espécies pode levar a desequilíbrios ecológicos significativos, afetando a biodiversidade como um todo. Além disso, as altas taxas de substituição de anfíbios, particularmente nas bordas nordeste de corredores ecológicos, sugerem uma vulnerabilidade maior dessas áreas à mudança do clima. Isso pode resultar em alterações na composição das espécies locais, com potenciais perdas de espécies endêmicas e o aumento de espécies invasoras, alterando a estrutura e função dos ecossistemas[24,25,26].

Estima-se que até 2050, 10% a 47% da floresta amazônica estarão expostas a perturbações combinadas. Ao combinar informações espaciais sobre várias perturbações, cenários indicam que estas podem desencadear transições de ecossistemas inesperadas e potencialmente exacerbar os efeitos da mudança do clima[7].

A perda de parte da Floresta Amazônica pode comprometer a integridade do ecossistema. Isso afetaria o ciclo hidrológico, reduzindo a umidade disponível e prolongando a estação seca, podendo levar o bioma a um "ponto de não retorno", comprometendo profundamente seu funcionamento. A Amazônia é essencial na regulação do ciclo hidrológico e no transporte de umidade para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, influenciando diretamente a precipitação nessas regiões. Portanto, as atividades humanas que impactam esse ecossistema ameaçam o clima de grande parte do país[1].

Estima-se que mais de 90% das espécies brasileiras sofrerão impactos negativos da mudança do clima, com 25% delas entrando em risco de extinção[27]. A biodiversidade dos biomas Pantanal, Amazônia e a Mata Atlântica deve ser a mais impactada. No entanto, o cumprimento das metas do Acordo de Paris, com um aquecimento global de no máximo 2°C acima dos níveis pré-industriais, tem o potencial de reduzir pela metade o número de espécies ameaçadas.

Estima-se a redução de área de ocorrência de cerca de 95% das espécies de abelhas na região Amazônica, especificamente na Floresta Nacional de Carajás (PA)e áreas circunvizinhas. Com a redução de habitats climaticamente adequados, apenas uma pequena fração das espécies (de 4% a 15) encontrará habitats climaticamente adequados na região de Carajás no futuro. Isso indica uma migração potencial ou extinção local de muitas espécies de abelhas que atualmente habitam a região. Prevê-se uma concentração de habitats viáveis principalmente na área nordeste do Pará, o que pode servir como um refúgio climático para algumas espécies de abelhas. No entanto, isso também sugere a necessidade de estratégias de conservação focadas nessas áreas[28].

Ecótonos estão sendo impactados pela mudança do clima. Na Zona de Transição Amazônia-Cerrado, 33 das 34 espécies de plantas modeladas devem perder entre 17% e 100% de sua área climaticamente adequada até 2050, impactando especialmente espécies ameaçadas (23%–100%), raras (17%–71%) e comuns (18%–74%). A espécie rara de planta *Swartzia lucida* pode perder toda sua área adequada. Foi observada uma redução significativa na sobreposição espacial total de espécies ameaçadas, caindo de 11 para 5 espécies, e uma drástica diminuição na riqueza de espécies por pixel, indicando perdas substanciais na biodiversidade. Enquanto a riqueza de espécies raras se manteve relativamente estável, as espécies comuns enfrentam uma redução na riqueza por pixel de 9 para 4. As Áreas Protegidas (AP) e Terras Indígenas (TI) mostraram-se insuficientes para cobrir as áreas adequadas para a maioria das espécies, com variações de 0 a 24% (AP) e 8–29% (TI) no clima atual, ampliando para 0 a 92% (AP) e 0–100% (TI) no futuro[29].

Espera-se uma redução da biodiversidade nos campos rupestres devido à mudança do clima. Estima-se uma perda futura de 50% da área adequada para os campos rupestres, além de uma perda de 56% da diversidade vegetal e extinção de 97% das espécies microendêmicas[30], e redução de 25% a 50% das espécies de angiospermas, sendo apenas 13% dentro de áreas protegidas[5].

Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado, biomas com altas taxas de perda de espécies dentro das áreas protegidas, enfrentam maior vulnerabilidade, exacerbada pelo desmatamento. Em 342 medidas de projeção de risco de impactos da mudança do clima em Unidades de Conservação (UC), 70% dos cenários indicam deslocamento de espécies para fora das Unidades de Conservação (UC) ou redução significativa de sua distribuição. Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado, biomas com altas taxas de perda de espécies dentro das áreas protegidas, enfrentam maior vulnerabilidade. Assim, UCs nacionais, sendo estáticas, não acompanham o movimento da biodiversidade em busca de melhores condições ambientais devido à mudança climática[18].

Cenários indicam que a mudança do clima resultará na intensificação do aumento do nível do mar e da frequência e magnitude de eventos extremos, como frentes frias associadas a ciclones extratropicais. A mudança do clima amplifica a pressão sobre a zona costeira, colocando em risco os ecossistemas, a população costeira, as atividades socioeconômicas e a infraestrutura dessas áreas[13].

Podem ocorrer modificações na qualidade da água em função da saturação e da salinização das bacias que deságuam no litoral. A tendência é que as planícies costeiras mais extensas sejam mais afetadas pela mudança do clima, onde o aporte de água do mar pode ter efeitos na extensão da cunha salina e no uso da água para fins de irrigação de culturas, de aquicultura/maricultura ou mesmo industrial[1].

Além do processo de salinização, o processo de aquecimento também impacta produtos e serviços de ecossistemas costeiros, principalmente os pesqueiros, inclusive a pesca artesanal. O aumento da temperatura do mar pode causar mudanças nos períodos de reprodução, migração das espécies, padrões de distribuição latitudinal e de profundidade, tamanho das populações, composição das comunidades, além de aumentar as enfermidades e afetar as relações de competição e predação. O manejo inadequado e a exploração destes recursos somam-se à mudança do clima no risco de afetar a produção pesqueira e outros recursos aquáticos.

Estima-se que uma redução de 1% na cobertura global de recifes de corais resulte em uma perda econômica de 3,8% relacionada ao valor recreativo e comercial destes recifes, o que corresponde a um impacto financeiro anual entre US$ 3,95 e US$ 23,78 bilhões[1].

Adaptação

A mudança do clima é inevitável no curto e médio prazo, portanto, a redução de outros impactos antrópicos é a melhor estratégia de adaptação para os sistemas naturais, aumentando assim a capacidade adaptativa destes sistemas. Os principais impactos antrópicos que precisam ser reduzidos são as mudanças de uso e cobertura do solo, sobretudo o desmatamento, a sobre-exploração, a poluição e a introdução de espécies exóticas invasoras.

A proteção da biodiversidade no contexto de mudança do clima emerge como um dos desafios mais prementes da atualidade, demandando ações estratégicas e imediatas para atenuar os impactos. A potencial transformação de até 50% da Amazônia em ecossistemas degradados de dossel aberto, devido à mudança do clima e ao desmatamento, sublinha a urgência de implementar políticas de conservação ambiental e restauração ecológica. A criação de corredores ecológicos é vital para promover a conexão entre espécies, facilitando sua adaptação às novas condições climáticas e preservando serviços ecossistêmicos essenciais para o desenvolvimento sustentável[21].

Estratégias adaptativas específicas para regiões como a Amazônia são fundamentais, abrangendo desde a realocação de populações de áreas de risco até a expansão de recursos hídricos e a manutenção da navegabilidade de rotas fluviais. A reutilização de áreas degradadas sob o conceito de "floresta produtiva" é uma ação urgente. A Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE) apresenta-se como uma estratégia promissora, em que a biodiversidade e serviços ecossistêmicos podem aumentar a resiliência aos efeitos adversos da mudança do clima, beneficiando aspectos econômicos, sociais, ambientais e

culturais. Medidas de AbE incluem a conservação e restauração de ecossistemas, a criação de barreiras naturais contra erosão, recuperação de manguezais, proteção de nascentes e implementação de práticas agroflorestais. A ampliação da rede de unidades de conservação e o estabelecimento de corredores ecológicos, com foco na resiliência climática, são cruciais, assim como a gestão participativa entre comunidades, governos, academia e ONGs para a conservação da biodiversidade e sustentabilidade de populações tradicionais[31].

Diante das mudanças significativas previstas nos ecossistemas, como no ecótono Amazônia-Cerrado, e do risco de extinção de muitas espécies brasileiras até 2050, é fundamental considerar o impacto da mudança do clima no planejamento de novas áreas protegidas. A proteção da biodiversidade, com especial atenção às terras indígenas da Amazônia, é vital para a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais. Assim, a integração das políticas de conservação, levando em conta as projeções futuras da mudança do clima e a gestão de fatores não climáticos, é um fator chave para fortalecer a resiliência dos ecossistemas e das espécies, garantindo sua sobrevivência e funcionamento diante das mudanças globais[18,29]. Adicionalmente, ações como a restauração ecológica para aumentar a conectividade florestal, a criação de novas áreas protegidas em locais estratégicos para corredores ecológicos, e o manejo adaptativo das reservas existentes serão cruciais para mitigar os impactos negativos nas espécies e nos ecossistemas[24].

As medidas de adaptação para a conservação da biodiversidade devem considerar a redução da fragmentação dos corpos hídricos e as modificações em suas vazões. Isso envolve a restauração da vegetação nativa e o estabelecimento e efetiva implementação de áreas protegidas. Essas ações devem ser reforçadas pela incorporação de projeções da mudança futuras do clima nas políticas e no planejamento de estratégias de conservação da biodiversidade. Adotar uma estratégia abrangente é essencial para aumentar a resiliência dos ecossistemas e das espécies que os integram, assegurando sua preservação e funcionalidade diante das alterações climáticas globais[1,2].

As Unidades de Conservação (UCs) desempenham um papel fundamental na proteção da biodiversidade. São essenciais não apenas para a conservação das espécies em seus habitats, mas também para a manutenção dos serviços ecossistêmicos vitais para a sobrevivência humana e a mitigação da mudança do clima. A implementação e gestão eficazes dessas áreas protegidas, garantindo sua representatividade, amplitude e conectividade, são medidas essenciais para enfrentar os desafios impostos pela mudança do clima. Além disso, a proteção de terras indígenas, muitas vezes sobrepostas ou adjacentes às UCs, é uma estratégia relevante, pois as terras indígenas são tão ou mais eficazes quanto as Unidades de Conservação na preservação da cobertura vegetal[32,33,34,35]. Os povos indígenas possuem conhecimentos tradicionais valiosos para a gestão da biodiversidade e adaptação à mudança do clima. A integração desses conhecimentos nos planos de manejo das UCs pode enriquecer as estratégias de conservação e adaptação, garantindo a proteção efetiva da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Portanto, o SNUC precisa ser expandido, incorporando explicitamente a mudança do clima no planejamento sistemático da conservação, para incluir espécies e regiões sub-representadas, a fim de tornar o sistema mais robusto[18,29].

Os ecossistemas marinhos desempenham um papel fundamental na redução dos impactos da mudança do clima, uma vez que esses ecossistemas oferecem serviços ecossistêmicos essenciais. Os habitats costeiros, como a vegetação de restinga, os manguezais, os recifes de corais e os bancos de algas são notáveis amortecedores físicos e químicos de estressores globais. Os eventos extremos, por exemplo, têm seu impacto parcialmente absorvido por recifes de corais, reduzindo os danos na região costeira. A proteção dos habitats costeiros pode reduzir em 2,5 vezes os riscos associados ao aumento do nível do mar no litoral brasileiro[18]. No entanto, apenas 10% dos habitats costeiros estão dentro de unidades de conservação, e estes por si só não garantem a proteção costeira[18]. A preservação desses habitats não é importante apenas para a redução dos riscos na costa, mas também pelo seu valor econômico. Os recifes de corais, por exemplo, representam um tipo de florestas tropicais submersas em termos de sua biodiversidade e funcionam como berçário, refúgio e zona de alimentação de muitas espécies de relevância socioeconômica[1,2,36].

Além da conservação e restauração de habitats, ações voltadas para a redução da sobre-exploração e da poluição são fundamentais, pois são fatores que tornam os sistemas naturais extremamente vulneráveis à mudança do clima. Além disso, como muitos impactos recaem de forma mais intensa sobre populações vulnerabilizadas, incluindo povos e comunidades tradicionais, povos originários e populações periféricas, as ações precisam levar essa realidade em conta. O objetivo deve ser não apenas reduzir a injustiça climática, mas também evitar que a agenda adaptativa para a Biodiversidade a reproduza ou aprofunde.

Referências

1. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

2. BUSTAMANTE, M. M. et al. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 24, n. 7, p. 1249–1270, 2019. DOI: 10.1007/s11027-018-9837-5

3. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

4. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

5. SILVA, P. L. de A. *Biodiversidade e mudanças climáticas no Brasil: levantamento e sistematização de referências*. Brasília: WWF Brasil, 2018. Disponível em: https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/WWF_Levantamento_21maio18_nr09.pdf. Acesso em: 25 mai. 2024.

6. BERGAMIN, R. S. et al. Elevational shifts in tree community composition in the Brazilian Atlantic Forest related to climate change. *Journal of Vegetation Science*, v. 35, e13289, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/jvs.13289

7. FLORES, B. M. et al. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, v. 626, p. 555–564, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0.

8. GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6

9. CLARKE, Ben et al. *Climate change, not El Niño, main driver of extreme drought in highly vulnerable Amazon River Basin*. London: Centre for Environmental Policy, 2024. DOI: https://doi.org/10.25561/108761

10. ARTAXO, P. et al. Para "Amazônia extrema", um plano de adaptação climática. *Valor Econômico*, 12 mar. 2024. Disponível em: https://valor.globo.com/google/amp/opiniao/coluna/para-amazonia-extrema-um-plano-de-adaptacao-climatica.ghtml. Acesso em: 21 mar. 2024.

11. HOFFMANN, D.; VASCONCELOS, M. F. de; FERNANDES, G. W. The fate of endemic birds of eastern Brazilian mountaintops in the face of climate change. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 18, n. 4, p. 257–266, out./dez. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.10.005.

12. MARENGO, J. A. et al. Increase Risk of Drought in the Semiarid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 °C. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. *Climate Change Risks in Brazil. Cham: Springer International Publishing*, 2019. p. 181–200. DOI: 10.1007/978-3-319-92881-4_7.

13. AMARAL, A. C. Z. et al. Brazilian sandy beaches: characteristics, ecosystem services, impacts, knowledge and priorities. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 64, n. spe2, p. 5–16, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S1679-875920160933064sp2

14. PEREIRA-FILHO, G. H. et al. Growing at the limit: Reef growth sensitivity to climate and oceanographic changes in the South Western Atlantic. *Global and Planetary Change*, v. 201, 103479, 2021. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2021.103479.

15. CHAUDHARY, C.; RICHARDSON, A. J.; SCHOEMAN, D. S.; COSTELLO, M. J. Global warming is causing a more pronounced dip in marine species richness around the equator. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 118, e2015094118, 2021. DOI: 10.1073/pnas.2015094118.

16. JOLY, C. A. et al. Brazilian assessment on biodiversity and ecosystem services: summary for policy makers. *Biota Neotropica*, v. 19, n. 4, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2019-0865.

17. OMETTO, J. P. et al. Interações entre natureza e sociedade: trajetórias do presente ao futuro. In: JOLY, C. A. et al. (org.). *1º Diagnóstico brasileiro de biodiversidade e serviços ecossistêmicos*. São Carlos: BPBES, 2018. p. 46. Disponível em: https://www.bpbes.net.br/wp-content/uploads/2019/09/BPBES_Completo_VF-1.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

18. MALECHA, A.; VALE, M. M.; MANES, S. Increasing Brazilian protected areas network is vital in a changing climate. *Biological Conservation*, v. 288, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110360.

19. TOURINHO, L. et al. Projected impacts of climate change on ecosystem services provided by terrestrial mammals in Brazil. *Ecosystem Services*, v. 71, p. 101687, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101687

20. VANCINE, M. H. et al. The Atlantic Forest of South America: Spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 291, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110499.

21. NOBRE, C. Mudanças climáticas e a biodiversidade brasileira. *Observatório do Amanhã, 2024*. Disponível em: https://museudoamanha.org.br/pt-br/mudancas-climaticas-e-a-biodiversidade-brasileira. Acesso em: 21 mar. 2024.

22. REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: an opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002

23. MANES, S.; VALE, M. M. Achieving the Paris Agreement would substantially reduce climate change risks to biodiversity in Central and South America. *Regional Environmental Change*, v. 22, n. 60, 2022. DOI: 10.1007/s10113-022-01904-4

24. CAMPOS, F. S. et al. Searching for Networks: Ecological Connectivity for Amphibians Under Climate Change. *Environmental Management*, 2019. DOI: 10.1007/s00267-019-01240-0.

25. SALES, L. P. et al. Model uncertainties do not affect observed patterns of species richness in the Amazon. *PLOS ONE*, v. 12, n. 10, e0183785, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183785

26. FERREIRA, G. A. et al. Projected responses of Cerrado anurans to climate change are mediated by biogeographic character. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 20, n. 2, p. 126–131, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.12.001

27. MALECHA, A.; MANES, S.; VALE, M. M. 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*, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.03.004

28. GIANNINI, T. C. et al. Climate change in the Eastern Amazon: crop-pollinator and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Regional Environmental Change*, v. 20, n. 1, p. 9, 2020. DOI: 10.1007/s10113-020-01611-y

29. MACIEL, E. A. et al. Climate change forecasts suggest that the conservation area network in the Cerrado-Amazon transition zone needs to be expanded. *Acta Oecologica*, v. 112, 103764, 2021. DOI: 10.1016/j.actao.2021.103764

30. BITENCOURT, C. et al. The worrying future of the endemic flora of a tropical mountain range under climate change. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, v. 218, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1016/j.flora.2015.11.001

31. ADAPTACLIMA. *Biodiversidade e Ecossistemas no Contexto da Mudança do Clima*. Disponível em: http://adaptaclima.mma.gov.br/biodiversidade-e-ecossistemas-no-contexto-da-mudanca-do-clima. Acesso em: 21 mar. 2024.

32. DÁVALOS, N. E. B.; RODRIGUES FILHO, S. The Tuxá indigenous social network, interaction and exchange of information for the promotion of adaptive measures in the face of climate change. *Sustainability in Debate*, v. 13, n. 3, p. 246–278, 2022. DOI: https://doi.org/10.18472/SustDeb.v13n3.2022.46065

33. MENDES, P. D. A. G. et al. Políticas públicas e adaptação às mudanças climáticas: três estudos de caso na região semiárida brasileira. *Sustentabilidade em Debate*, v. 13, n. 3, p. 209–245, 2022. DOI: https://doi.org/10.18472/SustDeb.v13n3.2022.46064

34. PINHO, P. F. et al. Climate change affects us in the tropics: local perspectives on ecosystem services and well-being sensitivity in Southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 22, p. 89, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-022-01938-8

35. MOUTINHO, P. et al. The role of Amazonian Indigenous Peoples in fighting the climate crisis. *Science Panel for the Amazon*. Policy Brief. New York: The Amazon We Want, 2022. Disponível em: https://files.unsdsn.org/PB-Indigenous-en.pdf. Acesso em: 01 mar. 2024.

36. COPERTINO, M. S. et al. Zonas costeiras. In: NOBRE, C.; MARENGO, J. (orgs.). Mudanças Climáticas em Rede: Um Olhar Interdisciplinar. São José dos Campos: INCT, 2017. p. 608. Disponível em: https://mudarfuturo.fea.usp.br/wp-content/uploads/2018/02/Livro_Mudan%C3%A7as-Clinaticas-em-Rede_eBook-Conflito-de-codifica%C3%A7%C3%A3o-Unicode.pdf. Acesso em: 08 mar. 2024.

Cidades

Introdução

Cidades e áreas urbanas estão enfrentando um risco cada vez maior de perdas e danos às pessoas, aos bens (coletivos e privados) e aos ecossistemas devido às ameaças relacionadas à mudança do clima. Os processos de urbanização, da forma como historicamente acontecem, geram vulnerabilidade e exposição que se combinam com os perigos da mudança do clima para gerar riscos e impactos sobre as cidades[1].

As cidades são sistemas complexos, compostos por múltiplos subsistemas geridos setorialmente (saneamento, energia, transporte, economia, áreas verdes, dentre outros), que interagem com eventos climáticos, em um cenário de mudança do clima, produzindo riscos complexos - com combinações, acúmulo e interferências múltiplas entre setores, no tempo e no espaço. Tais riscos são determinados pela condição de vulnerabilidade e exposição desses subsistemas às ameaças climáticas. Além de impactos diretos na população como é o caso de mortes e danos causados pelos desastres geo-hidrológicos e dos efeitos das ondas de calor na saúde, os bens e a infraestrutura urbana, os sistemas de energia, de saneamento básico e mobilidade urbana também podem ser afetados de diferentes formas, o que torna o planejamento da adaptação e a governança da mudança do clima nas cidades desafiadores.

Os impactos climáticos nas cidades são sentidos de forma desigual pelas comunidades urbanas, sendo que populações e territórios empobrecidos e marginalizados (economicamente, socialmente, politicamente e geograficamente) são os mais afetados. Este cenário de injustiça socioclimática é agravado por um crescimento urbano concentrado em regiões onde as desigualdades estruturais são maiores (dados apontam 90% do crescimento urbano entre 2015 e 2020 concentrado nas regiões de maior desigualdade no planeta)[1]. O último Censo[1] apontou que 87% dos brasileiros vivem em áreas urbanas, ou seja, a maior parte da população, e que o país tem mais de 12 mil favelas e comunidades urbanas, onde vivem 16,4 milhões de pessoas (8% da população brasileira), o que reforça a importância da adaptação para lidar com os riscos climáticos, de forma justa e equitativa.

Impactos observados

Dentre os impactos observados nas cidades, os que ficam mais evidenciados são os desastres relacionados a alagamentos e a deslizamentos de terra em encostas, que são amplificados com o aumento de intensidade e frequência de eventos de chuvas devido à mudança do clima, podendo causar danos a edificações e infraestruturas urbanas e afetar redes de abastecimento de alimentos, água e energia. A maior parte das ocorrências de desastres no Brasil ocorre nas regiões metropolitanas, onde há alta concentração populacional e de infraestrutura, definindo alta exposição[2,3,4].

Segundo dados do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, publicados no Atlas Digital de Desastres no Brasil, entre os

anos de 2013 e 2022, os desastres naturais atingiram 91,7% dos municípios brasileiros e causaram R$ 374,4 bilhões de danos materiais e prejuízos registrados em todo o país, atualizados para valores de dezembro de 2022. Nessa década foram mais de 1,77 milhão de moradias danificadas e quase 300 mil destruídas, afetando cerca de 4,76 milhões de pessoas. A região Nordeste acumulou os maiores danos materiais e perdas financeiras (37%), seguido do Sul (31%) e do Sudeste (17%), sendo que o período de 2020 a 2022 concentra 47% deste total[5].

A mobilidade urbana também tem sido afetada pela mudança do clima. No Norte do país, por exemplo, o deslocamento de pessoas e bens depende de uma infraestrutura de transporte altamente suscetível a inundações e alagamentos que dificultam o transporte rodoviário, e a secas, que limitam o transporte fluvial. Este cenário é agravado pela rápida expansão populacional e territorial, acompanhada de processos de planejamento inadequados ou insuficientes e pela carência de infraestrutura de saneamento e transporte, principalmente. Essa condição é resultado de um modelo de urbanização insustentável, reproduzindo desigualdade territorial e contribuindo para o aumento da exposição, vulnerabilidade a eventos extremos de chuvas e secas[6] e, consequentemente, contribuindo para o aumento dos riscos associados à mudança climática.

Em cidades litorâneas, o aumento do nível do mar tem causado inundações costeiras, redução da economia baseada em atividades de agricultura e turismo, além da salinização de reservas de água subterrânea. Apesar da taxa de elevação relativa do nível do mar não ser homogênea em toda a zona costeira, a estimativa é de um valor médio global de +3,37 mm/ano nas últimas três décadas, superior a períodos anteriores. Em Cananeia, litoral do estado de São Paulo, por exemplo, dados observacionais de 50 anos indicaram aumento do nível do mar de 4,2 mm por ano [2,3,4].

Os impactos relacionados ao aumento de temperatura podem ampliar a demanda por energia e intensificar as ilhas de calor, com implicações na saúde pública. As ondas de calor estão associadas ao aumento de mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias e número de excesso de morte entre 2000-2018 em dias de ondas de calor foi de 48 mil mortes em 14 grandes capitais brasileiras[7].

As cidades também sofrem os impactos sistêmicos relacionados às secas no país. Por exemplo, as secas nos territórios das bacias hidrográficas que atendem as cidades e demais áreas produtivas podem causar a escassez de água, aumento dos preços dos alimentos, distúrbios no sistema elétrico e processos de migrações[3].

As secas têm sido cada vez mais frequentes e mais amplas, afetando todo o território brasileiro, como as que ocorreram em 2021 no oeste dos estados de São Paulo e Paraná, e em várias outras regiões do Brasil entre 2014-2015 e entre 2019-2021, e mais recentemente na região Norte em 2023. A seca extrema de 2014-2015 resultou em cerca de 40 milhões de pessoas em situação de risco nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Adicionalmente, verificou-se que, diante da necessidade de economia residencial de água, desde 2014 na região metropolitana de São Paulo, famílias de bairros mais ricos, que dispõem de meios para redução de consumo sem perda de conforto, vêm utilizando medidas de racionalização do consumo baseadas em tecnologia, como a utilização eficiente de máquinas de lavar roupas e louça [8,9,10,11].

O abastecimento energético nas cidades também tem sido afetado por episódios de secas severas ou prolongadas. As secas na região Sul têm tido impacto na produção de energia elétrica. Nesta região estão as bacias do Rio Uruguai e grande parte da bacia do Rio Paraná, onde está instalada a usina de Itaipu, uma das maiores do mundo. A seca de 2019-2020 na região Sul, por exemplo, teve impacto negativo sore a produção de energia elétrica nas usinas Itaipu, Segredo e Passo Real, com destaque para o ano 2020, em que foi registrada a menor vazão da série histórica para a bacia afluente ao reservatório da UHE Itaipu. A pressão das secas sobre a produção hidrelétrica ocasiona problemas como diminuição da oferta de energia, originando à aplicação de sistemas de rodízio e aumento de tarifas. Na seca de 2014 e 2015, na grande São Paulo, por exemplo, o aumento da tarifa de energia chegou a 25% para usuários na região[12].

Os impactos dos eventos de seca na produção agrícola e pecuária, por outro lado, afetam o abastecimento de alimentos nas cidades, podendo gerar déficit alimentar e impactos socioeconômicos relevantes, principalmente em países com alta dependência da agricultura e serviços do primeiro setor, como é o caso do Brasil. A seca de 2021, por exemplo, causou atraso no plantio e redução na produtividade de algumas culturas agrícolas da região Sudeste, tais como a soja, milho, café, mandioca e trigo. Apenas no mês de setembro desse ano, o estado de São Paulo apresentou o maior número de municípios impactados pela seca, com mais de 80% da área produtiva afetada[9].

Riscos e vulnerabilidades

Os riscos de desastres no contexto da mudança climática são determinados pela combinação das ameaças climáticas com a exposição de pessoas e bens a essas ameaças e a sua condição de vulnerabilidade. Esta última é definida pela sensibilidade do ambiente físico e capacidade adaptativa de pessoas, comunidades e instituições que compõem o sistema urbano. As regiões com histórico de desastres ocasionados por deslizamentos de terra e movimentos de massa, notadamente os estados de Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo, nas regiões Sul e Sudeste, bem como Bahia e Pernambuco, no Nordeste, apresentam maior probabilidade de ocorrência de novos eventos dessa natureza. As maiores vulnerabilidades concentram-se nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, onde as condições sociais e econômicas e o acesso a serviços de infraestrutura urbana da população são insatisfatórios[4,5,13,14].

As regiões Sul e Sudeste do Brasil, caracterizadas por significativa densidade populacional e padrões insustentáveis de urbanização, muitas vezes acompanhados por déficits de infraestrutura, apresentam risco elevado em eventos de alagamento. A faixa leste do país apresenta concentração significativa de população sujeita a esse risco, amplificado pela ameaça de elevação do nível do mar. A localização de populações em áreas de risco geo-hidrológico com ameaças climáticas favorece a propensão a desastres desencadeados por situações de alagamento. As regiões Norte e Nordeste são fortemente caracteriza-

das por elevada vulnerabilidade social e por dificuldades dos municípios em lidar com os desastres em situações de alagamento[4,5,13,14].

A maior vulnerabilidade em relação a alagamentos e movimentos de massa e deslizamentos de terra está concentrada nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste. A alta vulnerabilidade está relacionada à deficiência no uso de instrumentos de planejamento e gestão urbanas, tais como mapeamento de áreas de risco e planos de prevenção a desastres e de contingenciamento; baixa capacidade de coordenação de resposta, como utilização de sistemas de alerta pela Defesa Civil; bem como insuficiência de recursos humanos e orçamentários para tal sistema; e existência de políticas, programas e ações, desde infraestrutura urbana, como sistemas de drenagem, até campanhas educativas e sistemas de alerta e monitoramento antecipado. Quanto à vulnerabilidade social, existe uma relação entre a população exposta a desastres geo-hidrológicos e baixos níveis de educação formal, bem como baixa renda, situações mais evidentes nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste[5,13,14,15].

As regiões mais suscetíveis a deslizamentos de terra e alagamentos em Recife (PE) são as regiões próximas a Olinda, ao norte, e Jaboatão dos Guararapes, ao sul. Essas áreas são as que apresentam maiores taxas de pobreza e densidade populacional, revelando a interseção entre vulnerabilidade social e ambiental. O aumento da exposição a esses eventos climáticos extremos é acentuado por grandes momentos de expansão e adensamento urbanos desde 1940, uma transformação urbana que, embora tenha impulsionado o desenvolvimento, também contribuiu para a crescente vulnerabilidade das comunidades diante de eventos climáticos extremos[16].

Importante destacar que os mais vulneráveis a deslizamentos de terra e inundações são pessoas não brancas e de baixa renda. Em caso de desastres no contexto urbano, as populações com a mobilidade mais afetada são as mais vulnerabilizadas. Na cidade do Rio de Janeiro, uma parcela significativa da população está exposta a diferentes formas de risco, sendo que os desafios relacionados à mobilidade urbana evidenciam a segregação socioambiental como um fator que contribui para a vulnerabilidade à mudança do clima no contexto das cidades[17,18].

Outro problema que vem acometendo as grandes cidades brasileiras se relaciona às ondas de calor. Alguns grupos populacionais, como os idosos, são mais sensíveis às doenças respiratórias e cardiovasculares. No Brasil, um número elevado de excesso de mortes (cerca de 48 mil) foi relacionado com ondas de calor, no período de 2000-2018, em 14 capitais brasileiras[7]. A inequidade no acesso à atenção primária de saúde torna alguns grupos mais suscetíveis à mortalidade em episódios de ondas de calor. Estudos mostram que nos grupos mais suscetíveis, por este motivo, se encontram pessoas não brancas, com menores níveis de escolaridade, idosos e mulheres[7,19].

Destaca-se que a mudança do clima pode intensificar os riscos climáticos nas cidades quando há maiores desigualdades socioterritoriais. O acesso à água na cidade depende do bom funcionamento de todo o sistema hídrico, que começa nas áreas produtoras de água e culmina nos usuários nas cidades, desde os domicílios até o comércio, indústria e outros. Os baixos níveis dos reservatórios resultam no desabastecimento de água, intermitência do abastecimento ou rodízios que dificultam o acesso à água, trazendo prejuízos sociais,

econômicos e sociais para a população e os serviços existentes nas cidades. Populações em áreas periféricas têm sido as mais afetadas pela irregularidade no acesso à água em caso de escassez hídrica, o que leva a gestão municipal e a população a buscar alternativas como caminhão-pipa, soluções não seguras sanitariamente, com elevado valor e sem regularidade no acesso[2,10,20,21].

A oferta de alimentos frescos e saudáveis nas cidades se relaciona de diversas formas com a mudança do clima na cadeia da Segurança Alimentar e Nutricional (SAN). A produção de alimentos depende de água e, em caso de secas severas, a produção pode ser severamente afetada. A distribuição depende de acessibilidade, transporte e energia (combustíveis). Para algumas áreas urbanas mais distantes do centro, o acesso ao alimento também depende da mobilidade urbano. Nas periferias, o acesso limitado e os altos valores para alimentos frescos são questões observadas principalmente pelas populações excluídas, ressaltando a desigualdade existente nas cidades [2,20,21].

Seguindo a mesma lógica, os sistemas energéticos apresentam vulnerabilidades e estão expostos a ameaças climáticas, tanto de secas severas, no caso de produção hidrelétrica, como na distribuição, em caso de eventos extremos nas cidades como observado na cidade de São Paulo e Fortaleza, por exemplo. No caso de secas severas, cujos episódios têm uma maior duração, as populações de baixa renda sofrem, ainda, com o aumento das taxas e tarifas[2,20,21].

Adaptação

A adaptação à mudança do clima nas cidades deve considerar a lógica de produção de risco , sabendo que há elevada vulnerabilidade social em áreas urbanas do país e da importância da ocupação ordenada do solo urbano, o que inclui questões de infraestrutura, serviços urbanos e governança nas cidades.

O Estado tem um papel fundamental como indutor de políticas públicas para a redução das vulnerabilidades da população à mudança do clima e de políticas adaptativas para a cidade. Incluir o conhecimento dos impactos na formulação de políticas urbanas e/ou adaptativas em outros segmentos, como habitação, transporte, saneamento, energia, alimentos, entre outros, é essencial para lidar com a vulnerabilidade. Embora alguns municípios tenham suas políticas, planos e programas municipais de mudança do clima, a não coordenação entre estes e as políticas, planos e programas de ordenamento territorial pode obstruir a efetividade das iniciativas de adaptação e redução de vulnerabilidade, assim como permitir a perpetuação de padrões de desenvolvimento urbano não resilientes e não justos.

O planejamento urbano integrado e inclusivo é considerado importante diante da intensificação de eventos extremos. A articulação entre o ordenamento e planejamento do solo urbano com as infraestruturas e serviços urbanos, como saneamento básico e drenagem pluvial, mobilidade, arborização e permeabilidade urbana tem papel importante na promoção do conforto térmico, eficiência energética e redução do efeito das ilhas de calor, além de

contribuir para redução dos impactos de alagamentos[4]. Além dos serviços de infraestrutura convencionais, as soluções híbridas, onde há a combinação da infraestrutura cinza com Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE) contribuem para aumentar a resiliência das cidades. Outras soluções, como mecanismos de seguros ou transferência de riscos, também emergem como estratégias eficazes para aliviar o ônus das populações mais vulneráveis[8].

Ferramentas como o mapeamento de áreas de risco, monitoramento de dados hidrológicos e sistemas de alerta de riscos hidrológicos, associados a iniciativas de infraestrutura, como aprimoramentos na drenagem urbana, são indispensáveis para a redução do risco de desastres[5,13]. No entanto, ainda há uma lacuna significativa entre a disponibilidade de dados sobre a ocorrência de desastres, a representação cartográfica da suscetibilidade e a identificação das áreas de risco em nível municipal, com a implementação de uma política pública eficaz que promova e execute medidas e ações para o ordenamento e planejamento territorial, focando de maneira contínua e eficiente nas regiões de risco. Embora muitos municípios possuam análises de risco e políticas relacionadas e demonstrem capacidades positivas para enfrentar a mudança do clima, a abordagem de planejamento ainda está distante do ideal, com algumas regiões exibindo melhor capacidade institucional para enfrentar os desafios atuais e futuros[23].

Em relação à segurança alimentar, hídrica e energética, observa-se a necessidade de uma governança multinível e policêntrica, tendo em vista que questões sistêmicas, como secas severas, impactam esses três setores em diferentes escalas, inclusive no âmbito local. Uma gestão eficiente dos recursos hídricos, alinhada às demandas da mudança do clima, deve assegurar o uso múltiplo da água, evitar conflitos entre os diversos setores usuários e priorizar o abastecimento humano, conforme diretrizes da Lei das Águas. No contexto urbano, destacam-se obstáculos na administração municipal, incluindo desafios administrativos, grau de comprometimento, pressões pelo uso e ocupação do solo e questões relacionadas à fiscalização. Ademais, é fundamental considerar na pauta climática a incompatibilidade entre a escala dos problemas urbanos e o alcance das autoridades subnacionais, especialmente em serviços urbanos integrados tratados nos Estatutos da Cidade e da Metrópole, uma vez que muitos impactos e serviços extrapolam os limites municipais. Essas barreiras, apesar de não serem exclusivas das questões climáticas, frequentemente se inter-relacionam, intensificando as restrições à adaptação urbana local. Assim, as complexas interações entre múltiplos setores, níveis de governo e atores estatais e não estatais são determinantes para a capacidade de resposta e adaptação das cidades diante da mudança do clima[24].

Referências

1. DODMAN, D.; B. et al. Impacts, adaptation and vulnerability. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (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: Cambridge University Press, 2022. p. 907–1040. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009325844.008

2. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

3. ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cities and climate change: challenges to Brazilian municipal Master Plans. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 22, n. 48, p. 365-394, maio/ago. 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4802

4. MANSUR, A. V. et al. Adapting to urban challenges in the Amazon: flood risk and infrastructure deficiencies in Belém, Brazil. *Regional Environmental Change*, [S.l.], v. 18, n. 5, p. 1411–1426, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-017-1269-3

5. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. *Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil. Produto 2: identificação de riscos e cenários prováveis de atuação*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: https://pndc.com.br/produto-2/. Acesso em: 23 mai. 24.

6. PARRY, L.; DAVIES, G.; ALMEIDA, O.; FRAUSIN, G.; MORAÉS, A. de; RIVERO, S.; FILIZOLA, N.; TORRES, P. Social vulnerability to climatic shocks is shaped by urban accessibility. Annals of the American Association of Geographers, v. 108, n. 1, p. 125-143, 2018. DOI: https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1325726

7. MONTEIRO DOS SANTOS, D.; LIBONATI, R.; GARCIA, B. N.; GEIRINHAS, J. L.; SALVI, B. B.; LIMA E SILVA, E.; et al. Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. PLoS ONE, v. 19, n. 1, e0295766, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766

8. CLARKE, B. et al. *Climate change, not El Niño, main driver of extreme drought in highly vulnerable Amazon River Basin*. London: Imperial College London, 2024. Disponível em: https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/108761. Acesso em: 20 mai. 24.

9. CUMPLIDO, M. A.; INOCENTE, M. C.; PEREIRA DE MEDEIROS, T.; SAMPAIO DE OLIVEIRA, G.; MARENGO, J. A. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, n. 19, p. 129–153, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16154 Acesso em: 20 mai. 24.

10. FRACALANZA, A. P.; PAZ, M. G. A. A água como bem "comum": um olhar para a crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. In: *WATERLAT-GOBACIT NETWORK Working Papers: Thematic Area Series*, v. 5, n. 3, 2018. Disponível em: https://waterlat.org/WPapers/WGWPVol-5No3.pdf. Acesso em: 20 mai. 24.

11. SOUZA, V. V. C. de; FRACALANZA, A. P.; CÔRTES, P. L. Injustiça hídrica em período de escassez: uma análise do caso do município de São Paulo. *Ambiente e Sociedade*, São Paulo, v. 28, 2025. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc00502vu28L2TD

12. FERNANDES, V. R. et al. Secas e os impactos na região Sul do Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, v. 28, ano 17, jan./jun. 2021. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14748. Acesso em: 8 mar. 24.

13. AdaptaBrasil-MCTI. *SE Desastres geo-hidrológicos*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/ Acesso em: 10 fev. 24.

14. SAITO, S. M.; DIAS, M. C. de A.; ALVALÁ, R. C. dos S.; STENNER, C.; FRANCO, C. de O.; RIBEIRO, J. V. M.; SOUZA, P. A. de; SANTANA, R. A. S. de M. Urban population exposed to risks of landslides, floods and flash floods in Brazil. *Sociedade & Natureza*, v. 31, e46320, 2019. DOI: https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46320

15. ASSIS DIAS, M. C.; SAITO, S. M.; ALVALÁ, R. C. S.; et al. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 49, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101742

16. MARENGO, J. A.; et al. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November-December 2021. *Natural Hazards*, v. 116, p. 3617–3644, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z

17. Carvalho, C.; González, A.; Cabral, D. C. D. Scales of inequality: The role of spatial extent in environmental justice analysis. *Landscape and Urban Planning*, v. 221, p. 104369, maio de 2022. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104369

18. FREITAS, C. R.; D'AVIGNON, A. L. de A.; CASTRO, A. C. Urban social vulnerability and climate change in Rio de Janeiro city associated with population mobility. *Journal of Environmental Policy & Planning*, p. 1–14, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1674135.

19. SOUSA, T. C. M.; AMANCIO, F.; HACON, S. S.; BARCELLOS, C. Doenças sensíveis ao clima no Brasil e no mundo: revisão sistemática. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 42, e85, 2018. DOI: https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.85.

20. GIATTI, L. L.; JACOBI, P. R.; FAVARO, A. K. M. I.; et al. O nexo água, energia e alimentos no contexto da Metrópole Paulista. *Estudos Avançados*, v. 30, n. 88, p. 43–61, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-40142016.30880005.

21. GIATTI, L. L.; et al. Nexus of exclusion and challenges for sustainability and health in an urban periphery in Brazil. *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 53, p. 69, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0102-311X00007918.

22. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

23. TORRES, P. H. C.; et al. Vulnerability of the São Paulo macro metropolis to droughts and natural disasters: local to regional climate risk assessments and policy responses. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 1, Art. 114, p. 1–16, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13010114.

24. DI GIULIO, G. M.; TORRES, R. R.; LAPOLA, D. M.; et al. Bridging the gap between will and action on climate change adaptation in large cities in Brazil. Regional Environmental Change, v. 19, n. 8, p. 2491–2502, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-019-01570-z

i. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE. 2022

Energia

Introdução

Nas últimas décadas, o Brasil tem enfrentado desafios significativos na geração e distribuição de energia elétrica devido a eventos climáticos, resultando em prejuízos públicos consideráveis. Esses desafios têm levantado preocupações sobre a vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro frente à mudança do clima. A dependência histórica da hidroeletricidade tem sido impactada por chuvas abaixo da média, afetando a capacidade de geração hidrelétrica em várias regiões do país. Além disso, eventos climáticos extremos, como ciclones extratropicais, têm impactado o sistema de transmissão e distribuição, resultando em interrupções no fornecimento de eletricidade. O aumento na demanda por eletricidade, especialmente devido ao maior uso de sistemas de condicionamento térmico em resposta ao aumento das temperaturas, tem sido outro desafio enfrentado pelo setor. Diante desses desafios, o sistema elétrico brasileiro enfrenta a necessidade de adaptação aos efeitos da mudança do clima. Este texto aborda os impactos observados, riscos e vulnerabilidades associados à segurança energética do Brasil.

Impactos observados

Nas últimas décadas, todas as regiões do Brasil sofreram prejuízos públicos na geração e distribuição de energia elétrica devido a eventos climáticos, totalizando cerca de R$ 1,5 bilhão em prejuízos para o setor. A região Norte teve prejuízo de R$ 46,9 milhões; o Nordeste, R$ 247,6 milhões; o Centro-Oeste, R$ 30,8 milhões; o Sudeste, R$ 478,7 milhões; e o Sul, R$ 632,8 milhões. A região Sul acumulou R$ 632,8 milhões em prejuízos[1].

Historicamente, a hidreletricidade tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro, representando quase dois terços da capacidade instalada do parque gerador nacional[2]. O país possui um sofisticado Sistema Interligado Nacional (SIN), que é uma interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, que propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. No entanto, a alta dependência de chuvas por parte das hidrelétricas causou um alto impacto no setor energético de 2012 a 2016 devido a uma sequência de estiagens nas principais regiões de geração hidrelétrica. As regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, foram as mais afetadas, resultando em aumentos significativos nos preços da energia e insegurança energética[3].

Hidreletricidade

Nas últimas duas décadas, a geração de energia hidrelétrica no Brasil tem enfrentado dificuldades devido às chuvas abaixo da média histórica. Em 2021, a bacia do Paraná, onde se concentra a maior parte da geração hidrelétrica do país, enfrentou uma crise hídrica afetando o suprimento energético do país[2]. Dados históricos mostram um declínio de mais de 25% na média de chuva na bacia do São Francisco nos últimos 57 anos[4]. Houve uma diminuição da geração hidrelétrica em praticamente todos os subsistemas, exceto no Sul[5].

Energia eólica

Devido ao tempo relativamente curto de operação (de forma mais relevante, desde 2008), até o momento não existe uma análise que permita identificar os impactos observados na geração de energia eólica no Brasil devido a alterações climáticas. No entanto, é possível fazer uma estimativa indireta com base nos dados observacionais de velocidade de vento. Em geral, as maiores médias sazonais e anuais de vento ocorrem na costa brasileira. Dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mostram que, exceto no inverno, as velocidades do vento diminuíram de 1980 a 2014 na maior parte do Brasil. No entanto, dados de reanálise apresentam um aumento estatisticamente significativo nas velocidades do vento sazonal e anual em todo o Brasil, exceto em Minas Gerais. Essa inconsistência entre dados de reanálise e observações locais pode estar associada ao fato da maioria das estações meteorológicas do INMET estarem localizadas em ambientes urbanos, sendo assim afetadas por mudanças na urbanização[6]. Dessa forma, os resultados precisam ser interpretados com cautela e estudos mais aprofundados são necessários para estimar possíveis alterações no regime de vento nas últimas décadas.

Energia Solar

Devido ao tempo relativamente curto de operação (de forma mais relevante, desde a década de 2010), até o momento não existe uma análise que permita identificar os impactos observados na geração de energia solar no Brasil devido a variações climáticas. No entanto, existem evidências de um aumento na radiação solar descendente de onda curta (DSWR, na sigla em inglês) em todas as regiões do Brasil[7].

Bioenergia

Impactos na produção de culturas bioenergéticas foram observados durante a seca que afetou o Sudeste do Brasil em 2014. Esse evento teve um efeito significativo na produtividade dos canaviais, especialmente em São Paulo, o maior produtor de cana-de-açúcar do país. A queda na produtividade nessa região representou uma redução na produção nacional de 2,7% na safra 2014/2015 em relação à safra anterior. Apesar disso, houve um aumento de 12% na produção na região Norte-Nordeste[8]. Estudo de regressão com dados de 1990 a 2015 no estado da Paraíba concluiu que 1% de aumento na temperatura reduziu a produção de cana-de-açúcar em 5,7%. Quanto à soja, utilizada no biodiesel, a seca é considerada um dos fatores abióticos mais devastadores e tende a se tornar mais severa e frequente no Brasil. Entre 1980 e 2016 estimou-se que para cada aumento de 1°C na temperatura média do ar, os rendimentos da soja diminuíram entre 1% e 6%. Em 2012, no bioma Pampa, eventos de geada e granizo resultaram em uma redução de 38% na produção de soja[9].

Transmissão e distribuição

O SIN conecta as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Região Norte, atendendo a cerca de 96% da capacidade total de produção de energia do país. Em alguns casos, interrupções em certas linhas de transmissão podem ser compensadas por outras vias. No entanto, eventos como ciclones extratropicais têm afetado o sistema de transmissão e distribuição no sul do Brasil nos últimos anos, como o ciclone Catarina em 2004 e o ciclone bomba em 2020. A exemplo, o ciclone de 2020 interrompeu o fornecimento de eletricidade para 1,5 milhão de unidades consumidoras e causou uma perda de mais de R$ 60 milhões no sistema de geração e distribuição de eletricidade em Santa Catarina[8]. Além disso, a incidência de descargas de raios nas linhas de transmissão representa um desafio significativo para a operação e a segurança do sistema elétrico brasileiro. A análise da incidência de descargas de raios revelou uma tendência significativa de aumento da atividade de descargas no verão e na primavera na região Sul do Brasil[10]. Mais estudos são necessários para entender como esse fenômeno vem impactando a transmissão de energia no país nas últimas décadas.

Demanda

Aumentos na temperatura levam a um aumento na demanda de eletricidade devido ao maior uso de sistemas de resfriamento. Entre 2010 e 2019, houve efeitos de ondas de calor sobre a demanda elétrica, principalmente nas regiões Sudeste e Sul. Em janeiro de 2014 e 2015, houve um consumo médio de energia 19% e 22% superior ao esperado para o

subsistema Sudeste, respectivamente[11]. Em janeiro de 2019, uma onda de calor na região Sudeste fez o consumo de eletricidade residencial aumentar em 7,3% no estado de São Paulo e 8% no estado do Rio de Janeiro[8]. Mais recentemente em 2023, o Brasil atravessou uma onda de calor que fez com que o pico de carga superasse os 100 GW (equivalente a sete vezes a capacidade instalada de Itaipu), um recorde de demanda elétrica no país até o momento[11].

Riscos e Vulnerabilidades

O sistema elétrico brasileiro está pouco preparado para lidar com os efeitos adversos da mudança do clima[12]. As mudanças no regime de vazões e sazonalidade das chuvas impactam o sistema hidrelétrico, enquanto o regime de ventos e radiação solar define o potencial da geração eólica. A presença de nuvens e variações na temperatura afetam a geração solar. Eventos climáticos extremos impactam a produção e colheita de culturas para bioenergia. A demanda por energia é afetada por temperaturas mais altas, exigindo maior demanda energética para condicionamento térmico. Isso pode resultar em aumentos de custos na geração de eletricidade, investimentos em novas usinas e redes de transmissão, impactando a população e setores econômicos com aumento nos preços finais da eletricidade[5].

As análises indicam que a mudança climática pode ter um impacto significativo no sistema elétrico brasileiro, dada sua dependência predominante da hidroeletricidade[12]. O sistema AdaptaBrasil-MCTI aponta que o sistema de energia brasileiro poderia enfrentar um déficit de oferta e dificuldades de acesso à energia. Os cenários futuros indicam que o risco de indisponibilidade de energia será alto ou muito alto em todas as regiões do país, com destaque para Centro-Oeste, Sudeste e os Estados do Acre e de Roraima. Isso se daria principalmente devido a indisponibilidade de energia hidrelétrica e aumento na demanda por condicionamento térmico em resposta a temperaturas mais altas. Os cenários também indicam um aumento no risco de falta de acesso à energia, principalmente na região Norte e nos grandes centros urbanos[13].

A expansão da oferta de eletricidade, em cenários sem esforços de mitigação e adaptação, pode tornar o sistema mais intensivo em carbono, envolvendo o uso de carvão e gás natural. Em cenários de mitigação, fontes renováveis, como eólica e solar, ganham importância, mas a hidroeletricidade permanece relevante até 2050[12]. No entanto, fontes renováveis podem ter dificuldades em suprir a demanda devido a imprevisibilidade do clima e ao aumento da frequência e gravidade de eventos extremos[14]. A infraestrutura de transmissão e distribuição precisa ser compatível com os desafios impostos. No setor de bioenergia, há preocupações com a oferta de insumos para biocombustíveis e a redução de áreas aptas para a lavoura de cana-de-açúcar, afetando a produção de etanol e incrementando desafios para alcançar metas de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira[5].

Fontes

Hidreletricidade

O sistema hidrelétrico brasileiro enfrenta desafios significativos devido à mudança do clima. A mudanças nos regimes de chuvas, a crescente escassez de água e a competição por esse recurso afetam a produção de energia hidrelétrica[3]. Projeções indicam possíveis reduções nos fluxos naturais anuais de água e Energia Natural Afluente (ENA) para os subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste[15]. A mudança do clima causará interrupções mais frequentes de geração hidrelétrica de baixa vazão e menos operação em plena capacidade. O aproveitamento hidrelétrico ainda representa um elemento importante de ampliação de oferta de energia elétrica no sistema interligado nacional, principalmente devido a flexibilidade operativa e a capacidade de armazenamento de energia em seus reservatórios. No entanto, a implantação de novas centrais hidrelétricas na região Norte pode ser comprometida devido à redução das precipitações projetadas pelos modelos climáticos e ao desmatamento[16,17,18]. Principalmente se forem usinas a fio d"agua, visto que não se conseguirá armazenar as vazões em grandes reservatórios, minimizando o poder de amenizar a intensificação da sazonalidade. Consequentemente, o preço mínimo de venda de eletricidade para que os projetos alcancem o ponto de equilíbrio mais que dobra em muitas represas propostas, tornando a energia hidrelétrica não competitiva diante de fontes renováveis como eólica e solar[19].

Energia eólica

A energia eólica é afetada pela variabilidade da velocidade do vento[12]. Parte do sucesso da exploração da energia eólica no Brasil pode ser atribuída às características do recurso eólico, como sua abundância e regularidade, principalmente na Região Nordeste. Estudos indicam que o Brasil possui um enorme potencial eólico a ser explorado[2] e com uma possibilidade do aumento desse potencial nas próximas décadas[8]. Estima-se que o potencial de energia eólica aumentará nas regiões Nordeste e Sul, e principalmente, na costa do Nordeste[20,21]. Embora ainda em fase de definição do arcabouço regulatório, a costa brasileira apresenta um enorme potencial de geração eólica *offshore*[2]. No entanto, devido às grandes incertezas associadas ao número limitado de modelos e cenários de mudanças climáticas globais usados nos estudos atuais, os resultados devem ser interpretados com cautela[22].

Energia Solar

A energia solar vem sendo a fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada anualmente no mundo e essa tendência mundial também se aplica ao Brasil. O país apresenta índices elevados e relativamente uniformes de incidência de radiação solar em seu território, o que permite desenvolver projetos solares viáveis[2]. Alterações de variáveis climáticas como

irradiância solar global horizontal, velocidade do vento na superfície e temperatura do ar na superfície podem afetar a geração de energia fotovoltaica[23]. Estudos indicam a possibilidade de um aumento no potencial de energia solar no país. Regiões como o Nordeste podem se tornar grandes produtoras de energia solar, com projeções de aumento no recurso solar[20]. Em geral, as projeções apontam para um aumento na luminosidade na região Norte e Nordeste, porém deve-se levar em conta que o aumento das temperaturas em todo o país pode impactar negativamente a geração de energia solar por mudanças na cobertura de nuvens e eficiência das células fotovoltaicas[24]. Apesar desses impactos, é improvável que as mudanças do clima comprometam o potencial de geração solar fotovoltaica no setor residencial brasileiro[23].

Bioenergia

A mudança do clima tem o potencial de afetar negativamente a produção de biocombustíveis, como os provenientes de cana-de-açúcar e soja, devido à escassez hídrica e aos eventos climáticos extremos[12]. Para a soja, há uma tendência de aumento de áreas de alto risco em todos os biomas, exceto no Pampa. No bioma Cerrado, as áreas aptas para a cultura de soja diminuem com o aumento do aquecimento, com potenciais impactos na oferta de matéria-prima para biodiesel. Na Mata Atlântica, a redução projetada é mais intensa. Quanto ao etanol de cana-de-açúcar, as áreas de baixo risco climático diminuem, indicando maior vulnerabilidade da cultura[5]. As condições climáticas futuras podem afetar 97,5% das áreas zoneadas adequadas para a cana-de-açúcar[25]. A competição pelo uso de água também influencia a vulnerabilidade da cana-de-açúcar. A produção de biocombustíveis, especialmente no Nordeste, pode ser negativamente afetada, com uma mudança potencial das zonas adequadas para o cultivo de oleaginosas para a região Sul[26]. Além disso, em um cenário onde a produção de alimentos pode ser afetada, a competição por terras entre culturas alimentares e energéticas pode ser intensificada[12]. Esses resultados alertam para possíveis impactos negativos da mudança do clima na produção de biocombustíveis, apontando a necessidade de cuidadosas considerações e planejamento futuro[5].

Transmissão

O sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, que suporta cerca de 96% da capacidade total de produção de energia do país, conectando várias regiões, é particularmente vulnerável a eventos climáticos extremos, como precipitação intensa e ventos fortes[8]. Há também impactos diretos na infraestrutura energética, como deslizamentos, enchentes e danos aos ativos da rede[5]. Os resultados mostraram que são esperadas alterações significativas nos regimes de vento extremo na região Sul do Brasil, servindo de alerta para os tomadores de decisão[27].

Demanda

A demanda por eletricidade é proveniente de diversos setores, sendo o setor de edificações (residencial e serviços) o principal, com 42% da demanda, seguido pelo setor industrial com 32%, a agricultura com 5% e o transporte com 0,4%[8]. Segundo o Plano Nacional de Energia 2050[2], até 2050, o consumo potencial de energia elétrica do País pode triplicar em relação ao patamar do ano base (2015). O consumo de energia é diretamente influenciado pelos efeitos do aquecimento global pois aumentos na temperatura levam ao maior uso de sistemas de condicionamento térmico. Além disso, o aumento nas temperaturas pode levar a uma maior necessidade de irrigação na agricultura, aumentando ainda mais o consumo de energia desse setor[12].

Referências

1. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/#. Acesso em: 21 mar. 2024.

2. BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: MME; EPE, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050. Acesso em: 29 mai. 2024.

3. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

4. DE JONG, P. et al. Hydroelectric production from Brazil"s São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. Science of The Total Environment, v. 634, p. 1540–1553, set. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.405

5. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

6. GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Surface wind speed: trend and climatology of Brazil from 1980–2014. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 1060–1073, fev. 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.5237

7. ZULUAGA, C. F. et al. Climatology and trends of downward shortwave radiation over Brazil. *Atmospheric Research*, v. 250, p. 105347, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105347

8. VASQUEZ-ARROYO, E. et al. Climate impacts in the Brazilian energy security: analysis of observed events and adaptation options. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, n. 3, p. 157-196, 4 jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33838

9. FIORINI, A. C. O. et al. How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 8, art. 083001, 2024. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f42

10. NACCARATO, K. P.; DOS SANTOS, A. P. P.; DE LIMA, F. J. L. Incidence of lightning strikes to power transmission lines in the South of Brazil: current and future climate. In: *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Cape Town, South Africa: IEEE, 2 out. 2022. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9942473/ Acesso em: 29 fev. 2024.

11. CRUZ, T. et al. Os impactos da mudança do clima no sistema energético brasileiro, em 7 pontos. *Nexo Políticas Públicas*, 25 mar. 2024. Disponível em: https://pp.nexojornal.com.br/perguntas-que-a-ciencia-ja-respondeu/2024/03/25/os-impactos-da-mudanca-do-clima-no-sistema-energetico-brasileiro-em-7-pontos. Acesso em: 10 mar. 2024.

12. SCHAEFFER, R. et al. Climate change and the energy sector in Brazil. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. (org.). *Climate Change Risks in Brazil*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 143-179. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_6

13. ADAPTABRASIL-MCTI. *Segurança Energética (seca)*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 15 jan. 2024.

14. LIMA, J. W. M.; ALVES, L. M.; MARENGO, J. A. *Vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro frente à crise climática global e propostas de adaptação*. São Paulo: ClimaInfo, 2023. Disponível em: https://climainfo.org.br/wp-content/uploads/2023/05/Sumario-Executivo_RelatorioCoalizaoEnergiaLimpa-1.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.

15. SILVEIRA, C. S. et al. Naturalized streamflows and Affluent Natural Energy projections for the Brazilian hydropower sector for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios of the CMIP6. *Journal of Water and Climate Change*, v. 13, n. 1, p. 315–336, 2022. DOI: https://doi.org/10.2166/wcc.2021.352

16. ARIAS, M. E. et al. Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 6, p. 430–436, 16 mar. 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-y

17. BORGES, P. A.; CHAFFE, P. L. B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change*, v. 155, n. 1, p. 37–57, jul. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-019-02430-9

18. BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503–522, abr. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9

19. ALMEIDA, R. M. et al. Climate change may impair electricity generation and economic viability of future Amazon hydropower. *Global Environmental Change*, v. 71, p. 102383, nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102383

20. DE JONG, P. et al. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. *Renewable Energy*, v. 141, p. 390–401, out. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086

21. RUFFATO-FERREIRA, V. et al. A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 1124–1137, maio 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.020

22. PEREIRA DE LUCENA, A. F. et al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renewable Energy*, v. 35, n. 5, p. 904–912, maio 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.022

23. SANTOS, A. J. L.; LUCENA, A. F. P. Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. *Energy and Climate Change*, v. 2, art. 100062, dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100062

24. ZULUAGA, C. F. et al. The climate change perspective of photovoltaic power potential in Brazil. *Renewable Energy*, v. 193, p. 1019–1031, jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.063

25. GRANCO, G.; CALDAS, M.; DE MARCO, P. Potential effects of climate change on Brazil's land use policy for renewable energy from sugarcane. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 144, p. 158–168, maio 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.033

26. DE LUCENA, A. F. P. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 879–889, mar. 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.029

27. LIMA, F. J. L. D. et al. Variações na frequência de ventos extremos e seu impacto no setor de energia. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 3, 16 dez. 2020. DOI: https://doi.org/10.47168/rbe.v26i3.575

Igualdade Racial e Combate ao Racismo

Introdução

O Brasil é um país de dimensões continentais, que abriga grande diversidade de etnias, grupos populacionais e culturais, devido a construção histórico-política como um território, primeiramente habitado por ameríndios, que passou por um longo processo de colonização, e o ingresso de populações negras advindas do continente africano como mão de obra escravizada. Diante do cenário de mudança do clima, este contexto econômico, racial e social da população brasileira precisa ser considerado, visto que diferentes grupos populacionais têm enfrentado maiores adversidades nos impactos climáticos. Portanto, um plano de adaptação climática deve propor e implementar ações que priorizem a justiça climática e o enfrentamento ao racismo ambiental como forma de reparação histórica com relação às desigualdades materiais existentes, para que os impactos das mudanças do clima não intensifiquem tais disparidades e injustiças.

Ao considerar os impactos climáticos sobre as populações pretas e pardas, observa-se que estes grupos populacionais enfrentam consequências mais severas e multifacetadas. Estes impactos não são somente um reflexo das condições climáticas extremas, mas também de um contexto histórico social e econômico que amplifica sua condição de vulnerabilidade socioambiental e dificulta a possibilidade de resposta aos eventos. A compreensão desses impactos, bem como dos riscos e da vulnerabilização dessas populações é crucial para a formulação de políticas e estratégias de adaptação inclusivas e justas, visando reduzir a desigualdade racial no contexto da mudança do clima.

Embora todos os seres humanos estejam expostos à mudança do clima, observa-se que os impactos afetam desproporcionalmente os grupos sistemicamente marginalizados. Diversas injustiças ambientais estão enraizadas no "racismo, discriminação, colonialismo, patriarcado, impunidade e sistemas políticos que ignoram sistematicamente direitos humanos"[1].

Impactos observados

Os impactos da mudança do clima que afetam a população preta e parda manifestam-se de múltiplas formas, caracterizando-se pela gravidade e abrangência e envolvendo dimensões sociais, econômicas, culturais, de saúde, de infraestrutura, entre outras.

A distribuição desigual dos impactos climáticos foi observada em estudo realizado entre 2000 e 2018, que associou mortes em excesso a períodos de ondas de calor em grandes cidades brasileiras. Entre homens pretos/pardos e brancos com mais de 65 anos, a diferença na mortalidade em excesso foi de 27% em Brasília, 40% no Recife, 44% em Belém, 65% em Goiânia e 92% em Curitiba. Para mulheres com 65 anos ou mais, o aumento da mortalidade relacionada ao calor entre pretas

e pardas foi 60% maior do que entre brancas em Brasília, 82% em Goiânia e 203% em Cuiabá[2]. Esses resultados evidenciam como a interseccionalidade, incluindo gênero e idade, intensifica padrões de desigualdade.

Em 2022, as intensas chuvas em Recife que resultaram em 129 mortes e deixaram mais de 6.000 pessoas desabrigadas, ilustram como as populações pretas e pardas são vulnerabilizadas em decorrência de sua exclusão dos centros urbanos. Muitas dessas populações acabam residindo em áreas de alto risco, como encostas, morros e áreas de várzea, e enfrentam taxas de mortalidade e número de desabrigados significativamente mais altos em comparação com outras populações. Da mesma forma, a destruição de habitações e a perda de bens pessoais representam impactos diretos e imediatos dos eventos climáticos. Por viverem em regiões com infraestrutura precária, enfrentam uma recuperação mais difícil e prolongada, exacerbando as condições de pobreza[3], e perpetuando ciclos de vulnerabilização socioambiental.

Durante a crise hídrica de 2013 a 2016 na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), as populações mais vulneráveis, particularmente as populações pretas e pardas, enfrentaram desproporcionais adversidades. Residindo frequentemente em áreas com infraestrutura deficiente e limitado acesso a serviços básicos, essas comunidades sofreram intensamente com a falta de água potável. Esse cenário crítico desencadeou uma cadeia de consequências negativas, afetando severamente a saúde física e emocional, devido ao aumento de doenças transmitidas pela água e condições insalubres de moradia. A crise também agravou as condições de vida, perpetuando estigmas raciais e sociais e dificultando a manutenção da higiene pessoal. Além disso, a escassez de água impactou negativamente as oportunidades de emprego e a sociabilidade, restringindo a capacidade de engajamento em atividades sociais e exacerbando o estigma associado à pobreza e vulnerabilidade ambiental, colocando em evidência as profundas desigualdades e a urgência de políticas inclusivas e eficientes de gestão de recursos hídricos[4].

Riscos e vulnerabilidades

Os impactos climáticos observados de forma desproporcional em populações pretas e pardas estão relacionados com as condições de vulnerabilização a que estão submetidos, agravadas por fatores como o racismo ambiental, as limitações socioeconômicas e a falta de medidas de adaptação inclusivas. O conceito de racismo ambiental[3] ajuda a entender a distribuição desigual dos impactos climáticos, sendo as comunidades não brancas mais expostas a eventos extremos, situação exacerbada por práticas e políticas que negligenciam as necessidades dessas populações, resultando em uma maior frequência e gravidade dos impactos climáticos sobre elas [2,3,5,6,7].

Locais onde os moradores sofrem consequências devastadoras para a saúde física e mental e violações dos direitos humanos, bem como resultado de viver em focos de poluição e áreas altamente contaminadas pode ser considerada uma "zona de sacrifício". As mudanças do clima estão impulsionando a proliferação de zonas de sacrifício que — no Brasil - são zonas de sacrifício racial.

A vulnerabilidade das populações preta e parda aos impactos climáticos é profundamente influenciada por uma complexa trama de fatores históricos, sociais, econômicos e políticos. Essas comunidades, frequentemente situadas em áreas consideradas ilegais e/ou irregulares e desprovidas de saneamento básico e infraestrutura adequada, são diretamente afetadas por eventos climáticos adversos, como inundações e deslizamentos. As condições geomorfológicas e geográficas dessas áreas as expõem a riscos elevados de desastres e efeitos do clima, que culminam em elevados casos de desastre devido as condições socioeconômicas e de infraestrutura precária. A pobreza e a limitação no acesso a serviços e equipamentos urbanos comprometem significativamente a capacidade desses grupos de enfrentamento e de recuperação de desastres. A distribuição desigual dos impactos da mudança do clima salienta uma injustiça ambiental, onde as comunidades negras enfrentam as consequências mais severas, apesar de sua mínima contribuição histórica para os problemas climáticos atuais[2,3,5,6,7].

Há, também, uma omissão histórica por parte de estados na construção de políticas públicas que priorizem o direito das populações não brancas a um caminho para a justiça ambiental e racial. Isso leva a uma falta de proteção e apoio governamental em momentos de crise climática[3,8]. Outra questão relevante é a inexistência de alguns dados importantes para subsidiar a definição da agenda política, como, por exemplo, subnotificação de dados de cor e raça em casos de internação hospitalar[2]. A falta de dados desagregados implica no desconhecimento e dificuldade em se endereçar políticas públicas intencionalmente antirracistas.

Neste sentido, E. Tendayi Achiume, em seu relatório às Nações Unidas, alertou sobre o domínio de abordagens "daltônicas" de questões jurídicas, sociais, condições econômicas e políticas que professam um compromisso com uma imparcialidade que implica evitar a análise racial explícita em favor de tratar todos os indivíduos e grupos iguais, mesmo que esses indivíduos e grupos estejam situados de forma diferente, inclusive por causa de projetos históricos de subordinação racial. Mesmo quando as abordagens daltónicas são bem-intencionadas, o seu efeito final é o fracasso em desafiar e desmantelar estruturas persistentes de discriminação racial arraigada. Portanto, para dar resposta às disparidades raciais e étnicas em impactos das crises ecológicas, Estados Membros das Nações Unidas, funcionários e outros as partes interessadas devem explicar explicitamente esses impactos[1].

A importância da dimensão espacial na avaliação da busca pela igualdade racial e justiça climática é enfatizada pela variação espacial da vulnerabilidade e dos riscos climáticos. Análises em escalas mais amplas, como as metropolitanas e municipais, tendem a revelar a perpetuação da injustiça ambiental contra populações pretas, pardas e com menor renda, sugerindo uma dinâmica de auto exposição ao risco por parte desses segmentos, facilitada por uma distribuição socioespacialmente injusta de infraestruturas de redução de riscos, como observado nas duas maiores cidades do Brasil, São Paulo e Rio de Janeiro[9].

Adaptação

Uma política de adaptação climática capaz de promover igualdade racial traz, como primeiro desafio, a demanda por diálogo com todos os temas e setores do Plano Clima. Se por um lado, setores como Saúde, Gestão de Risco de Desastres, Cidades, Zona Costeira e Oceano, por exemplo, trazem impactos climáticos que atingem de forma desigual as populações preta e parda; por outro, as Comunidades Indígenas e Povos e Comunidades Tradicionais compartilham de pautas semelhantes, como a Justiça Climática, o decolonialismo e configuram-se, muitas vezes, como comunidades vulnerabilizadas. Portanto, a adaptação à mudança do clima requer uma abordagem integrada entre setores e de forma socialmente ampla, que considere tanto o conhecimento científico quanto o tradicional, além de promover o combate ao racismo ambiental e garantir que as medidas de adaptação climática respeitem a justiça climática. A necessidade de abordagens inclusivas e justas no planejamento e na resposta a eventos climáticos extremos é essencial para evitar a desigualdade étnico-racial nos impactos climáticos, o que demanda um compromisso renovado com a justiça social e ambiental[2,4,8].

Na busca por uma adaptação climática que promova a igualdade racial, governos de todos os níveis e o setor privado precisam se comprometer com a implementação de ações imediatas, concretas e estruturais. Estas ações devem ser projetadas para enfrentar as desigualdades raciais, que serão agravadas por questões climáticas, e não se limitar apenas a políticas de resposta, mas também focar na prevenção, mitigação, preparação, reparação, resposta e recuperação de desastres. Uma atenção especial deve ser dada às populações negras periféricas, assegurando que as políticas de adaptação climática priorizem áreas de risco, integrem saberes locais e fomentem a resiliência e sustentabilidade, com uma abordagem antirracista, participativa e interligada a outros direitos humanos fundamentais[5].

Para alcançar a justiça climática, é essencial que as políticas públicas incorporem, além das já mencionadas abordagens interseccionais, reconheçam e abordem as vulnerabilidades múltiplas e sobrepostas enfrentadas por grupos específicos, ampliando a participação desses grupos vulnerabilizados na agenda climática e estabelecendo medidas específicas para protegê-los. Além disso, é fundamental fortalecer a legislação existente e promover a educação transformadora sobre a justiça climática e suas interconexões com as desigualdades sociais. Fortalecer a atenção primária na saúde, criando estratégias para atender a população não branca, também são essenciais para atuar de forma preventiva tanto em situações extremas, como ondas de calor e desastres geo-hidrológicos, quanto em mudança no padrão de doenças sensíveis ao clima[2,10,11,12].

A atualização do Plano Nacional de Adaptação Climática deve priorizar um planejamento centrado nas pessoas, com foco em infraestrutura sustentável, tecnologias de baixo carbono e soluções que combatam a especulação imobiliária. Essa abordagem deve ser baseada em metas claras, com ampla participação em conselhos deliberativos em diversos níveis governamentais e a criação de um fundo para a efetivação das políticas propostas. É crucial desenvolver critérios de priorização baseados em raça e gênero, implementar um sistema de monitoramento

participativo e estabelecer estratégias de advocacia internacional para o financiamento de um fundo de adaptação climática brasileiro. Soluções baseadas na natureza e na comunidade, como agroflorestas e hortas urbanas comunitárias, contribuem para compor a adaptação climática, promovendo áreas verdes e combatendo problemas urbanos como deslizamentos de terra e enchentes. Estas abordagens podem ser complementadas por tecnologias de baixo carbono desenvolvidas pelas próprias comunidades, visando uma adaptação que inclua o conhecimento local e as populações vulnerabilizadas nas prioridades de implementação[13,14].

A tecnologia tem um papel crítico a desempenhar na abordagem da crise ecológica, mas soluções tecnológicas não devem ser implementadas às custas da população racializada e de grupos etnicamente marginalizados, que já são desproporcionalmente afetados por essa crise ecológica[1].

Ainda no contexto da inclusão, a participação ativa de jovens e comunidades periféricas na política climática é fundamental. A criação de espaços de lazer, cultura e formação para facilitar a discussão de temas como racismo ambiental e justiça climática, além do desenvolvimento de métodos de participação mais inclusivos, são passos cruciais para envolver esses grupos na construção conjunta de soluções climáticas. A ampliação do diálogo, assim como o investimento em educação ambiental e tecnologias verdes em territórios marginalizados, são essenciais para desafiar o governo a se reconectar com esses grupos e promover uma adaptação climática verdadeiramente inclusiva e equitativa[8,15].

Essa constatação sublinha a necessidade de abordagens integradas e multidimensionais para a formulação de políticas de justiça ambiental, que considerem as intersecções entre vulnerabilidade socioeconômica, racial e espacial. A análise da vulnerabilidade ambiental e da exposição a riscos climáticos requer uma compreensão holística que englobe aspectos sociais, econômicos, políticos e geográficos, visando a implementação de estratégias eficazes de adaptação que sejam sensíveis às necessidades de comunidades historicamente marginalizadas e vulneráveis[8, 9].

Referências

1. UNITED NATIONS. *Elimination of racism, racial discrimination, xenophobia and related intolerance.* A/77/549. General Assembly, Distr.: General, 25 Oct. 2022. Disponível em: https://undocs.org/en/A/77/549. Acesso em: 25 mar. 2024.

2. MONTEIRO DOS SANTOS, D. et al. Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. *PLOS ONE*, v. 19, n. 1, e0295766, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766

3. DIAS, R. *Racismo ambiental frente à era das mudanças climáticas: uma análise da percepção social no Brasil.* 2023. Monografia (Graduação em Ciência Política) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2023. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/36693/1/2023_RafaelaFerreiraDias_tcc.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

4. SANTOS, I. P. O. et al. Crise hídrica em São Paulo de 2013: um risco de desastre socialmente construído. *Sustainability in Debate*, v. 12, n. 3, p. 167–181, dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.18472/SustDeb.v12n1.2021.38652

5. ADAPTAÇÃO ANTIRRACISTA. *Emergência Climática no Brasil: A Necessidade de Uma Adaptação Não-Racista.* 2023. Disponível em: https://arayara.org/adaptacao-nao-racista/. Acesso em: 1 mar. 2024.

6. PEREIRA, D.; AMPARO, T. Raça, clima e direito: um debate sobre justiça climática. *Diálogos Socioambientais*, [S. l.], v. 6, n. 17, p. 10–12, 2023. Disponível em: https://periodicos.ufabc.edu.br/index.php/dialogossocioambientais/article/view/924. Acesso em: 29 fev. 2024.

7. JESUS, D. S. de. *Riscos climáticos e racismo ambiental: análise dos discursos hegemônicos.* 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) — Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Orientador: Prof. Dr. Paulo César Zangalli Júnior. Disponível em: https://geografia.ufba.br/TCC_Daniel%20Sena_final.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.

8. COSTA, A. da C. Não existe Justiça Climática sem reparação histórica. *Um Só Planeta*, 14 set. 2023. Disponível em: https://umsoplaneta.globo.com/google/amp/opiniao/colunas-e-blogs/amanda-da-cruz-costa/post/2023/09/nao-existe-justica-climatica-sem-reparacao-historica.ghtml. Acesso em: 4 mar. 2024.

9. CARVALHO, C. et al. Scales of inequality: The role of spatial extent in environmental justice analysis. *Landscape and Urban Planning*, v. 221, maio 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104369

10. HUQ, M. et al. Developing a guide to climate & health justice education: Process and content. *The Journal of Climate Change and Health*, v. 9, p. 100188, jan./fev. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joclim.2022.100188

11. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

12. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

13. TORRES, P. H. C. et al. Is the Brazilian National Climate Change Adaptation Plan Addressing Inequality? Climate and Environmental Justice in a Global South Perspective. *Environmental Justice*, abr. 2020, p. 42–46. DOI: https://doi.org/10.1089/env.2019.0043

14. SANTANA FILHO, D.M.; FERREIRA, A.J.F.; GOES, E.F. *Estratégias para Planos Nacionais de Adaptação: um caso Brasil.* Salvador: Iyaleta – Pesquisa, Ciências e Humanidade, 2022. 28 p. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/12ZFC-V3tj6zjAJcuWQ9JH-26Q2TpRJO5v/view. Acesso em: 16 abr. 2024.

15. LOUBACK, A. C.; LIMA, L. M. R. T. (Orgs.). *Quem precisa de justiça climática no Brasil?* GT de Gênero e Justiça Climática, do Observatório do Clima, Hivos, 2022. Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2022/08/Quem_precisa_de_justica_climatica-DIGITAL.pdf . Acesso em: 18 fev. 2024.

i. Entende-se por "(...)Racismo Ambiental às injustiças sociais e ambientais que recaem de forma desproporcional sobre etnias vulnerabilizadas. [...] O racismo ambiental não se configura apenas através de ações que tenham uma intenção racista, mas igualmente através de ações que tenham impacto racial, não obstante a intenção que lhes tenha dado origem." PACHECO, 2006, p. 10.

Povos Indígenas e Povos e Comunidades Tradicionais

Introdução

O Brasil é um país de grande diversidade sociocultural, assim como de biodiversidade, o que reflete as dimensões continentais do território. No entanto, alguns grupos têm sofrido uma maior variedade e intensidade de impactos decorrente da mudança do clima, situação que tende a ser intensificada se ações de adaptação que foquem em justiça climática e combate ao racismo ambiental não sejam consideradas ao se pensar adaptação. É o caso de Povos indígenas e povos e comunidades tradicionais, como quilombolas, extrativistas, indígenas, pescadores/ribeirinhos, situação de rua, assentados, agricultores familiares, ciganos e outros grupos.

Segundo o Censo de 2022, os povos indígenas e os quilombolas representam, respectivamente, 0,83% e 0,65% do total da população brasileira. A maioria dos quilombolas reside na região Nordeste (68%), enquanto a região Norte concentra 44% da população indígena do país. Apenas 13% da população quilombola reside em um dos 494 Territórios Quilombolas oficialmente delimitados no país, e dos 5.570 municípios do Brasil, 1.696 tem moradores quilombolas. A Terra Indígena Yanomami (AM/RR) apresenta o maior número de pessoas indígenas (27.152), seguida pela Raposa Serra do Sol (RR), com 26.176 habitantes indígenas, e pela Évare I (AM), com 20.177[1].

A Amazônia Legal tem uma particular relevância para os povos indígenas e as comunidades tradicionais, pois quase um terço (32%) dos quilombolas do país e um pouco mais da metade (51%) dos povos indígenas encontra-se nessa região[1]. O bioma Amazônia apresenta aproximadamente 561 Territórios Indígenas (TI), distribuídos em 116,8 milhões de hectares, que representam cerca de 20% da área[2]. A região Nordeste também se destaca com um elevado percentual de povos indígenas e comunidades quilombolas[1]. São regiões, portanto, com relevante interesse para se pensar a agenda de adaptação no Brasil, para os Povos Indígenas e para os Povos e Comunidades Tradicionais.

Além da questão regional, que sinaliza o quanto estão expostas e quais são as maiores vulnerabilidades, existe uma maior vulnerabilidade dessas populações aos impactos e riscos das alterações do uso da terra e incidência de extremos climáticos[2,3].

Impactos observados

A mudança do clima tem atingido de forma heterogênea dimensões importantes do meio ambiente, das culturas e dos territórios brasileiros. Os povos indígenas e os povos e comunidades tradicionais do Brasil sofrem os impactos da mudança do clima de forma mais intensa do que outros grupos de brasileiros, pois seus modos de vida estão diretamente relacionados com os meios físico e biológico. Os impactos observados provocados pela ocorrência de queimadas e desmatamentos, secas intensas, ondas de calor e inundações, podem

ocasionar problemas de saúde e óbito, comprometer a segurança alimentar e nutricional e trazer prejuízos materiais. Por outro lado, os efeitos indiretos também têm sido cada vez mais relevantes, por alterarem de forma crônica as comunidades, devido a alterações ambientais, como processos de desertificação, alterações nos ciclos de vida de plantas e animais, nos calendários agrícolas, e na dinâmica de recursos hídricos e pesqueiros, que afetam fundamentalmente suas práticas de subsistência, culturas e modos de vida[4].

Comunidades tradicionais no Nordeste têm tido suas seguranças hídrica e alimentar afetadas pelas mudanças do regime de chuvas. Dentre os impactos relatados pelas comunidades tradicionais estão o abandono das atividades agrícolas por Fundo de Pasto (FP) no norte da Bahia, e a irregularidade na disponibilidade hídrica para irrigação e aumento do número de pragas nos perímetros irrigados do polo Juazeiro (BA)-Petrolina (PE), o que levou à intensificação do uso de agrotóxicos que contribuem para o aumento da poluição hídrica. Em 2017, o reservatório de Sobradinho, relevante para a região das comunidades do polo Juazeiro (BA)-Petrolina (PE), registrou um nível abaixo de 2% da sua capacidade, uma queda acentuada desde os 33% observados em 2010, levando a ANA a impor restrições de uso da água, incluindo a suspensão quinzenal da captação a partir de 2018, devido a um prolongado déficit de chuvas[3].

Comunidades caiçaras e pequenos agricultores da Mata Atlântica da região Sudeste também percebem a mudança do clima afetando seu modo de vida. O aumento das temperaturas, o desequilíbrio das estações, a alteração dos padrões de chuva, a seca, o aumento de eventos extremos e a elevação do nível do mar estão afetando negativamente as dimensões materiais e não materiais do bem-estar humano em todas as regiões. Dentre os impactos percebidos estão alterações na produção de frutos do mar, mudanças na disponibilidade de água e mudanças na diversidade da fauna e aspectos materiais e não materiais, embora a insegurança econômica tenha sido derivada de diferentes meios de subsistência, além dos danos costeiros relacionados às alterações no nível do mar[5].

Na região Norte, os agricultores familiares ribeirinhos do baixo Rio Negro, Amazonas, relatam que as chuvas têm diminuído e há unanimidade na percepção de que o aumento da temperatura é uma realidade que tem afetado seu modo de vida no trabalho, na educação, na saúde e na alimentação, em decorrência da mudança do clima[6].

Riscos e vulnerabilidades

A transformação no estilo de vida das sociedades, em especial dos povos indígenas e das comunidades tradicionais, é diretamente influenciada pelos extremos climáticos que afetam a agricultura, a pesca e outras atividades econômicas essenciais. Essas mudanças estão ligadas tanto à deterioração do meio ambiente quanto ao aumento da pobreza e desigualdade social[2]. As vulnerabilidades e a exposição das populações ao aumento de temperatura, intensificação de eventos extremos e alteração em padrões de precipitação e de incêndios, como os ocorridos no Amazonas e Cerrado, se sobrepõem a problemas

estruturais. Dentre estes fatores, inclui-se a pobreza, desigualdades socioeconômicas, segregação nos territórios, acesso limitado a serviços essenciais, como saúde e educação, marginalização baseada em gênero e etnia (afetando, por exemplo, povos indígenas e comunidades tradicionais), e a eficácia com que as instituições governamentais conseguem enfrentar a mudança do clima e seus impactos[2,3,6,7,8,9].

Comunidades tradicionais, povos indígenas, quilombolas e agricultores familiares mantêm uma relação essencial com a preservação das florestas e dos serviços ambientais providos por elas, sendo crucial para sua subsistência. Esses grupos enfrentam desafios significativos para adaptar-se a eventos extremos, agravados por condições de pobreza, exclusão social e a ausência de políticas públicas adequadas. Além disso, a marginalização, influenciada por gênero, etnia, raça e classe social, e a desigualdade socioeconômica, que inclui a carência de acesso a tecnologias e infraestrutura, intensificam a degradação ambiental e contribuem para a vulnerabilidade dessas comunidades frente aos impactos climáticos. Essa redução na capacidade de resiliência não só coloca em risco a sobrevivência desses grupos como também ameaça a integridade de áreas protegidas e territórios indígenas[2].

A vulnerabilidade dos povos indígenas e das comunidades tradicionais é amplificada quando se consideram as vulnerabilidades intrínsecas das áreas protegidas nas quais muitos habitam e que varia significativamente entre os biomas brasileiros. Na Mata Atlântica, a vulnerabilidade é acentuada pela alta taxa de desmatamento dentro das unidades de conservação, seu isolamento extremo e dimensões reduzidas, fazendo com que várias das 7 áreas protegidas sejam consideradas altamente vulneráveis, mesmo com um índice moderado de alterações climáticas previstas para a região. Em contrapartida, a tendência é a de que Amazônia e Cerrado enfrentem as variações climáticas mais severas do país, o que coloca as áreas protegidas nestes biomas em uma faixa de vulnerabilidade de moderada a alta, apesar de possuírem capacidade de resiliência de moderada a alta. No entanto, as áreas protegidas situadas no arco de desmatamento da Amazônia representam uma situação particular, sendo altamente vulneráveis em um contexto em que, de modo geral, as unidades de conservação são consideradas bem protegidas e com boa conectividade[10].

Do ponto de vista da Zona Costeira, a erosão costeira e continental e o assoreamento dos rios contribuem para processos migratórios, tanto da população caiçara que ocupa essas áreas quanto da população ribeirinha que ocupa as margens de grandes rios. Nessas áreas, a vulnerabilidade das comunidades se intensifica por práticas de ordenamento territorial e de governança inadequadas, que induzem alterações nesses ecossistemas, contribuindo para a poluição e a prática da pesca excessiva. A confluência de vulnerabilidades ecológicas e sociais, exacerbada pela mudança do clima coloca em risco não apenas a biodiversidade, mas também a sustentabilidade socioeconômica caiçaras, quilombolas e indígenas, que dependem diretamente das zonas costeiras e dos recursos marinhos para sua sobrevivência e modo de vida[2].

Adaptação

A adaptação às mudanças do clima requer uma abordagem integrada que considere tanto o conhecimento científico quanto o tradicional, além de promover o combate ao racismo ambiental e garantir que as medidas de adaptação climática respeitem a justiça climática[2,11,12].

Políticas públicas e estratégias integradas em áreas protegidas, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas, e a promoção do reflorestamento e da recuperação de biomas degradados para aumentar a resiliência dos ecossistemas são fundamentais para garantir os modos de vida dos povos indígenas e das comunidades tradicionais[2,9,12].

Instrumentos econômicos, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e a iniciativa REDD+ para comunidades tradicionais e indígenas, também emergem como mecanismos importantes para a adaptação, sendo eficazes para a conservação das áreas de proteção ambiental. Estas áreas são fundamentais para a contenção do desmatamento e das queimadas, além de fornecerem serviços ecossistêmicos vitais para o bem-estar humano e a sustentabilidade urbana[2,5].

Referências

1. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo 2022*. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: 26 fev. 2024.

2. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

3. MENDES, P. D. A. G. et al. Políticas públicas e adaptação às mudanças climáticas: três estudos de caso na região semiárida brasileira. *Sustentabilidade em Debate*, v. 13, n. 3, p. 209–245, 2022. DOI: 10.18472/SustDeb.v13n3.2022.46064

4. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

5. PINHO, P. F. et al. Climate change affects us in the tropics: local perspectives on ecosystem services and well-being sensitivity in Southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 22, p. 89, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-022-01938-8

6. VASCONCELOS, M. A. de et al. Impacts of climate change on the lives of riverine farmers on the Lower Rio Negro, Amazon. *Atmosphere*, v. 13, n. 11, p. 1906, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13111906

7. GUTIÉRREZ, J. A. M. et al. Perception of the vulnerability of Quilombola farmers in Alcântara, Eastern Amazonia, Brazil. *Society & Natural Resources*, v. 2023, p. 113–130. DOI: https://doi.org/10.1080/08941920.2023.2263857

8. RORATO, A. C. et al. Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon Indigenous Lands. *Environmental Science & Policy*, v. 129, p. 19–36, mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.005

9. GARCIA, L. C. et al. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. *Journal of Environmental Management*, v. 293, p. 112870, 1 set. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112870

10. LAPOLA, D. M. et al. A climate-change vulnerability and adaptation assessment for Brazil's protected areas. *Conservation Biology*, v. 34, n. 2, p. 427–437, abr. 2020. Epub: 1 out. 2019. DOI: 10.1111/cobi.13405.

11. DE WIT, F.; MOURATO, J. Governing the diverse forest: Polycentric climate governance in the Amazon. *World Development*, v. 157, p. 105955, set. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105955

12. MOUTINHO, P. et al. *The role of Amazonian Indigenous Peoples in fighting the climate crisis.* Science Panel for the Amazon. Policy Brief. New York: The Amazon We Want, 2022. Disponível em: https://www.theamazonwewant.org/wp-content/uploads/2023/01/PB-Indigenous-en.pdf. Acesso em: 26 fev. 2024.

Recursos Hídricos

Introdução

O Brasil enfrenta desafios significativos relacionados ao impacto da mudança do clima nos recursos hídricos, com eventos de escassez hídrica e cheias afetando praticamente todas as regiões do país ao longo das últimas décadas. Neste contexto, é fundamental compreender as especificidades de cada região do país em relação aos aspectos biofísicos e socioeconômicos. Diante desse cenário, medidas de adaptação e gestão dos recursos hídricos se tornam imprescindíveis para reduzir os impactos desses eventos e garantir a segurança hídrica e o bem-estar da população. Este texto aborda os impactos observados, riscos e vulnerabilidades associados à escassez hídrica e às cheias em diferentes regiões do Brasil, bem como apresenta estratégias de adaptação necessárias para lidar com esses desafios, englobando aspectos institucionais, físicos, tecnológicos, de conhecimento, comunicação e econômicos.

Impactos observados

Escassez hídrica

Nas últimas décadas, todas as regiões do Brasil experenciaram escassez hídrica. De 1991 a 2019, foram cerca de 25 mil ocorrências que afetaram diretamente 73 milhões de pessoas, totalizando 209 óbitos, mais de 48 mil desabrigados e desalojados e R$ 267 bilhões em danos e prejuízos[1].

Nesse período, a região Norte do Brasil registrou 291 ocorrências que resultaram em 13 óbitos, 13 mil desabrigados e desalojados e R$ 1,6 bilhões em danos e prejuízos[1]. A situação de seca é evidenciada por declínios no fluxo dos rios, especialmente durante a estação seca e nas regiões sul e leste da Amazônia[2,3,4]. Em 2023, a Bacia do Rio Amazonas sofreu um estado de escassez hídrica excepcional que afetou 30 milhões de pessoas. Este fenômeno foi resultado de baixas precipitações e altas temperaturas causadas pelo El Niño e, principalmente, pela mudança do clima[5].

A região mais impactada é a Nordeste, bastante conhecida pelo histórico de escassez hídrica, registrando mais de 16 mil ocorrências que levaram a 112 óbitos, 32 mil desabrigados e desalojados e R$ 116 bilhões em danos e prejuízos[1]. A situação de escassez hídrica se torna alarmante com evidências de declínios nas vazões dos rios ao longo das últimas décadas[3,4]. A região semiárida enfrentou sequências de secas mais longas e intensas desde 2010, desencadeando migração para centros urbanos. Mais de 10 milhões de pessoas foram impactadas pela seca de 2012-2014 na região, que foi responsável pela escassez e contaminação da água, com consequências como o aumento das mortes por diarreia[4].

O Centro-Oeste do Brasil enfrenta um preocupante aumento na situação de escassez hídrica, evidenciado pela redução na precipitação e alterações no uso e ocupação do solo[4]. De

1991 a 2019, foram 202 ocorrências, 538 desabrigados e desalojados e R$ 16bilhões em danos e prejuízos[1]. A crise hídrica em 2016-2017 foi um marco, relacionada à diminuição das vazões mínimas observadas nas últimas décadas[3,4]. O Cerrado testemunhou baixas taxas de precipitação, impactando o armazenamento dos reservatórios e afetando o Distrito Federal[6]. A expansão das plantações de soja e cana-de-açúcar no bioma exacerbou a crise, impactando negativamente o balanço hídrico, destacando a interconexão entre mudanças no uso do solo e os impactos na disponibilidade de água[7].

A região Sudeste enfrenta desafios significativos relacionados à escassez hídrica principalmente devido a sua alta densidade demográfica e intenso uso e ocupação do solo. De 1991 a 2019, foram 3350 ocorrências, 84 óbitos, 1814 desabrigados e desalojados e R$ 47,4 bilhões em danos e prejuízos[1]. A crise hídrica em 2016-2017 impactou os principais reservatórios de abastecimento de água, afetando cerca de 40 milhões de pessoas e prejudicando as economias de centros industriais como Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte[4].

Na região Sul, de 1991 a 2019 foram 4.293 ocorrências, 583 desabrigados e desalojados e R$ 60,45 bilhões em danos e prejuízos[1]. De 2019 a 2021, o Sul foi a região com o segundo maior número de eventos de escassez hídrica, atrás apenas no Nordeste[2].

Cheias

As cheias têm resultado em um elevado número de fatalidades no Brasil. De 1991 a 2019, as enxurradas, alagamentos e inundações provocaram 2.543 óbitos. Foram mais de 15 mil ocorrências que resultaram em quase de 6 milhões de desabrigados e desalojados e R$ 155 bilhões em danos e prejuízos[1].

A região Norte registrou 1.411 ocorrências de cheias, o que resultou em 185 óbitos e quase 1,5 milhão de desabrigados e desalojados. Os danos e prejuízos chegaram a R$ 15,2 bilhões[1]. Essa situação tem se agravado devido ao aumento da vazão máxima observado nas últimas décadas nas porções norte e oeste da bacia Amazônia[4]. Destaque para a bacia hidrográfica do Rio Madeira que, em 2014, enfrentou uma inundação histórica, resultando no isolamento do estado do Acre por cerca de 30 dias. As consequências incluíram danos à principal rodovia, perda de produção da população ribeirinha e aumento de doenças transmitidas pela água, como leptospirose[2,6].

No Nordeste, de 1991 a 2019, foram 3.157 ocorrências de cheia que levaram a 412 óbitos, mais de 1,6 milhões de desalojados e desabrigados e R$ 28 bilhões em danos e prejuízos[1]. Em 2022, a cidade de Recife vivenciou um evento de chuva extrema, atribuído a mudança do clima, que resultou na morte de 138 pessoas e mais de 25 mil desabrigados[8].

No Centro-oeste, foram 794 ocorrências que resultaram em 14 óbitos, 58 mil desabrigados e desalojados e R$ 7,5 bilhões em danos e prejuízos[1]. As cheias podem estar associadas ao aumento da vazão máximas nas últimas décadas na região Monção Sul-Americana[4].

O Sudeste enfrenta um preocupante número de afetados por cheias, principalmente devido à alta densidade populacional e uso do solo. De 1991 a 2019, foram 4.728 ocorrências que resultaram em 1.597 óbitos, além de mais de 1,3 milhão de desabrigados e desalojados e R$ 48 bilhões em danos e prejuízos[1]. Este fato também pode estar se intensificando principalmente devido ao aumento da vazão máximas nas últimas décadas na região Monção Sul-Americana[4]. A exemplo, em dezembro de 2021, Minas Gerais vivenciou inundações severas trazendo danos humanos e prejuízos econômicos a centenas de cidades[2].

As cheias no Sul do Brasil têm sido objeto de preocupação devido aos impactos significativos evidenciados por estudos recentes. De 1991 a 2019, foram 5.232 ocorrências que ocasionaram 335 óbitos, além de mais de 1,4 milhão de desabrigados e desalojados e R$ 56 bilhões em danos e prejuízos[1]. Dados observacionais indicam aumento das vazões máximas em grande parte do Sul do Brasil nas últimas décadas[3,4], fato que pode ocasionar aumento na frequência de impactos relacionados a cheias. A exemplo, em 2008, inundações e deslizamentos de terra severos no Vale do Itajaí resultaram em 135 mortes, 80 mil desabrigados e cerca de 1,5 milhão de pessoas afetadas[6].

Riscos e Vulnerabilidades

Os dados indicam que a escassez hídrica está se tornando um problema cada vez mais comum, especialmente devido às alterações nos padrões de precipitação, bem como ao aumento da demanda por água em áreas agrícolas, à expansão do desmatamento e a outras mudanças no uso e na ocupação do solo que impactam tanto a quantidade quanto a qualidade das águas superficiais e subterrâneas[2,3,4]. A qualidade dos recursos hídricos é impactada principalmente pelas baixas taxas de coleta e tratamento de esgotamento sanitário, que hoje estão em torno de 60% na média nacional, mas que possui uma distribuição desigual no território. Embora a legislação brasileira enfatize a descentralização da gestão hídrica, o Brasil apresenta enorme variação em termos de capacidade institucional entre os estados e municípios[9], fato que influencia diretamente o nível de vulnerabilidade das diversas regiões do país frente à mudança do clima.

Segundo a plataforma AdaptaBrasil-MCTI[10] e outros autores[4,11], estimativas de risco de escassez hídrica para o clima presente, que consideram aspectos climáticos, socioeconômicos e biofísicos, mostram que as regiões mais críticas são o semiárido nordestino e sul do Rio Grande do Sul, seguidos das regiões sudeste e centro-oeste e grandes cidades. Para cheias, não existe um padrão claro, porém o risco é maior no Norte, Nordeste, grandes cidades e faixa litorânea. Grande parte desse risco está associado a alta vulnerabilidade dos municípios, principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste.

Para o futuro, segundo a plataforma AdaptaBrasil-MCTI[10] e outros autores[4,12,13,14], as crises por escassez hídrica devem ser experimentadas com maior frequência nas regiões Nordeste e Norte, enquanto partes do Sul e Sudeste devem experimentar um aumento das

crises por cheias. As regiões hidrográficas Amazônica, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Atlântico Leste e Atlântico Nordeste Ocidental e Paraná apresentam um risco de aumento da seca. As crises por cheias podem aumentar nas regiões hidrográficas Amazônica, Paraná, Uruguai e Atlântico Sul, mas também em grandes cidades e na faixa litorânea. Esse risco está relacionado à mudança nos padrões de chuvas, combinado com densidade populacional, aumento do uso da água em zonas agrícolas, intensificação de desmatamento e outras alterações no uso e ocupação do solo[3,4,10,12]. Esse provável cenário de redução da disponibilidade hídrica, combinado com a crescente demanda por água, podem amplificar os conflitos já existentes de uso múltiplo dos recursos hídricos no Brasil[9].

Adaptação

O planejamento da adaptação para recursos hídricos abrange uma ampla variedade de ações. A seguir são listadas as principais ações identificadas na literatura:

Institucionais

- Fortalecimento da governança de recursos hídricos. Ou seja, promover e fortalecer a integração das políticas de recursos hídricos com outras políticas e em diferentes níveis (federal, estadual, regional) e setores, tais como planos diretores municipais, zoneamento agroecológico e legislação de uso e ocupação do solo[6,9,15].

- Fortalecimento da capacidade institucional, ou seja, aprimorar as habilidades, competências e a eficácia das instituições responsáveis pela gestão da água. Isso envolve o desenvolvimento e a melhoria de estruturas, políticas, práticas e recursos humanos necessários para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos[6].

- Promoção da elaboração de Planos de Recursos Hídricos de bacias hidrográficas e da Gestão Integrada de Recursos Hídricos[2,4], considerando um planejamento de longo prazo baseado em potenciais trajetórias e cenários, incluindo uso da terra e mudança do clima.

- Fortalecimento de políticas de desenvolvimento humano e redução da desigualdade social[4].

- Promoção de ações para o uso eficiente da água, bem como definição de diretrizes claras e marcos necessários para Reuso de Água[6].

- Promoção do desenvolvimento de Planos Municipais de Contingência de Proteção e Defesa Civil; Planos Municipais de Saneamento Básico[6].

- Estabelecimento de regras de restrição de uso da água com a finalidade de preservar e prolongar a disponibilidade hídrica, garantindo o atendimento aos usos prioritários da água definidos em lei[2].

- Implementação de medidas de Gestão da Demanda[16].

- Governança em águas subterrâneas[6].

Físicas e tecnológicas

- Ampliação e aprimoramento da Infraestrutura Hídrica para aumento da oferta (reservatórios, alocação, sistemas adutores, eixos/canais e barragens)[2,6,9].

- Aprimorar a operação e manutenção da Infraestrutura Hídrica[2].

- Ampliar a infraestrutura de cisternas em regiões áridas[15].

- Promover a utilização de áreas alagadas e Infraestrutura Verde para o tratamento de esgoto em cidades pequenas[6,15].

- Implementação integrada de infraestrutura verde e cinza. Se refere à integração de estratégias que partem de um melhor manejo dos recursos naturais às de obras de engenharia convencional para provisão de serviços hídricos. A integração de comunidades locais e manutenção e restauração de serviços ecossistêmicos mantêm a segurança hídrica a longo prazo[6,9].

- Universalização do saneamento básico[6,9].

- Fortalecimento de ações de revitalização de bacias hidrográficas, tais como o Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas (PNRBH), com foco em ações de recuperação de rios ou bacias hidrográficas no Brasil (Programa Águas Brasileiras, Programa Produtor de Água), com o objetivo de alavancar iniciativas de recuperação de áreas degradadas com o uso de tecnologias avançadas[2,6].

- Promoção do uso eficiente da água. Redução de perdas em sistemas de abastecimento, sobretudo em grandes cidades, adequação dos sistemas de medidores da rede urbana às exigências legais, promoção de técnicas de reuso nos diversos setores (incluindo o industrial) e tecnologias e práticas de irrigação (que representa o maior uso da água no país) sustentáveis[6,9].

- Ampliação, manutenção, adequação e modernização das redes de monitoramento da quantidade e qualidade de águas superficiais e subterrâneas[2,6].

Conhecimento e comunicação

- Inclusão do conhecimento científico com avaliações de impacto e cenários em agendas de adaptação locais, incluindo a geração e disponibilização de informações que incorporem potenciais trajetórias e cenários futuros[4,9].

- Aprimoramento do monitoramento da qualidade e quantidade da água, incluindo avaliações periódicas do estado hidrológico de reservatórios superficiais e de águas subterrâneas[2,6]. As salas de situação da ANA e das unidades da federação realizam o acompanhamento das condições hidrometeorológicas de bacias hidrográficas prioritárias e do armazenamento dos principais reservatórios do País[2].

- Ampliação de técnicas e práticas de uso do solo e planejamento da cobertura do solo em escala da bacia hidrográfica[2].

- Promoção de campanhas de educação ambiental para sensibilizar a população sobre a escassez hídrica e o risco climático e assim promover o uso eficiente da água[6].

Econômicas

- Cobrança pelo uso da água. A receita gerada por essa taxa deve ser utilizada para financiar iniciativas de reflorestamento e apoiar os gastos governamentais, criando assim vantagens ambientais e econômicas[2,9]

- Promover e ampliar mecanismos financeiros de compensação (Pagamento por Serviços Ambientais - PSA) e de conversão de multas para a conservação dos recursos hídricos (p.ex., Programa Produtor de Água e Programa Água para Todos)[2,6].

Referências

1. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/#. Acesso em: 21 mar. 2024.

2. BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual*. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf. Acesso em: 21 mar. 2024.

3. CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 5136, 1 set. 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x

4. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

5. CLARKE, B. et al. *Climate change, not El Niño, main driver of extreme drought in highly vulnerable Amazon River Basin*. London: Imperial College London, 2024. Disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-not-el-nino-main-driver-of-exceptional-drought-in-highly-vulnerable-amazon-river-basin/. Acesso em: 3 mar. 2024.

6. PEREIRA, V. R. et al. Adaptation opportunities for water security in Brazil. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, n. 3, p. 91–121, 31 dez. 2020. DOI: https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33858

7. SILVA, C. D. O. F.; MANZIONE, R. L.; CALDAS, M. M. Net water flux and land use shifts across the Brazilian Cerrado between 2000 and 2019. *Regional Environmental Change*, v. 23, n. 4, p. 151, dez. 2023. DOI: 10.1007/s10113-023-02127-x

8. ZACHARIAH, M. et al. *Climate change increased heavy rainfall, hitting vulnerable communities in Eastern Northeast Brazil.* London: Imperial College London, 2022. Disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Brazil-Floods-Scientific-eport.pdf. Acesso em: 3 mar. 2024.

9. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

10. ADAPTABRASIL-MCTI. *Recursos hídricos*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 11 mar. 2024.

11. BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Plano Nacional de Segurança Hídrica*. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://pnsh.ana.gov.br/home. Acesso em: 21 mar. 2024.

12. BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Cenário de mudança climática do balanço hídrico*. 2022. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/5c4ad4e0-1b7c-45b4-9cb3-1893e44c20d6. Acesso em: 15 fev. 2024.

13. BORGES, P. A.; CHAFFE, P. L. B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change*, v. 155, n. 1, p. 37–57, jul. 2019. DOI: 10.1007/s10584-019-02430-9

14. BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503–522, abr. 2020. DOI: 10.1007/s10584-020-02667-9

15. FARJALLA, V. F. et al. Turning water abundance into sustainability in Brazil. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, p. 727051, 8 dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.727051

16. BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Plano Nacional de Recursos Hídricos*. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/pnrh_2022_para_baixar_e_imprimir.pdf. Acesso em: 3 abr. 2024.

Redução e Gestão de Riscos de Desastres

Introdução

Desastres são conceituados como o resultado da combinação de exposição à ameaça climática, presença de condições de vulnerabilidade, e a insuficiência da capacidade ou de medidas para reduzir ou lidar com as consequências negativas potenciais associadas à exposição frente as ameaças[1]. Nesse contexto, eventos extremos de clima (ameaças) não representam um desastre. Desastres são os efeitos que esses fenômenos provocam nas populações vulneráveis morando em áreas expostas[2]. Além dos impactos sobre vidas e pessoas, os desastres causam danos materiais e prejuízos[3,4].

Os desastres têm se relacionado cada vez mais com a mudança do clima, devido à intensificação dos eventos extremos, consequência de aumento da temperatura. O aquecimento global e regional desencadeia ocorrências de desastres como enchentes, inundações, enxurradas, deslizamentos ou secas, consequência de chuvas intensas e abundantes, ou da falta de elas. Tais episódios têm afetado de maneira crescente áreas urbanas e rurais em todo o mundo, sendo as populações que residem em áreas urbanas e periurbanas as mais expostas[5,6]. Eventos climáticos extremos caracterizam-se pela anormalidade em relação ao estado climático médio, manifestando-se na intensidade, duração ou temporalidade em que ocorrem. Esses eventos, intrinsecamente ligados às vulnerabilidades sociais, resultam em perdas de vidas, alterações nas relações sociais das comunidades, deixam pessoas desabrigadas, deflagram insegurança alimentar, hídrica e energética e impactam na saúde da população, aumentando o risco de contaminação por doenças transmitidas pela água[2].

Os desastres causam danos significativos, especialmente às populações mais vulneráveis socialmente, como aquelas de baixa renda que habitam assentamentos precários ou informais e áreas de alto risco. Essas comunidades, que têm uma capacidade limitada para viver em locais apropriados e reconstruir suas vidas após desastres, têm sido as mais impactadas pelos efeitos desses eventos, devido a sua baixa capacidade adaptativa[2,5]. Portanto, diante da intensificação das mudanças do clima, é fundamental reavaliar a lógica da urbanização, incluindo a ocupação de áreas de risco, e investir em políticas públicas que reduzam as vulnerabilidades sociais.

Impactos observados

Os produtos do Plano Nacional de Defesa Civil em elaboração apresentam os principais desastres observados no Brasil no período de 1991 a 2022. Observa-se que as secas e estiagens representam a maior parcela, totalizando 47,3% dos eventos, seguidas por enxurradas, inundações e alagamentos (17,1%), além de corridas e movimentos de massa (12,9%) e outros eventos[7,8]. Em recorte mais recente da mesma base de dados - 2013 e 2022 -, os de-

sastres atingiram 91,7% dos municípios brasileiros e causaram R$ 374,4 bilhões de danos materiais e prejuízos registrados em todo o Brasil, atualizados para valores de dezembro de 2022. Nesse período de 10 anos, foram mais de 1,77 milhões de moradias danificadas e quase 300 mil destruídas, afetando cerca de 4,76 milhões de pessoas. A região Nordeste acumulou os maiores danos materiais e perdas financeiras (37%), seguido do Sul (31%) e do Sudeste (17%), sendo que o período de 2020 a 2022 concentra 47% deste total[8].

Somente entre dezembro de 2021 e maio de 2022, as chuvas danificaram ou destruíram mais de 117 mil habitações, afetaram diretamente mais de 350 mil pessoas, causando prejuízos da ordem de R$ 1,8 bilhões na região Nordeste. Em 2021, na Bahia, foram 19 mortes, 115 mil desalojados e ainda mais pessoas diretamente afetadas. Em maio de 2022, fortes chuvas provocaram movimentos de massa que deixaram, ao menos, 118 mortos e mais de 13 mil desabrigados em Pernambuco, Alagoas e Paraíba[8].

Em 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro, ocorreu o considerado pior desastre natural do Brasil até a presente data, com o registro de 947 mortes, mais de 300 pessoas desaparecidas e milhares de desalojados e desabrigados, além de severas perdas econômicas, destruição de moradias e infraestrutura, em decorrência de enxurradas e deslizamentos[i]. Em fevereiro de 2022, onze anos depois e na mesma região, deslizamentos geraram 4 mil desabrigados ou desalojados e 241 mortos em Petrópolis (RJ)[8,11]. Também no ano de 2022, em maio a Região Metropolitana de Recife foi acometida por inundações e deslizamentos de terra que resultaram em mais de 100 mortes, sendo que históricos anteriores já alertam para a necessidade de redução da exposição e vulnerabilidade nessa região[10,11].

Em fevereiro de 2023, foram registrados 683 milímetros de chuva em 15 horas em São Sebastiao, no litoral Paulista. Neste contexto, 65 pessoas morreram como consequência de deslizamentos de terra, 2.251 ficaram desalojadas e 1.815 desabrigadas no Litoral Norte de São Paulo[9]. No Sul, eventos climáticos extremos provocaram destruição em junho e setembro. O primeiro evento afetou 18 mil pessoas no Rio Grande do Sul e gerou prejuízo de R$ 149 milhões na agricultura. Já o segundo atingiu 104 municípios e 48 pessoas perderam suas vidas, 359 mil foram afetadas, quase 5 mil estão desabrigadas, 20 mil estão desalojadas e mais de 8 mil casas foram danificadas e destruídas[ii], com prejuízos ultrapassando R$1,3 bilhão[iii,9].

A presença de moradias em áreas suscetíveis a inundações e deslizamentos, aliada à limitada eficácia das estruturas governamentais existentes na prevenção de mortes e danos, tem contribuído para o aumento da frequência e intensidade dos desastres, como evidenciado em diferentes locais, como a Região Metropolitana de São Paulo, Vale do Itajaí em Santa Catarina, estado do Rio de Janeiro e Recife[10]. Atualmente, cerca de 2,0 milhões de domicílios encontram-se em situação de risco de inundação nas áreas urbanas dos municípios do SNIS-AP[iv] 2020[6].

Riscos e vulnerabilidades

Os riscos de desastre estão relacionados, além do fator climático, às vulnerabilidades e exposição da população e dos municípios, incluindo a falta de capacidade de adaptação. Regiões historicamente afetadas por desastres relacionados a deslizamentos de terra e movimentos de massa, como os estados de Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo no Sul e Sudeste, além dos estados da Bahia e Pernambuco no Nordeste apresentam maior risco potencial para novos eventos[7,12,13]. As maiores vulnerabilidades concentram-se nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, onde as condições sociais e econômicas e acesso a serviços de infraestrutura urbana da população são insatisfatórios[4,6,7].

As regiões Sul e Sudeste do Brasil, áreas caracterizadas por uma significativa densidade populacional e pelos padrões desordenados de urbanização, muitas vezes acompanhado por desafios de infraestrutura, apresentam risco elevado para enchentes e inundações com maior relação, de uma forma geral, com a ameaça climática[4,7,12,13]. A faixa leste do país também apresenta concentração significativa de população exposta a estes desastres, combinados à elevação do nível do mar[11,13]. A conjunção de populações em áreas de risco com ameaça favorece a propensão a desastres desencadeados por inundações repentinas[12]. Já as regiões Norte e Nordeste são fortemente caracterizadas por elevada vulnerabilidade social e por dificuldades dos municípios em lidar com os desastres de inundações, enchentes e alagamentos[4,7,11].

A baixa capacidade adaptativa[v] tanto para enchentes, alagamentos e inundações como para movimentos de massa e deslizamentos de terra estão concentrados nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste. A menor capacidade de se adaptar está relacionada à falta de instrumentos de planejamento e gestão, tais como mapeamento de áreas de risco, e planos de prevenção à desastres e de contingenciamento; capacidade coordenada de resposta, como existência de algum sistema de Defesa Civil, bem como de recursos humanos e orçamentários para tal sistema; e existência de políticas, programas e ações, desde infraestrutura urbana, como sistemas de drenagem, até campanhas educativas para melhorar a percepção de risco de desastre por parte da população e sistemas de alerta e monitoramento antecipado no nível municipal[4,7]. Quanto à vulnerabilidade social existe uma relação entre a população exposta a desastres geo-hidrológicos e baixos níveis de educação formal, bem como baixa renda e subsequente desigualdade social, situação mais evidente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste[4,13,16].

Exemplificando, as regiões mais suscetíveis a deslizamentos de terra e eventos hidrológicos em Recife, cujo histórico de impactos foi mencionado, são as regiões próximas a Olinda, ao norte, e Jaboatão dos Guararapes, ao sul, áreas apresentam maiores taxas de pobreza e densidade populacional, revelando a interseção entre vulnerabilidade social e ambiental. O aumento da exposição a esses eventos catastróficos é acentuado por grandes momentos de expansão e adensamento urbanos desde 1940, uma transformação urbana que, embora tenha impulsionado o desenvolvimento, também contribuiu para a crescente vulnerabilidade das comunidades diante de eventos climáticos extremos[11].

Adaptação

As diretrizes preconizadas pela regulamentação da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, conforme delineado na Lei 12.608 de 2012, constituem um alicerce para a promoção da adaptação[15]. Além de propor a criação do Sistema Nacional de Informações e Monitoramento de Desastres, o estabelecimento de um cadastro nacional de municípios suscetíveis a deslizamentos e inundações e o estímulo à elaboração de Planos de Prevenção a Desastres e Contingenciamento, a legislação ressalta a imperatividade da consolidação de Sistemas de Alertas Precoces para atenuar o risco climático[6,7,14,15]. No nível federal compete ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) desenvolver monitoramentos e prevenção de risco de desastre no Brasil. Essa abordagem desempenha um papel crucial ao fortalecer a capacidade preditiva, aprimorar a percepção de risco e incentivar estudos correlacionados.

Em um contexto de intensificação de eventos extremos, o planejamento urbano integrado é um instrumento que permite a articulação do ordenamento e planejamento do solo urbano com as infraestruturas e serviços urbanos, como saneamento básico e drenagem pluvial, mobilidade, bem como com a arborização e a permeabilidade urbana (que promovem o conforto térmico, menor gasto energético, redução do efeito das ilhas de calor, e contribuem para redução dos impactos de enchentes e inundações), entre outros[2]. Para além dos serviços de infraestrutura convencionais, a implementação de Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE), concentradas no replantio e preservação para ampliação dos serviços ambientais, é crucial, especialmente para a conservação do solo e estabilidade de encostas. Além disso, mecanismos de seguros ou transferência de riscos emergem como estratégias eficazes para aliviar o ônus das populações mais vulneráveis[15].

Ferramentas como o mapeamento de áreas de risco, monitoramento de dados hidrológicos e sistemas de alerta de riscos hidrológicos, associados a iniciativas de infraestrutura, como aprimoramentos na drenagem em áreas inclinadas são indispensáveis para a redução do risco de desastres[4,6,7,11]. No entanto, ainda há uma lacuna significativa entre a disponibilidade de dados sobre a ocorrência de desastres, a representação cartográfica da suscetibilidade e a identificação das áreas de risco em nível municipal, com a implementação de uma política pública eficaz que promova e execute medidas e ações para o ordenamento e planejamento territorial, focando de maneira contínua e eficiente nas regiões de risco. A falta de políticas específicas para mudança do clima é evidente na maioria dos municípios, embora muitos municípios possuam análises de risco e políticas relacionadas e, embora esses municípios demonstrem capacidades positivas para enfrentar as mudanças do clima, a abordagem de planejamento ainda está distante do ideal, com algumas regiões exibindo melhor capacidade institucional para enfrentar os desafios atuais e futuros[17].

No contexto da governança das cidades e urbana, algumas barreiras precisam ser superadas na gestão municipal, como questões administrativas, nível de comprometimento, incompatibilidade entre a escala das questões urbanas e a extensão da autoridade de governos subnacionais, pressões para o uso e a ocupação do solo e fiscalização. Essas barreiras, embora não se restrinjam

às questões climáticas, tendem a se entrelaçar, exacerbando as restrições à adaptação urbana local[18].

Diante do exposto, as interações complexas entre diversos setores, níveis de governo e atores estatais e não estatais desempenham um papel crucial na determinação de como as cidades respondem e se adaptam às mudanças do clima[18]. E é com essa interação setorial que o Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil em elaboração está pautando suas ações. Os programas e projetos para prevenção, mitigação, preparação e resposta, por meio de ações e programas, tais como a identificação e mapeamento de áreas de risco de desastre, instalação de sistemas de alerta e consequinte emissão de alertas de desastres, de forma articulada entre diferentes setores do poder público, dentre eles o Desenvolvimento Urbano; a Infraestrutura; Ciência, Tecnologia e Inovação; e Comunicação[14]; o mapeamento de risco do Serviço Geológico do Brasil (SGB); e as ações do monitoramento e prevenção de risco de desastres pelo CEMADEN.

Referências

1. UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNISDR). *2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction*. Geneva: UNISDR, 2009. Disponível em: https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction. Acesso em: 25 jan. 2023.

2. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

3. BANCO MUNDIAL; FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995–2019*. 2. ed. Florianópolis: FAPEU, 2020. [ORGANIZAÇÃO RAFAEL SCHADECK]. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/danos_e_prejuizos_versao_em_revisao.pdf. Acesso em: 25 fev. 2024.

4. ADAPTABRASIL-MCTI. *SE Desastres geo-hidrológicos*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 26 fev. 2023.

5. MARENGO, J. A. et al. Changing trends in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: causes and impacts. *Frontiers in Climate*, v. 2, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fclim.2020.00003

6. MDR-SNS-SNIS. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. *Diagnóstico Temático: Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas – Gestão de Risco*. Brasília: MDR, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AP_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 23 jan. 2023.

7. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Produto 2: identificação de riscos e cenários prováveis de atuação*. Brasília: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2023. Disponível em: https://pndc.com.br/produto-2/ . Acesso em: 20 fev. 2023.

8. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/# . Acesso em: 28 jan. 2023.

9. MARENGO, J. A. et al. 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*, v. 120, p. 7997–8024, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-024-06558-5

10. ALCÂNTARA, L. C. S. et al. Rainfall and temperature extremes in Brazil: present climate and future projections. *Weather and Climate Extremes*, v. 41, p. 100620, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100620

11. MARENGO, J. A. et al. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. *Natural Hazards*, v. 116, p. 3617–3644, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z

12. MARENGO, J. A. et al. 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*, v. 3, p. 610433, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433

13. SAITO, S. M. et al. Urban population exposed to risks of landslides, floods and flash floods in Brazil. *Sociedade & Natureza*, v. 31, p. e46320, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46320

14. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Produto 4: versão sintética da atuação em proteção e Defesa Civil. Brasília: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2023*. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/147IBxtgkiiv5xgkg3K636YA8c-QMCUJRK/view. Acesso em: 20 fev. 2023.

15. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

16. ASSIS DIAS, M. C. et al. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 49, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101742

17. TORRES, P. H. C. et al. Vulnerability of the São Paulo macro metropolis to droughts and natural disasters: local to regional climate risk assessments and policy responses. *Sustainability* (Switzerland), v. 13, n. 1, p. 1-16, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13010114

18. DI GIULIO, G. M. et al. Bridging the gap between will and action on climate change adaptation in large cities in Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 19, n. 8, p. 2491–2502, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-019-01570-z

i. http://www2.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/

ii. Dados preliminares: https://estado.rs.gov.br/19h15-balanco-da-defesa-civil-sobre-chuvas-intensas-eenchentes-no-rs-contabiliza-48-mortes

iii. https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/sobe-para-r-1-3-bi-os-impactos-causados-pelo-cicloneextratropical-no-sul-do-pais

iv. Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento - Águas Pluviais.

v. Análise feita a partir do Índice de Capacidade Municipal (ICM) do Plano Nacional de Defesa Civil e da Plataforma Adapta-Brasil-MCTI.

Saúde

Introdução

Os impactos da mudança do clima na saúde são complexos e envolvem diversas dimensões da realidade, tendo em vista que o processo saúde doença é resultante de processos biológicos, sociais e ambientais articulados no nível individual e coletivo. Embora ainda não se conheçam todos os impactos na saúde da população relacionados à mudança do clima, tem aumentado o interesse e os trabalhos que vem sendo desenvolvidos nessa perspectiva, sobretudo em países periféricos, cujas históricas desigualdades e injustiças sociais podem ser aprofundadas diante da emergência climática. Neste sentido, este texto visa apresentar os principais achados que relacionam mudança do clima e saúde, particularmente os impactos no padrão de ocorrência das doenças infecciosas, respiratórias, cardiovasculares e vulnerabilidade aos desastres ambientais e à insegurança alimentar[1,2,3,4,5,6,7].

É importante ressaltar que o padrão de ocorrência dos processos endêmico-epidêmicos, particularmente das doenças transmitidas por vetores como arboviroses (dengue, zika, chicungunha e febre amarela), malária e leptospirose são determinadas pelas condições de receptividade, pela vulnerabilidade social e pela vulnerabilidade institucional[8]. As condições de receptividade são características ambientais necessárias à manutenção do vetor, as quais são diretamente influenciadas pelas variáveis climáticas temperatura, umidade e precipitação. Nesse sentido, alterações climáticas podem aumentar a proliferação de vetores em áreas endêmicas, além de induzir a emergência de doenças vetoriais em regiões geográficas onde essas doenças não são um problema de saúde na atualidade. Essas mudanças no padrão geográfico das doenças vetoriais podem ocorrer pelas alterações nos ecossistemas e nos ciclos biológicos e hidrológicos resultantes da mudança do clima[5,9].

Por outro lado, a vulnerabilidade social perpassa pelas condições socioeconômicas da população, principalmente acesso a uma renda que garanta a sobrevivência, acesso aos serviços de saneamento básico e direito à moradia que em países periféricos como o Brasil são setores deficientes que podem aprofundar os impactos da mudança do clima na saúde da população. Por fim, a vulnerabilidade institucional caracterizada pela incapacidade dos atores institucionais em elaborar estratégias para o enfrentamento das ações de vigilância e atenção à saúde é uma dimensão fundamental a ser considerada a fim de se criar mecanismos que fortaleçam a organização do sistema de saúde brasileiro e garantir o direito à saúde para a população[8].

Em relação aos grupos sociais que podem ser mais afetados pela mudança do clima é necessário considerar a formação socioespacial brasileira, historicamente marcada pela apropriação e expropriação de terras indígenas e um longo período escravocrata que resultou no processo de marginalização social dos povos originários e da população negra, os quais podem ter suas condições materiais de vida e saúde ainda mais vulnerabilizadas diante das emergências climáticas.

Impactos observados

As ondas de calor, cada vez mais frequentes e intensas, têm afetado a saúde da população e aumentado a pressão aos serviços de saúde. Entre 2000-2018, cerca de 48 mil mortes em excesso registradas em 14 capitais brasileiras foram relacionadas a episódios de ondas de calor[10]. Importante observar que, com relação ao estresse térmico, houve um aumento no número de dias com temperatura máxima acima de 35ºC e casos de ocorrência de ondas de calor em todas as regiões, com incremento nos últimos 20 anos[11]. Mais de 38 milhões de pessoas vivenciam até 25 dias do ano sob condições meteorológicas superiores às que o corpo humano pode suportar sem que fique exposto a problemas de saúde[11].

Estudos mais localizados exemplificam os impactos da mudança do clima em doenças respiratórias e infecciosas. As mudanças regionais no ciclo hidrológico, como a diminuição das chuvas e a intensificação de eventos de seca tiveram impacto na saúde pública na região de Porto Velho, em especial para as doenças respiratórias. Este estudo mostrou que as secas exercem uma influência primária nas doenças respiratórias, tendo levado a um aumento geral em todas as hospitalizações (aumento de 27%) em anos de seca, no período entre 2000 e 2016[11].

Dentre as doenças de veiculação hídrica, além da leptospirose, as gastroenterites têm sido relacionadas com períodos pós inundações, desastres, secas prolongadas, contaminação de alimentos[1,2,3]. As gastroenterites têm relação com fatores de vulnerabilidade social, tais como condições de moradia, acesso ao saneamento, e idade, visto que crianças até 5 anos e idosos são mais sensíveis a elas[12].

Quanto à relação entre a mudança do clima e as doenças infecciosas, observou-se em estudo realizado entre 2003 e 2013, que os casos de leptospirose no Brasil aumentam com eventos extremos que resultam em inundações. Este estudo estratificou os municípios por faixas populacionais. E justamente na faixa onde encontram-se quase a metade dos municípios brasileiros (entre 10.001 e 50.000) foi onde houve mais leptospirose após eventos de inundações[12]. Este aumento se repetiu para todos os grupos de municípios brasileiros, enfatizando a importância de medidas de adaptação para eventos hidro meteorológicos extremos, considerando a população exposta e as diferentes vulnerabilidades.

Dentro das doenças infecciosas, as relacionadas com vetores têm sido afetadas pela relação entre fatores climáticos e a modificação do ciclo de transmissão das doenças. Por exemplo, estudo sobre a dengue realizado no estado do Rio de Janeiro associou temperaturas acima de 24 °C a um aumento no número de casos, e para cada 1 °C de aumento na temperatura mínima em um determinado mês, foi observado um aumento de 45% nos casos de dengue no mês seguinte[13].

Riscos e vulnerabilidades

Determinados grupos populacionais, como os idosos, apresentam maior vulnerabilidade às doenças respiratórias e cardiovasculares e tendem a ser mais afetados durante ondas de ca-

lor. Estudo realizado na Região Metropolitana de São Paulo analisou o risco para o futuro próximo (2030 a 2050) e para o futuro distante (2079-2099) nos cenários de mudança do clima RCP4.5 e RCP8.5, para as doenças respiratórias e cardiovasculares em população idosa, e concluiu um aumento de taxa anual de mortalidade dessa população, sendo em média entre 95 e 149 mortes por 100.000 habitantes, variando mais ou menos de acordo com o cenário, a doença, o gênero e o período no futuro. Alguns grupos populacionais são mais vulneráveis às doenças cardiovasculares por ondas de calor, como idosos, mulheres, pessoas não brancas e menos escolarizadas, o que reforça a necessidade de diminuir as desigualdades sociais[5,10].

A mudança do clima já vem afetando a epidemiologia de doenças infecciosas no Brasil e projeções feitas em alguns estudos mostram essa tendência, para malária, Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA) e Leishmaniose Visceral (LV)[14].

O risco atual para malária é maior na região Norte do Brasil, seguido do Centro-Oeste. Alguns dos principais fatores de vulnerabilidade que contribuem para isso, nessas regiões, são as mudanças de uso e cobertura da terra e processos socioespaciais como por exemplo, a presença de garimpos e a mobilidade populacional[14,15]. Dentre os fatores climáticos que contribuem para aumentar este risco, estão o aumento de temperatura máxima, da precipitação e umidade relativa do ar, que contribuem para a proliferação do vetor da malária. Quanto ao cenário para 2050, existe uma tendência de aumento dos municípios com elevados níveis de ameaça, em especial a região Norte e Costa Nordeste brasileira[14].

O índice de risco atual de Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA) varia entre médio e alto nas regiões Norte e Nordeste e os fatores que mais contribuem para esse risco são temperaturas mais elevadas, o perfil epidemiológico da Leishmaniose Tegumentar Americana (no município considerando a ocorrência do desfecho), fatores sociais como o baixo IDH-M e a baixa cobertura de atenção básica de saúde. Em cenários futuros, o risco médio e alto se expande por estados das regiões Centro-Oeste e Sudeste, e piora na região Nordeste[14]. Já a Leishmaniose Visceral (LV) apresenta risco alto no Nordeste e Sudeste e médio nas demais regiões. Assim como para a LTA, os fatores que contribuem para o risco de LV são fatores sociais como o baixo ICH-M e a baixa cobertura de atenção básica de saúde[14].

Adaptação

Medidas de adaptação à mudança do clima para a saúde precisam considerar as condições sociais, econômicas e ambientais de populações expostas, buscando realizar ações articuladas para a promoção da saúde de toda a população. É fundamental, ainda, considerar as populações mais vulneráveis às doenças sensíveis ao clima, em razão das históricas desigualdades que marcam a sociedade brasileira.

Entre o conjunto de ações necessárias para a adaptação, a literatura destaca aquelas de caráter institucional, centradas no Sistema Único

de Saúde (SUS). Embora políticas e ações articuladas com outros setores, bem como o fortalecimento de programas estruturados no SUS e na Saúde Suplementar – como o Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua), a Vigilância Epidemiológica (VE) e a Atenção Primária à Saúde (APS) – sejam essenciais[2,5], persistem desafios significativos. Entre eles, destacam-se a limitada capacidade de resposta a eventos climáticos extremos, a desigual distribuição de recursos entre regiões e a necessidade de maior integração intersetorial para reduzir vulnerabilidades sociais e ambientais.

Fomento ao **conhecimento e comunicação**, como redes de estudo e de pesquisa para fomentar áreas com lacunas do conhecimento; sistemas de alerta e monitoramento, tanto para redes de monitoramento de clima, como de saúde, com foco nas Doenças Sensíveis ao Clima (DSC), são essenciais para ampliação do conhecimento técnico-científico, e subsídio para a adaptação em saúde[1,2].

Adicionalmente, são necessárias políticas públicas capazes de reduzir vulnerabilidades sociais e ambientais e ampliar a resiliência da população. Entre essas políticas, são fundamentais a universalização dos serviços essenciais à dignidade humana – como saneamento básico, acesso a moradia adequada e o planejamento do processo de urbanização – além do combate ao desmatamento e de ações articuladas que reforcem as políticas de Segurança Alimentar e Nutricional (SAN)[1,2,3,5,7].

Referências

1. ALPINO, T. de M. Z. et al. *Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura*. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 27, n. 1, p. 273–286, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232022271.05972020

2. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

3. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

4. DINIZ, F. R.; GONÇALVES, F. L. T.; SHERIDAN, S. Heat Wave and Elderly Mortality: Historical Analysis and Future Projection for Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. *Atmosphere*, v. 11, 933, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos11090933

5. ELLWANGER, J. H. et al. Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, n. 1, e20191375, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375

6. MACHADO-SILVA, F.; LIBONATI, R.; LIMA, T. F. M. de et al. Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. *Ecological Indicators*, v. 109, 105817, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105817

7. SILVEIRA, I. H. da; OLIVEIRA, B. F. A. de; CORTES, T. R.; JUNGER, W. L. The effect of ambient temperature on cardiovascular mortality in 27 Brazilian cities. *Science of the Total Environment*, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.493

8. ANGELO, J.R. *Modelagem espacial dinâmica dos determinantes sociais e ambientais da malária e simulação de cenários 2020 para município de Porto Velho - Rondônia.* 2015. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Orientador: Carlos Afonso Nobre. Disponível em: http://sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.27.19.05-TDI. Acesso em: 10 mar. 2024.

9. SOUSA, T. C. M.; AMANCIO, F.; HACON, S. S.; BARCELLOS, C. Doenças sensíveis ao clima no Brasil e no mundo: revisão sistemática. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 42, e85, 2018. DOI: https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.85

10. MONTEIRO DOS SANTOS, D. et al. Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. *PLOS ONE*, v. 19, n. 1, e0295766, 2024. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295766.

11. MIRANDA, V. F. V. V.; DOS SANTOS, D. M.; PERES, L. F. et al. Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-023-04668-x

12. GRACIE, R.; XAVIER, D. R.; MEDRONHO, R. Inundações e leptospirose nos municípios brasileiros no período de 2003 a 2013: utilização de técnicas de mineração de dados. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 37, n. 5, e00100119, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-311X00100119

13. HACON, S. de S.; OLIVEIRA, B. F. A. de; SILVEIRA, I. A review of the health sector impacts of 4°C or more temperature rise. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. (orgs.). *Climate Change Risks in Brazil*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2019. p. 67–130. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_4

14. ADAPTABRASIL-MCTI. *SE Saúde (Malária; Leishmaniose Tegumentar Americana; Leishmaniose Visceral).* Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 12 mar. 2024.

15. ANGELO, J. R.; KATSURAGAWA, T. H.; SABROZA, P. C.; CARVALHO, L. A. S.; SILVA, L. H. P.; NOBRE, C. A. The role of spatial mobility in malaria transmission in the Brazilian Amazon: The case of Porto Velho municipality, Rondônia, Brazil (2010-2012). *PLOS ONE*, v. 12, n. 2, p. e0172330, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172330

Segurança Alimentar e Nutricional

Introdução

A mudança do clima afeta de forma distinta as diferentes dimensões da Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) - disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade. Os efeitos da mudança do clima são condicionados pela existência de múltiplos fatores sociais e econômicos, presentes desde a produção de alimentos até seu consumo, e incluem características dos sistemas e unidades de produção, infraestrutura de transporte e armazenamento, renda da população, e demais condições relacionadas às dimensões de vulnerabilidade e exposição[1,2].

A redução da disponibilidade hídrica e a intensificação de extremos climáticos afetam a produtividade de cultivos e da pecuária, porém de maneira heterogênea, tanto no território brasileiro quanto a depender dos sistemas e modos de produção empregados[3,4,5,6,7]. Os agricultores familiares, por exemplo, têm seus modos de vida afetados pelo aumento das perdas de lavouras, contribuindo para processos migratórios forçados[1,2,3,6,7]. Vale notar, contudo, que esses produtores, cujas condições de vida e os meios de subsistência são tão diretamente afetados, são essenciais na produção de alimentos básicos para a SAN, tais como a mandioca, arroz, feijão, milho, entre outras[2].

As pressões da mudança do clima sobre a oferta de alimentos, tanto em termos de quantidade como qualidade, se desdobra em diversos outros impactos, tais como o aumento do preço dos alimentos[1,2] e prejuízos na renda dos produtores[1,3,6]. O aumento do preço dos alimentos está relacionado à instabilidade da oferta de alimentos *in natura*, e pode levar à desnutrição ou déficit nutricional pelas restrições de acesso; da mesma forma, pode contribuir para que a população passe a consumir mais alimentos ultraprocessados e processados, aumentando a obesidade e outros problemas de saúde[1,5]. A capacidade de acesso a alimentos pela população, por sua vez, é influenciada não apenas pelo preço, mas também por múltiplos fatores sociais e econômicos, além da mudança do clima de maneira indireta, tais como pobreza, desemprego, nível de instrução, entre outros[1,2,3,6].

Importante destacar que perdas e desperdícios de alimentos também exercem pressão sobre a SAN[3]. Da mesma forma que condições adequadas do ponto de vista sanitário e nutricional são fundamentais para a promoção da SAN.

Em síntese, a mudança do clima implica diversos impactos e riscos na SAN, de forma direta ou indireta, com múltiplos fatores de contribuição, os quais afetam de forma diferente as populações, demandando, consequentemente, a adoção de ações e políticas públicas integradas.

Impactos observados

Existe uma complexidade na atribuição direta da SAN à mudança do clima pelos múltiplos fatores que influenciam a insegurança alimentar. Porém, estudos globais investigam essa relação considerando toda a cadeia da SAN. Por exemplo, já se sabe que a mudança do clima tem influenciado a qualidade nutricional dos alimentos, bem como gerado aumento de preços, além do impacto sobre a oferta[1,5,6]. Em relação à qualidade nutricional, estudo em escala global detectou que níveis elevados de dióxido de carbono diminuem as concentrações de proteínas das culturas de trigo, cevada, arroz e batata em 10 a 15%[3].

No Brasil, a mudança do clima também tem afetado a produção de alimentos de diversas maneiras. Entre 2013 e 2022, eventos climáticos extremos, sobretudo chuvas extremas e secas prolongadas, provocaram prejuízos de R$ 260 bilhões. Só em 2022, as perdas corresponderam a 22% do total do período. As regiões Nordeste e Sul foram as mais impactadas, respondendo por de 38% e 31% dos danos, respectivamente, em relação ao total do país[8]. Esses prejuízos financeiros refletem tanto a redução da produção agropecuária quanto a queda na renda dos produtores. Um exemplo marcante ocorreu na safrinha de milho de 2016: apesar de um aumento de 10,3% na área plantada, a seca ocorrida na região central do país resultou em queda de 29,5% na produtividade em relação ao ano anterior[3].

Além de perdas na produção agropecuária, as comunidades que dependem de recursos naturais para subsistência, como comunidades indígenas e rurais da Amazônia, também vêm sofrendo devido à alta dependência da pesca e os impactos sofridos pela biodiversidade deste bioma[5].

Riscos e vulnerabilidades

O risco atual para a disponibilidade de alimentos em decorrência dos impactos das secas é classificado como muito alto no semiárido, alto a moderado no Centro-Oeste e em porções do Norte e Sudeste; e baixo na região Sul. Contudo, as projeções indicam tendência de intensificação e expansão em todas as regiões brasileiras nos horizontes de 2030 e 2050[9].

Entre os principais fatores de vulnerabilidade para a produção de alimentos está a ausência de práticas agrícolas sustentáveis. Destacam-se, ainda, o baixo potencial de intensificação da produção, evidenciado pela insuficiência de maquinário e limitada capacidade de conversão de pastagem degradada. Também pesa a frágil rede de segurança entre os produtores, com os baixos níveis de associativismo e de instrução, além da existência de conflitos agrários[9].

É importante destacar ainda a relevância da agricultura familiar no país, visto que, em 2014, 84% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros pertenciam a agricultores familiares, responsáveis por 70% da produção

de alimentos consumidos no Brasil, com destaque para mandioca, arroz, feijão e milho[2].

Cenários para 2050 mostram impactos na produção de grãos, pecuária e pesca. Quanto à produção de grãos, a tendência é de redução de produtividade em 15,2% - arroz, 23,1% - feijão, 46,2% - trigo e 51,0% - milho, afetando a oferta de alimentos. Na pecuária, a redução projetada na produção é de 3,4% (ovos), 18,8% (leite) e 7,0% (carne bovina) até 2030. Já para a pesca e aquicultura a redução na produção de peixes poderá ser de 11,0% até 2050[7].

A mudança do clima também pode afetar a nutrição da população. Projeções que comparam cenários de produção e consumo alimentar, com e sem efeitos da mudança do clima (Cenário A2, 2020 – 2050), indicam um acréscimo de 300 mil crianças desnutridas[8]. Apesar da redução do número de pessoas desnutridas de 8,6 milhões (período de 2004-2006) para 5,2 milhões (período de 2015-2017), ainda se estima que 52 milhões de brasileiros (período 2013-2014) viviam com algum grau de insegurança alimentar[2,3].

Outro aspecto relevante é o desperdício de alimento que ocorre no final da cadeia alimentar (varejo e consumo). No Brasil, estima-se uma perda anual per capita de 41,6 kg de alimentos, sendo os principais itens desperdiçados o arroz (22%), a carne bovina (20%), o feijão (16%) e o frango (15%). Esse fator, portanto, também exerce pressão sobre a SAN[3].

Adaptação

O enfrentamento aos impactos da mudança do clima na SAN demanda uma diversidade de ações e políticas articuladas, que considerem os riscos e as vulnerabilidades existentes neste setor e que sejam voltadas para a disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade.

Em se tratando da produção agropecuária, ações de manejo voltadas à adaptação às mudanças no clima têm sido enfatizadas pela literatura[3,10,6]. Entre elas destacam-se o desenvolvimento de variedades e sistemas agrícolas adaptados, tais como sistemas integrados; práticas agrícolas para a conservação da umidade do solo, das matérias orgânicas e dos nutrientes; melhoria da gestão hídrica, com adoção de sistemas de captação e armazenamento de água, bem como maior eficiência no seu uso; além da incorporação de inovações tecnológicas[1,2,3,6,10].

Adicionalmente, o apoio aos produtores também tem sido apontado como um fator de fortalecimento da SAN frente a mudança do clima. Entre as principais medidas nesse sentido destacam-se o apoio econômico, por meio de proteção do mercado e subsídios agrícolas, além da assistência técnica e da transferência de renda[1,2,3].

Os sistemas de alerta e monitoramento de riscos agroclimáticos também são essenciais para que cada ator na cadeia da SAN possa se planejar no curto, médio e longo prazo. Com a mesma importância, a manutenção e recuperação de ambientes naturais é essencial para a preservação dos recursos necessários para a produção agropecuária, tais como solo, água, entre outros[1,2,3].

Por fim, é fundamental reconhecer que a pobreza e a desigualdade social são fatores de vulnerabilidade à segurança alimentar no contexto da mudança do clima. Esses aspectos se intersectam a outras dimensões estruturais da vulnerabilidade, cujo reconhecimento e incorporação no planejamento da adaptação contribuem para a justiça climática. Da mesma forma, a adoção de ações que considerem grupos mais vulneráveis e especificidades regionais pode potencializar a efetividade das estratégias implementadas.

Principais referências

1. ALPINO, T. de M. Z. et al. Os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar e nutricional: uma revisão da literatura. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 27, n. 1, p. 273–286, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232022271.05972020

2. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas*. Portaria MMA nº 150, de 10 de maio de 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao.html. Acesso em: 20 fev 2024.

3. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

4. EMBRAPA. *Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa* / Santiago Vianna Cuadra et al. (eds.). Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1090720. Acesso em: 3 out. 2024.

5. FANZO, J. et al. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security*, v. 18, p. 12–19, set. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.06.001

6. HAGEN, M. et al. Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century. *Environmental Research Letters*, v. 17, 033002, 2022. DOI 10.1088/1748-9326/ac5271.

7. SOUZA, B.; HADDAD, E. 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, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/17421772.2021.1934524

8. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia

e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/#. Acesso em: 21 mar. 2024.

9. ADAPTABRASIL-MCTI. *SE Disponibilidade de Alimentos (seca)*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 21 mar. 2024.

10. CÂMARA INTERMINISTERIAL DE SEGURANÇA ALIMENTAR E NUTRICIONAL – CAISAN. *Plano Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional – PLANSAN 2016-2019*. Brasília, DF: MDSA; CAISAN, 2017. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/seguranca_alimentar/caisan/plansan_2016_19.pdf. Acesso em: 3 fev. 2024.

Transportes

Introdução

Já existem evidências robustas de que os padrões climáticos estão mudando, causando danos e prejuízos ao setor de transportes[1]. Estes impactos geram custos adicionais de manutenção, recuperação ou reconstrução de ativos eventualmente danificados, de maneira que alguns efeitos são percebidos imediatamente, enquanto outros manifestam-se em médio ou longo prazo[2]. Além de atingirem a própria infraestrutura, os impactos climáticos no setor de transportes podem afetar, de forma direta ou indireta, as condições de deslocamento das pessoas e a distribuição de insumos e de serviços, além de aumentar a probabilidade de ocorrência de acidentes de tráfego[3].

Impactos observados

Segundo o Atlas Digital de Desastres, entre 1991 e 2023, todas as regiões do Brasil sofreram impactos no setor de transportes devido a eventos climáticos, totalizando mais de R$ 16 bilhões em prejuízos públicos para o setor, sendo que 91% desse valor decorrem de eventos hidrológicos, como alagamentos, chuvas intensas, enxurradas, inundações e movimentos de massa (deslizamentos)[4]. A região do Brasil que mais registrou prejuízos foi a Sul, com R$ 6,1 bilhões, seguida da região Sudeste, com R$ 5,5 bilhões. A região Nordeste contabilizou R$ 1,6 bilhão, o Centro-Oeste acumulou R$ 1,7 bilhão e, por fim, a região Norte registrou R$ 1,6 bilhão[4].

Transporte Rodoviário

No Brasil, o setor de transportes é altamente dependente do modo rodoviário, que possui um alcance territorial muito superior ao dos demais modos, representando 68,5% da divisão modal em 2015[5]. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes[6], a extensão total da malha rodoviária federal, excluídas as vias planejadas, é de 79.634 km, dos quais 69.473 km (87%) correspondem a rodovias pavimentadas e 10.161 km (13%) a rodovias não pavimentadas. Cabe destacar que 11.476 Km da extensão total encontram-se sob concessão federal.

A mudança do clima impacta diretamente a qualidade, segurança, eficiência e longevidade das rodovias. Os principais impactos biofísicos que causam danos materiais ou paralisações nesse sistema são: erosão; alagamentos e inundações; deslizamentos; queimadas; e impactos diretos decorrentes de altas temperaturas. Eventos climáticos extremos podem danificar rodovias e pontes, interromper o transporte e acelerar o desgaste, elevando os custos de manutenção, comprometendo a segurança viária e, consequentemente, gerando prejuízos econômicos[14].

Os danos e prejuízos à infraestrutura rodoviária decorrentes da erosão são principalmente desencadeados por chuvas extremas, seja pelo alto volume pluviométrico em curto intervalo de tempo, seja por dias consecutivos de chuva. Já os alagamentos e inundações ocorrem quando o volume precipitado é elevado em um curto espaço de tempo e/ou quando há um período prolongado de chuvas, aumentando o fluxo de água na bacia hidrográfica e sobrecarregando tanto a drenagem natural quanto artificial, o que pode levar ao transbordamento dos corpos hídricos[2].

Transporte Ferroviário

O setor de transporte ferroviário é o segundo mais utilizado no Brasil para o transporte de cargas, atrás somente do transporte rodoviário, correspondendo a cerca de 15,1% da divisão modal em 2015[5]. Dados de 2021 revelam que a extensão total da malha ferroviária federal atinge 30.660 km[6]. A distribuição espacial das ferrovias concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, seguida pela Nordeste. A região Norte dispõe de poucas ferrovias, limitadas aos estados do Tocantins, do Amapá e a parte do Pará. A região Centro-Oeste apresenta malha ferroviária em todos os seus estados.

Os principais impactos biofísicos que causam danos materiais ou paralisações nas ferrovias são: erosão, deslizamentos, inundações e impactos diretos causados pelas altas temperaturas (expansão térmica, flambagem nos trilhos etc.). Os eventos de precipitação intensa em curto intervalo de tempo, dias consecutivos de chuvas e/ou altos volumes pluviométricos são os responsáveis pela ocorrência de alguns impactos no sistema biofísico e na infraestrutura ferroviária. Em relação à erosão, os impactos tendem a ser agravados por sensibilidades na superfície vegetal, quando degradada, ou em áreas com processos erosivos não tratados. Além disso, destaca-se que a falta de capacidades adaptativas como práticas de proteção de talude inexistentes ou ineficazes, baixa frequência de manutenção das ferrovias reduzida e falta de controle do uso e ocupação do solo são fatores agravantes para a intensificação dos impactos, como o aumento das enxurradas, colmatação do lastro, desguarnecimento do lastro e até mesmo colapso da plataforma ferroviária.

Quanto aos impactos decorrentes da erosão, nota-se uma configuração de trechos com nível alto concentrados em: Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A); Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística); e Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A)[2].

Já os deslizamentos de terra, um dos impactos biofísicos mais relevantes nas ferrovias, podem também ser acentuados por fatores ecológicos (vegetação suprimida em áreas de regulação hídrica e estabilização de taludes) e fatores de engenharia (impermeabilização do solo e a drenagem inadequada, que direcionam mais água ainda para locais suscetíveis a movimentos de massa e cortes em taludes por infraestrutura linear). Esses fatores são, em muitos casos, fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura ferroviária, entre os quais estão os danos no sistema de drenagem, flambagem de trilhos ou até o colapso da plataforma.

Ao considerar os impactos relativos aos deslizamentos, o Índice de Risco Climático (IRC) da infraestrutura ferroviária para o período base apresentou nível alto e muito alto na Região Sudeste, com destaque para: São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); Minas Gerais/Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística); Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e Norte/Nordeste no eixo Pará-Maranhão, mais especificamente na Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.[2].

Em relação aos potenciais impactos decorrentes das altas temperaturas e ondas de calor nas ferrovias (expansão térmica), podem ser mencionados: (i) Flambagem do trilho (empenamento), gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via, mais frequente no trilho soldado contínuo do que no trilho de junta; (ii) Alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea), decorrentes da variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação; e (iii) Superaquecimento de equipamentos elétricos. Em análise relativa aos impactos diretos devido às altas temperaturas na infraestrutura ferroviária federal brasileira, os maiores IRC foram observados na Região Sudeste, com destaque para as ferrovias: que ligam Minas Gerais ao Espírito Santo (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A) – incluindo trechos com nível muito alto e alto; que ligam Minas Gerais ao Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística) – incluindo trechos com nível alto e médio; no Norte/Nordeste, o eixo Pará-Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A) – incluindo trechos com nível alto e médio; no Sul, um trecho no Rio Grande do Sul, entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana) – incluindo trechos com nível alto e médio[2].

Aviação Civil

O cenário do transporte aéreo conta, atualmente no Brasil, com 34 aeroportos internacionais e 2.610 nacionais, totalizando 2.644 aeródromos[7]. O modal aeroviário é o menos utilizado, sendo pouco expressivo quando comparado aos modais rodoviário, ferroviário, aquaviário e dutoviário. Ainda assim, o modal aéreo evolui tecnologicamente de forma acelerada[8], apresentando-se como um dos setores mais ativos e promissores da economia mundial[9]. Em 2022, a demanda dos voos domésticos brasileiros cresceu mais de 31% em relação a 2021, atingindo a 82 milhões de passageiros pagos embarcados. No segmento internacional, o aumento foi de 226,3% em relação ao ano anterior, com registro de aproximadamente 16 milhões de passageiros pagos embarcados, incluindo-se as empresas brasileiras e internacionais[10]. O aumento da variabilidade das condições meteorológicas como resultado da mudança do clima pode afetar todos os aspectos do desempenho operacional, como programação, planejamento de voos, conectividade de voos, planejamento de segurança e otimização de trajetórias. A mudança do clima também pode causar impactos diretos na infraestrutura crítica da aviação, causando efeitos secundários nos negócios e nas capacidades econômicas[11]. Eis alguns exemplos observados em escala mundial[11]:

- **Aumento da intensidade das tempestades**
  - Custos de impactos operacionais, como voos atrasados ou cancelados, e custos decorrentes de danos à infraestrutura;
  - Efeito potencial no desempenho do motor a jato e nos requisitos de manutenção devido a danos causados por tempestades;
  - Fechamento de aeroportos devido a eventos extremos;
- **Alteração de temperatura**
  - O aumento das temperaturas pode exigir uma redução da carga útil (passageiros ou carga), o que pode ter um custo econômico.
- **Alteração do regime de precipitação**
  - O aumento da precipitação pode causar inundações e danos às pistas de pouso e à infraestrutura. Essas inundações podem afetar as operações, reduzindo a capacidade e aumentando os atrasos e cancelamentos, o que tem implicações financeiras devido à perda de receita, ao aumento dos custos operacionais e ao incômodo dos passageiros;
  - As conexões de transporte terrestre podem ser interrompidas devido aos impactos da precipitação, impedindo que a tripulação e os passageiros cheguem ao aeroporto.
- **Alteração na direção e intensidade dos ventos**
  - Mudanças ou desvios na direção predominante do vento nos aeroportos podem afetar a utilização e os horários das pistas, reduzir a eficiência operacional e a capacidade do aeroporto e da aeronave e afetar a segurança. Também podem alterar os critérios para os procedimentos de aproximação e partida e reduzir a pontualidade de chegada e partida de voos, o que acarreta custos;
  - Tempestades extremas e ventos fortes podem causar atrasos e cancelamentos de voos, com perdas econômicas e incômodo para os passageiros. Elas também podem danificar ou destruir ativos de transporte.

Marítimo e Aquaviário

No setor portuário brasileiro, existem 36 portos públicos sob competência da União, denominados Portos Organizados e regidos pela Lei nº 12.815/2013. Nessa categoria, encontram-se os portos com administração exercida pela União, por intermédio de empresas de economia mista denominadas Companhias Docas, ou delegada a municípios, estados ou consórcios públicos. Tais portos públicos possuem grande importância na logística de transporte, constituindo-se em um elo logístico entre os modos de transporte de cargas, com grande relevância no escoamento da produção aos mercados consumidores nacio-

nais e internacionais, bem como na obtenção de insumos para o desenvolvimento de suas atividades econômicas. Segundo o Estatístico Aquaviário, produzido pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários[12], transita pelo setor portuário, em toneladas, cerca de 95% do comércio exterior do país, além de movimentar, em média, R$ 293 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 14,2% do PIB brasileiro.

Os danos e prejuízos causados pelas mudanças do clima no setor portuário podem ser os mais diversos possíveis, a depender da particularidade de cada porto. Os efeitos observados causados por fatores climáticos nos portos da costa brasileira levaram em conta o grau de impacto sobre a integridade e funcionalidade das estruturas portuárias, das operações e logística[13].

Os impactos severos e catastróficos foram majoritariamente causados por tempestades, chuvas torrenciais e vendavais. Os portos de Paranaguá e Itajaí registraram impactos catastróficos causados por eventos de pluviosidade e inundação. Os portos da Região Nordeste reportaram poucos, ou raros, eventos de chuva e tempestades mais severos. Nessa Região, as ameaças são bem menos impactantes que nas Regiões Sul/Sudeste, sendo os vendavais e as chuvas intensas de curta duração as ameaças mais relevantes para o setor[13].

As ressacas, agravadas pelo aumento do nível do mar, têm impactado o complexo portuário de Santa Catarina, que nas últimas décadas têm interrompido frequentemente suas atividades devido a fortes ventos ou grandes ondas. Historicamente, ciclones extratropicais associados a sistemas frontais causam tempestades na cidade de Santos causando diversas perdas socioeconômicas, especialmente em regiões vulneráveis, incluindo o Porto de Santos[1].

Riscos e Vulnerabilidades:

Transporte Rodoviário

O estudo AdaptaVias[2] realizou um levantamento dos principais riscos para infraestrutura rodoviária no Brasil e os resultados constam no sistema AdaptaBrasil-MCTI[14]. Identificou-se níveis médios e altos de risco apenas em trechos da BR-163, no Pará, no que se refere a alagamento/inundação, o qual é composta pela sensibilidade da infraestrutura e do meio biofísico. Todas as demais rodovias têm nível baixo ou muito baixo para essas duas componentes, o que impacta diretamente nos resultados do índice de risco climático.

Quanto ao impacto relacionado à erosão, que tem forte relação com o uso do solo, os trechos com Índice de Risco Climático (IRC) mais significativos se concentram nas rodovias no Pará, devido à sensibilidade da infraestrutura e do meio ambiente que conferem níveis altos e muito altos de vulnerabilidade à erosão. Também é significativo em rodovias localizadas em estados do Sul e em trechos rodoviários dos estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101), que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária[14].

As rodovias que apresentaram os maiores níveis de risco de deslizamento para todos os cenários analisados estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste (Serra do Mar e Serra Geral), além de rodovias litorâneas do Nordeste, principalmente nos litorais de Pernambuco e Alagoas[2]. Na Região Norte, somente a BR-230 (Altamira-Marabá), no Pará, se destaca para esse risco, devido à sua alta vulnerabilidade. No geral, os diferentes cenários de emissões indicam um aumento nas áreas com risco médio de deslizamentos, abrangendo principalmente a Região Sul e estados como Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás, além da BR-101 no litoral.

No que se refere às queimadas/incêndios, o risco é baixo para 68% da malha rodoviária brasileira, com 32% da extensão rodoviária com risco médio no interior do Nordeste brasileiro (Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte e sertão da Bahia) e parte do Norte (Tocantins e Pará)[2]. As rodovias com nível de ameaça climática muito alto e/ou alto concentram-se nos estados do Maranhão, Piauí e Pará. Há um aumento dos trechos com risco principalmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil em cenários de emissões intermediárias e altas. No cenário de altas emissões e médio prazo (2046-2065), cerca de 50% das rodovias apresentam nível médio de risco[2].

Em relação aos impactos diretos devido às altas temperaturas, nota-se que, diferente do que ocorre com os demais impactos analisados, já no período base há um predomínio de trechos com risco em nível médio. Isso ocorre porque aproximadamente 60% dos trechos rodoviários apresentam nível alto ou muito alto de ameaça climática no período 1981-2020. Os trechos rodoviários que apresentam os maiores riscos devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior, distribuídos em todas as regiões do País[2]. Destacam-se os estados do Rio Grande do Sul, com nível de ameaça climática médio em muitos trechos, e do Pará, com trechos rodoviários com nível alto e muito alto[2].

Transporte Ferroviário

O estudo AdaptaVias também realizou um levantamento dos principais riscos para infraestrutura ferroviária no Brasil. O risco para deslizamentos ganha destaque nos trechos ferroviários com alto tráfego e áreas vulneráveis, como regiões com alta carga de transportes e de relevo acidentado, como a Serra do Mar. Além da Estrada de Ferro do Litoral em São Paulo, o IRC demonstrou trechos com níveis altos e muito altos em áreas que cortam a Região Serrana Fluminense, principalmente a ferrovia que liga o Porto de Itaguaí (RJ) ao Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais e o trecho que liga Vitória (ES) até Belo Horizonte (MG), as quais apresentaram alto risco em decorrência do relevo acidentado. No Norte e Nordeste, foi encontrado um alto risco de deslizamento no eixo Pará-Maranhão, onde se localiza a Estrada de Ferro Carajás. Há uma tendência de aumento das ferrovias sob risco médio, alto ou muito alto nos horizontes temporais futuros[2].

O alto risco para erosão foi observado também nos trechos de ferrovias que cruzam a região serrana do Rio de Janeiro, bem como a estrada de ferro que liga Carajás (PA) até São Luiz (MA). Aproximadamente 60% da

malha ferroviária apresenta níveis médios de ameaça climática nas projeções futuras, com uma diferença significativa entre o período atual e os cenários futuros. Quanto ao risco para altas temperaturas, houve um aumento de médio para muito alto na maior parte dos trechos ferroviários estudados. Destaque para aumento da ameaça climática na Região Centro Oeste e em alguns estados das regiões Sudeste e Nordeste, assim como no nordeste do estado de São Paulo (Estrada de Ferro Noroeste do Brasil) e em parte dos estados de Minas Gerais e Bahia (Estrada de Ferro Bahia – Minas FCA 116). Também merece atenção os trechos no Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul, onde boa parte dos trechos apresentaram médio e alta ameaça. A ferrovia dos Carajás também apresentou alto risco, assim como a estrada de ferro Vitória-Belo Horizonte[2].

Aviação Civil

Os efeitos da mudança do clima sobre os negócios e a economia da aviação incluem riscos físicos, como atrasos de voos, fechamento de aeroportos e custos relacionados, além de riscos contratuais, regulatórios ou de conformidade legal. Também pode haver riscos devido à escassez de recursos essenciais[11]. As operações e o financiamento do setor aéreo podem ser afetados por todos os possíveis impactos das mudanças do clima identificados anteriormente. No curto prazo, é mais provável que os efeitos sobre os negócios e a economia estejam associados a eventos perturbadores, como tempestades e calor extremo, que podem levar a atrasos, cancelamentos e danos à infraestrutura[11]. Já no longo prazo, os impactos graduais, mas persistentes, como a mudança de temperatura ou o aumento do nível do mar, podem gerar efeitos comerciais e econômicos, incluindo mudanças na demanda turística e danos ou perda de infraestrutura[11].

Transporte Marítimo e Aquaviário

No transporte marítimo, os portos podem ser classificados de diversas maneiras para avaliar o grau de risco climáticos. Por exemplo, regionalmente, os portos das regiões Sul e Sudeste estão mais susceptíveis a danos e prejuízos devido a tempestades e chuvas intensas do que os portos da região Nordeste, por conta das características climáticas de cada uma dessas regiões. Os vendavais também atingem mais fortemente os portos do Sul e Sudeste, mas há ocorrência de ventos fortes em portos do Nordeste, com impacto às vezes significativo. Em termos de ressacas, inundações fluviais e erosão costeira, a vulnerabilidade dos portos pode ser influenciada pela sua localização em mar aberto ou em áreas abrigadas[13].

A partir do índice de risco para tempestades, observa-se que os portos de Rio Grande e São Francisco do Sul são os mais susceptíveis, possuindo uma classificação denomi-

nada como "alta". A elevada movimentação de carga vegetal do porto de Rio Grande é o fator responsável por posicioná-lo em uma situação de maior probabilidade de paralisações operacionais devido às tempestades, ao passo que no porto de São Francisco do Sul, a condição da área abrigada é o fator preponderante para possíveis paralisações decorrentes dessa ameaça.

Considerando o indicador de risco para vendavais, identifica-se sete portos com alto risco, sendo eles: Fortaleza, Ilhéus, Imbituba, Recife, Salvador, São Francisco do Sul e São Sebastião. Isso se deve principalmente ao "tipo de carga" e a "condição da área abrigada".

A maior parte dos portos analisados, 14 de 21, foram classificados com risco "médio" frente ao aumento do nível do mar, sendo eles: Angra dos Reis, Aratu-Candeias, Cabedelo, Fortaleza, Ilhéus, Imbituba, Itaguaí, Niterói, Paranaguá, Recife, Rio de janeiro, Rio Grande, São Francisco do Sul e São Sebastião. É importante ressaltar que o aumento do nível do mar potencializa o impacto de ressacas.

Quanto ao transporte hidroviário, a região Norte, onde se concentra a maior parte das hidrovias, deve enfrentar crises de escassez hídrica com maior frequência. As regiões hidrográficas Amazônica, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Atlântico Leste e Atlântico Nordeste Ocidental e Paraná apresentam um risco de aumento da seca segundo a plataforma AdaptaBrasil-MCTI[14] e outros autores[1,15].

Adaptação

A adaptação à mudança do clima para o setor de transportes abrange uma ampla variedade de ações. A seguir, são listadas as principais, presentes na literatura:

Planejamento Estratégico (Rodovias e Ferrovias)

- Melhoria do planejamento espacial integrado em relação aos alinhamentos de rodovias e ferrovias para garantir que os ecossistemas críticos adjacentes, que servem como amortecedores contra inundações, erosão, aumentos de temperaturas, entre outros, sejam mantidos e protegidos (ex.: Adaptação baseada em Ecossistemas)[2].

- Avaliação da possibilidade de existência de co-benefícios e sinergias entre mitigação e adaptação relacionadas às diferentes alternativas aplicadas ao setor de transportes (por exemplo, a promoção do modo ferroviário é mais favorável tanto para adaptação quanto para a mitigação)[2].

- Integração efetiva dos transportes com outros setores no processo de planejamento e desenvolvimento por meio, por exemplo, da Avaliação Ambiental Estratégica[2].

- Planejamento do uso da terra baseado no desenvolvimento sustentável, incluindo o Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS)[2].
- Proibição do desenvolvimento (construção ou expansão) da infraestrutura em áreas de vulnerabilidade ambiental, considerando o custo inerente de construção em áreas propensas aos riscos[2].

Planejamento Tático (Rodovias e Ferrovias)

- Desenvolvimento de um Plano de Contingência Integrado, incorporando o sistema de transporte como um todo[2].
- Integração de diferentes tipos de bancos de dados de monitoramento de ativos, preferencialmente uma certa padronização entre eles [2].
- Desenvolvimento de indicadores de monitoramento apropriados para avaliar a eficácia das medidas de adaptação[2].
- Revisão da eficácia dos procedimentos atuais de coleta de dados quantitativos para os impactos de eventos climáticos extremos e mudança do clima de longo prazo, com o objetivo de desenvolver um mecanismo de relatório intersetorial[2].
- Definição de funções na geração e na identificação de dados necessários, especificando os instrumentos de coleta de dados, e armazenando-os e mantendo-os em bancos de dados [2].

Planejamento Operacional (Rodovias e Ferrovias)

- Aprimoramento da produção e disponibilização de informações sobre eventos meteorológicos extremos[2].
- Instalação de proteções suaves contra erosão (grama, capim, arbustos e árvores, esteiras de coco ou geotêxtil com vegetação, material vegetal morto) para transportes terrestres[2].
- Adequação da instalação de drenos de contraforte em taludes e reforma de drenos de crista para ferrovias.
- Estabilização de taludes, incluindo a instalação de paredes de gabiões, pregos de solo e estacas-prancha para ferrovias.
- Realização de plantio de vegetação ao longo das vias.
- Aumento da limpeza e manutenção das estradas e rodovias e de seus arredores.

Implantação (Rodovias e Ferrovias)

- Prevenção combinada da erosão (revestimentos, blocos de concreto e estacas de madeira com vegetação; toras, paredes de toras ou madeira morta; entre outros) para ferrovias[2].
- Estabilização biotécnica para aprimorar estruturas de engenharia cinza[2].
- Reengenharia de taludes para modificar seu grau de inclinação, melhorar a drenagem ou proporcionar estabilização[2].
- Desenvolvimento de túneis de drenagem sob grandes estradas e rodovias para facilitar a drenagem de forma mais rápida[2].
- Utilização de novas misturas asfálticas (pavimento permeável) que auxiliam na drenagem mais rápida de água parada[2].
- Implementação de medidas de controle de erosão nas margens de rodovias[2].

Operação e Manutenção (Rodovias e Ferrovias)

- Realização de pintura dos trilhos de branco em áreas de alto risco conhecido de expansão térmica sob luz solar direta[2].
- Substituição de pontes para ferrovias com o uso de materiais resistentes ao calor, com coeficientes de expansão térmica mais baixos[2].
- Substituição de trilho articulado por trilho soldado continuamente[2].
- Substituição de trilhos para reparar defeitos de alinhamento lateral na zona de flambagem e realinhamento de trilhos em zonas adjacentes[2].
- Substituição do revestimento asfáltico danificado por outro revestimento composto por materiais mais resistentes ao calor[2].
- Elevação e modificação de infraestruturas para reduzir o impacto das inundações[2].

Monitoramento (Rodovias e Ferrovias)

- Monitoramento local de taludes com sensores[2].
- Monitoramento digital que avise quando as juntas de pontes se tornarem muito densas ou houver necessidade de substituir os materiais por outros mais resistentes ao calor[2].
- Melhoria das condições de monitoramento do subleito, especialmente após grandes chuvas[2].
- Pesquisa de novas técnicas e materiais adequados ao desgaste reduzido, de modo a incorporá-lo em cartilhas de instrução e normas técnicas de construção[2].

Portos Públicos

- Adequar o design das estruturas portuárias considerando os efeitos secundários das mudanças do clima visando aumentar a sua resistência e durabilidade. Por exemplo, maior resistência à corrosão[13].
- Diversificar o acesso ao porto/terminal visto que alguns acessos poderão ter seu uso limitado devido a eventos extremos[13].
- Aumentar as dimensões dos quebra-mares visando proteger as instalações portuárias e as embarcações atracadas do aumento das ondas decorrentes do aumento do nível do mar e das tempestades[13].
- Reforçar estruturas de enrocamento existentes no porto para que elas resistam mais aos impactos do aumento do nível do mar e ondas mais fortes[13].
- Implementar o *Vessel Traffic Management System* (VTMS) visto que tal sistema melhora a eficiência da movimentação de cargas, a utilização de recursos, da infraestrutura portuária e a organização do tráfego aquaviário na área de fundeio e no canal de acesso.
- Incluir a projeção de aumento do nível do mar em futuras concepções de infraestruturas portuárias[13].
- Melhorar os sistemas de drenagem internos ao porto[13].
- Utilizar monitores de ventos automáticos nos carregadores de navio[13].
- Trabalhar em conjunto com seguradoras, considerando cenários possíveis, discutindo sobre as alterações no cadastro de riscos e nos sistemas de gerenciamento de emergências[13].
- Criar uma rede entre os portos brasileiros, permitindo o compartilhamento de informações e desafios sobre adaptação à mudança do clima.
- Adotar planos de contingência[13].
- Registrar os impactos relacionados às ameaças climáticas de forma a ter um histórico dos eventos já ocorridos e no porto[13].
- Monitorar a velocidade dos ventos na área portuária/operacional, visando garantir a operação dentro de limiares de segurança.

Aviação Civil

- Realizar avaliações detalhadas dos riscos climáticos específicos que os aeroportos enfrentam, levando em consideração as projeções climáticas futuras[11].
- Desenvolver e implementar infraestrutura resistente a eventos climáticos extremos, como pistas de pouso e decolagem mais resistentes a inundações e ventos fortes[11].

- Garantir sistemas de drenagem eficazes para lidar com chuvas intensas e evitar inundações nos terminais e pistas[11].
- Integrar os aeroportos ao planejamento urbano das cidades, levando em consideração os impactos da mudança climática e garantindo que as áreas circundantes sejam resilientes[11].
- Implementar sistemas de monitoramento e alerta antecipado para eventos climáticos extremos, permitindo uma resposta rápida e eficaz[11].
- Trabalhar em colaboração com autoridades locais, regionais e nacionais[11].
- Investir em pesquisa e inovação para desenvolver tecnologias e soluções[11].

Referências Bibliográficas

1. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

2. BRASIL. Ministério dos Transportes. *Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transporte terrestres (rodoviário e ferroviário) existente e projetada: sumário executivo*. Brasília: Ministério dos Transportes, 2022. 46 p.

3. EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDE, C. *Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations*. Melbourne: ARRB Group, 2009. Disponível em: https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2009_Evans_Tsolakis_Naude.pdf. Acesso em: 5 maio 2021.

4. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br/#. Acesso em: 21 mar. 2024.

5. BRASIL. Ministério da Infraestrutura. *PNL - Plano Nacional de Logística 2035*. Brasília: MInfra, EPL, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf. Acesso em: 12 jun. 2022.

6. BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Base de dados da malha rodoviária federal do Sistema Nacional de Viação: formato shapefile*. 2021. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr. Acesso em: 20 jun. 2022.

7. BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. *Diretrizes socioambientais do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil.* Brasília: Via Sustentável: MTPA, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/centrais-de-conteudo/mtpa_diretrizes-socioambientais.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

8. BRASIL. Conselho Administrativo de Defesa Econômica. *Mercado de transporte aéreo de passageiros e cargas.* Brasília: CADE, 2017. Disponível em: http://www.cade.gov.br/acesso-a-informacao/publicacoes-institucionais/publicacoes-dee/Mercado_de_transporte_aereo_de_passageiros_e_cargas.pdf. Acesso em: 8 mar. 2020.

9. RITA, A. A.; HENKES, J. A. Aviação comercial e o impacto ambiental. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 153–190, 2021. DOI: 10.19177/rgsa.v9e42020153-190.

10. ABEAR – Associação Brasileira das Empresas Aéreas. *Panorama 2022 – O setor aéreo em dados e análises.* 2023. Disponível em: https://www.abear.com.br/publicacoes/. Acesso em: 15 mar. 2024.

11. ICAO – International Civil Aviation Organization. *Effects of climate change on aviation business: ICAO CAEP Aviation and Climate Change Factsheet (2020).* 2020. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Factsheet%20Business%20and%20Economics%20Final.pdf. Acesso em: 23 mar. 2024.

12. BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Estatístico Aquaviário.* 2021. Disponível em: http://web.antaq.gov.br/Anuario/. Acesso em: 11 maio 2021.

13. BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Impactos e riscos da mudança do clima nos portos públicos costeiros brasileiros: relatório final.* Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2022. 311 p.

14. ADAPTABRASIL-MCTI. *Risco climático*. Disponível em: https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br/. Acesso em: 21 mar. 2024.

15. BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Cenário de mudança climática do balanço hídrico.* 2022. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/5c4ad4e0-1b7c-45b4-9cb-3-1893e44c20d6. Acesso em: 15 jan. 2024.

Zona Costeira e Oceano

Introdução

Os impactos da mudança do clima sobre o oceano e zona costeira representam uma ameaça sem precedentes aos ecossistemas, populações e atividades econômicas que dependem dos recursos marinhos[1]. A interferência humana no sistema climático é reconhecidamente um fator determinante de perturbação dos sistemas naturais em todos os continentes e no oceano. Dentro desse contexto, o aumento do nível do mar e a erosão costeira emergem como problemas críticos. As praias, em particular, são ecossistemas marinhos altamente vulneráveis aos impactos da mudança do clima[2]. Além disso, o aumento da temperatura superficial do mar, a acidificação dos oceanos e o branqueamento e enfraquecimento dos recifes de corais vem sendo observados[3]. Esses eventos representam ameaças significativas à biodiversidade e ecossistemas costeiros, afetando, principalmente, as populações humanas que dependem mais diretamente dos serviços ecossistêmicos para subsistência e para proteção contra eventos extremos. Portanto, é crucial adotar medidas urgentes e eficazes de adaptação para proteger esses ecossistemas vitais e garantir a resiliência das comunidades costeiras frente aos desafios impostos pela mudança do clima[1].

Impactos observados

Os impactos da mudança do clima na Zona Costeira e Oceano são diversos e heterogêneos, abrangendo desde a perda de biodiversidade marinha e recursos naturais até eventos de inundação e erosão costeira. No Oceano Atlântico Sudoeste, os impactos da mudança do clima podem ser ilustrados pela elevação do nível do mar acima da média global para boa parte do litoral brasileiro[4], pelo aumento na energia das ondas e pelo aumento da frequência e intensidade dos eventos meteoceanográficos extremos, acentuando processos de erosão e de inundação nas últimas décadas[5].

O aumento da frequência e intensidade dos eventos oceanográficos extremos estão intensificando a erosão costeira, causando inundações, mudanças na amplitude das marés e na hidrodinâmica sedimentar[2]. O aumento nos eventos de erosão e inundação da costa têm ocasionado perdas de bens, restrição de serviços, redução de espaços habitáveis, e perda da biodiversidade e de produção pesqueira[3]. Na cidade costeira de Cananéia, no estado de São Paulo, dados observacionais de 50 anos indicaram aumento do nível do mar de 4,2 mm por ano. A população caiçara da Ilha do Cardoso já foi impactada pela erosão costeira e inundações[3].

Cerca de 60 a 65% da linha de costa das regiões Norte e parte do Nordeste do país está sob processo erosivo, enquanto no Sudeste e Sul esse percentual é cerca de 15%, devendo, porém, ser ressaltado, que no Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul existe um elevado percentual (cerca de 50%) de trechos com indicação

de tendência erosiva. Essa maior tendência de erosão da região Norte e parte do Nordeste decorre de uma série de fatores atuando em conjunto ou separadamente, como menor declividade da antepraia, maior amplitude da maré, transporte unidirecional da deriva litorânea e ainda da transferência de sedimentos para campos de dunas. Foram observadas taxas de recuo anual da linha de costa da ordem de 5 metros e mais, como por exemplo em trechos da orla do Piauí[7]. Em todo o Brasil, a erosão costeira está reduzindo a largura das praias, removendo franjas de manguezais e destruindo calçadas e infraestruturas, com impactos negativos na economia dos municípios e na vida dos moradores.

O litoral sul do Brasil é altamente suscetível a eventos extremos de tempestades, que frequentemente levam a inundações e processos erosivos, impactando significativamente as comunidades costeiras. Além disso, a mudança do clima está causando aumentos expressivos nas alturas das ondas devido a tempestades mais intensas e frequentes, o que, em conjunto com o aumento do nível do mar, tem o potencial de exacerbar o impacto das ondas nas comunidades costeiras[8]. As praias do sul do Brasil são altamente influenciadas pelo fenômeno ENSO (El Niño Southern Oscillation - El Niño e La Niña), e podem ser as mais afetadas pela mudança do clima. No Rio Grande do Sul, as ondas raramente ultrapassam 2m; entretanto, durante a passagem de frentes frias, a linha d'água pode atingir a base das dunas (aproximadamente 1,7m acima do nível médio) e aumentar significativamente seu potencial erosivo[2].

Nas praias da região Norte do país, os impactos da mudança do clima incluem a deposição de areia em áreas urbanas e infraestruturas costeiras, o colapso de estruturas de proteção como muros, e a modificação na paisagem costeira. Além disso, ocorrem problemas de contaminação da água superficial por efluentes e resíduos sólidos, bem como alterações no fluxo de água subterrânea devido a atividades humanas, como pavimentação urbana e construção de estradas. Também são observadas redução na faixa de praia, mudanças na topografia costeira e aumento da erosão em alguns trechos. Esses impactos afetam não apenas o ambiente natural, mas também ameaçam a infraestrutura urbana e a segurança das populações locais. No litoral do estado do Pará, ocorre erosão das dunas frontais durante o período chuvoso, devido ao aumento do nível do estuário de Marapanim e maior alcance da maré na linha de costa, formando-se escarpas praiais de 1 a 3m em praias do litoral paraense[9].

As alterações nas florestas de manguezais nas últimas décadas têm provocado mudanças na linha da costa, no estoque de carbono e na reprodução de espécies marinhas[3,10], impactando sobre os modos de vida da população, com redução de estoque pesqueiro, perda de infraestrutura e realocação de pessoas por causa de processos erosivos e de enchentes[3,11].

O aquecimento e acidificação dos oceanos, a elevação do nível do mar, aumento na frequência e intensidade de eventos extremos têm levado à perda de recifes de corais, floresta de manguezais, bancos de macroalgas e gramas marinhas[1], enfraquecendo as defesas naturais costeiras, expondo a linha de costa a tempestades e ondas oceânicas, dentre outros impactos[3]. O aquecimento do Oceano Atlântico tem levado a variações significativas nos padrões de chuvas na Amazônia e Nordeste do Brasil e em todo o território nacional, ressaltando a importância regional na regulação climática e a interdependência entre o sistema terrestre e oceânico[12].

Aumentos na temperatura do ar, do mar e de águas interiores provocam alteração dos processos químicos e biológicos, que comprometem a qualidade das águas em geral. Um dos principais impactos é a redução nas concentrações de oxigênio dissolvido, que afeta a capacidade de autodepuração dos corpos d'água e de manutenção das comunidades aquáticas. O aquecimento das águas superficiais de lagos e reservatórios também aumenta a estratificação vertical desses corpos d'água. Isso reduz a mistura das águas superficiais com as águas mais profundas, o que favorece a proliferação de algas oportunistas. Além da temperatura, mudanças nos perfis topográficos também podem causar mortalidade maciça da biota, principalmente devido a aterros que causam aprisionamento de organismos nas zonas superiores da praia[1,2,3].

Na última década, observou-se perda na cobertura de corais e algas calcáreas, ao mesmo tempo que ocorreu aumento na cobertura de corais moles, briozoários e de macroalgas foliosas e filamentosas. Essas "mudanças de fase" (substituição de organismos construtores por não construtores) causam redução das taxas de acreção de carbonato, enfraquecendo a estrutura recifal e reduzindo a complexidade dos habitats, com consequências para demais espécies recifais. Substituições similares tem sido observadas nos recifes da APA dos Corais e na Baía de Todos os Santos[5]. Estes exemplos ilustram como as mudanças climáticas e oceanográficas modificam a biodiversidade e reduzem a complexidade dos ecossistemas, ameaçando o crescimento dos recifes do Atlântico Sul.

Riscos e vulnerabilidades

A mudança do clima amplia a pressão sobre a zona costeira, colocando em risco os ecossistemas, a população costeira, as atividades socioeconômicas e a infraestrutura dessas áreas[13]. Cenários indicam que a mudança do clima resultará na intensificação do aumento do nível do mar, aumento de temperatura da água do mar, além e de maiores frequência e magnitude de eventos extremos, como frentes frias associadas a ciclones extratropicais[2,3].

Modelos e projeções para 2100 apontam que uma das principais espécies das florestas de macroalgas de profundidade no Brasil, *Laminaria abyssalis* (que vivem na região de ressurgência costeira do ES e RJ), poderá reduzir sua distribuição e abundância nas baixas latitudes e tender a se deslocar em direção ao sul, onde as condições são inadequadas para sobrevivência da população, em decorrência de mudanças nos padrões de temperatura da água do mar. Isso pode ocasionar prejuízos nos serviços ecossistêmicos que oferecem, como habitats fundamentais e refúgios de profundidade para manutenção da biodiversidade[3,14]. A exposição dos recifes biogênicos e bancos de rodolitos, que se estendem da Foz do Amazonas ao litoral catarinense, a temperaturas mais elevadas, ondas de calor marinhas e valores reduzidos de pH pode levar a perda de 80% da estrutura carbonática, comprometendo todo este ecossistema[3,14].

O aquecimento dos oceanos impacta bens e serviços ecossistêmicos e, principalmente, os recursos pesqueiros, afetando a pesca artesanal e industrial. O aumento da temperatura do mar pode intensificar alterações nos perí-

odos de reprodução, migração das espécies, aumento de enfermidades, nos padrões de distribuição latitudinal e de profundidade, no tamanho das populações, na composição das comunidades, bem como em relações de competição e predação[3]. O manejo inadequado e o estado de explotação da maior parte dos recursos pesqueiros somam-se à mudança do clima, aumentando o risco sobre a produção pesqueira e outros recursos aquáticos[3]. Estima-se que 1% da perda de cobertura globais de corais levaria a 3,8% de perda econômica associada ao valor recreativo e comercial dos recifes tropicais, equivalente a US$ 3,95 a US$ 23,78 bilhões anuais[3,14].

Em áreas costeiras altamente urbanizadas, o fornecimento de bens e serviços ecossistêmicos pode ser comprometido, assim como a disponibilidade de espaços habitáveis, em decorrência da intrusão marinha e de processos associados à elevação do nível do mar[1]. Quando associado a extremos de seca, o aumento do nível médio do mar pode causar modificações na qualidade da água em função da saturação e da salinização das bacias que deságuam no litoral. A tendência é a que as planícies costeiras mais extensas sejam mais afetadas, devido a intrusão e extensão da cunha salina, afetando o uso da água para fins de irrigação de culturas, de aquicultura/maricultura ou mesmo industrial[3].

Cidades costeiras, frequentemente marcadas por assentamentos precários e ausência de vegetação nativa, tornam-se mais vulneráveis a inundações e processos erosivos associados à elevação do nível do mar e do aumento da frequência e intensidade de eventos extremos. Esse impacto biofísico, somado à pobreza e a desigualdades socioeconômicas nas populações urbanas e nas comunidades tradicionais, que dependem integralmente do mar para sua subsistência e economia, intensifica a vulnerabilidade social dessas comunidades[3]. Algumas regiões brasileiras são mais vulneráveis à erosão costeira, que compromete a estabilidade do litoral no Norte e em grande parte do Nordeste do país. Em alguns trechos da orla do Piauí, por exemplo, as taxas de recuo anual da linha de costa ultrapassam 5 metros, demandando uma atenção especial para essas áreas[15]. Além disso, há indicações significativas de que essa tendência de erosão possa se estender também às regiões Sudeste e Sul, representando um desafio adicional para a gestão costeira[3,15].

É esperado um aumento na frequência de ocorrência dos eventos de alagamentos de localidades situadas em cotas topográficas mais baixas em toda a orla. Isto é mais importante nos estados das regiões Sul e Sudeste, onde a influência de sistemas frontais é mais significativa e as amplitudes das marés meteorológicas são maiores. Nestas regiões, é muito provável que o aumento do nível médio do mar intensifique os eventos extremos de inundações costeiras[3]. No entanto, é importante olhar para a sensibilidade e a exposição de forma combinada. Por exemplo, na Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, SC), o maior grau de sensibilidade física aos impactos da altura das ondas e a amplitude das marés ocorre ao longo das linhas costeiras arenosas expostas, as quais estão perto dos manguezais no lado oeste da ilha, no entanto, onde a densidade demográfica é menor[13].

Adaptação

Conhecer as vulnerabilidades é um primeiro passo para se pensar a adaptação

Considerando os diferentes compartimentos geomorfológicos da costa brasileira, observa-se que as áreas urbanas são as mais vulneráveis à elevação do nível do mar, sendo o risco de inundação um fator de grande impacto sobre a população residente. Entretanto, a construção de cenários futuros de riscos e vulnerabilidades é limitada pela ausência de séries temporais de longa duração na maior parte da costa brasileira, o que reduz a precisão das informações sobre a vulnerabilidade das cidades costeiras[3]. Assim, fomentar estudos científicos voltados à identificação das vulnerabilidades no espaço costeiro é fundamental para planejar medidas de adaptação coerentes com a realidade de cada local.

Gestão integrada do uso e ocupação do solo na zona costeira a partir do conhecimento sobre as vulnerabilidades

A integração da gestão costeira com setores como desenvolvimento urbano, turismo, segurança alimentar e nutricional, igualdade racial, povos indígenas e comunidades tradicionais é fundamental para se pensar adaptação nas áreas costeiras, de forma a minimizar as pressões da ocupação urbana e os impactos na provisão de água e alimentos (sobrepesca, por exemplo), poluição e para evitar que os serviços ecossistêmicos de suporte (funções básicas do ecossistema que sustentam os serviços de regulação, de provisão e os culturais) sejam afetados[3].

Dados existentes sobre processos erosivos são importantes a serem considerados em programas, projetos, planos e ações. Por exemplo, sabendo-se que a predominância da erosão sobre a estabilidade do litoral nas regiões Norte e Nordeste, juntamente com indicadores de possíveis reversões em direção à instabilidade nas regiões Sudeste e Sul, deve-se considerar uma abordagem mais rigorosa na definição das faixas de não edificação nessas regiões. Locais com taxas elevadas de recuo anual da linha de costa merecem urgência de ações eficazes para proteger as áreas costeiras vulneráveis e ressaltam a importância de políticas de planejamento urbano que levem em consideração essas mudanças significativas no ambiente costeiro[15].

Fomentar áreas de proteção costeira e marinhas

Os ecossistemas marinhos desempenham um papel fundamental na redução dos impactos da mudança do clima, uma vez que oferecem serviços ecossistêmicos essenciais como sumidouros de carbono, regulação do clima e da qualidade da água e proteção costeira. A vegetação costeira, os recifes de corais e bancos de macroalgas desempenham um papel crucial como amortecedores físicos e químicos de estressores globais. Os eventos extremos, por exemplo, têm seu impacto parcialmente absorvido por barreiras recifais, manguezais e dunas costeiras, reduzindo os danos na região costeira. Manguezais, marismas e pradarias de gramas marinhas sequestram CO_2 e estocam como matéria orgânica incorporada, principalmente nos solos e sedimentos, contribuindo para a mitigação da mudança do clima. Os recifes de corais, manguezais, pradarias de gramas marinhas e bancos de macroalgas funcionam como berçário, refúgio e zona de alimentação de muitas espécies de relevância socioeconômica[3,16,17].

Redução das desigualdades

Considerando que a maior parte dos impactos é sofrida de forma mais intensa por populações vulnerabilizadas em áreas urbanas, bem como povos e comunidades tradicionais e povos originários, as ações de adaptação precisam levar e conta essas desigualdades, de modo a não apenas reduzir os riscos, mas também evitar perpetuar a injustiça climática na formulação da agenda adaptativa para a Zona Costeira e o Oceano. Por exemplo, em casos de remanejamento no uso e ocupação do solo, é fundamental assegurar a participação das comunidades afetadas, que residem em áreas impróprias, nos processos de tomada de decisão. Da mesma forma, comunidades tradicionais que dependem diretamente dos recursos pesqueiros devem ser ouvidas em ações voltadas à conservação dos ecossistemas costeiros e ao planejamento espacial-marinho[3].

Adaptação e mitigação andam juntas

Por fim, atuar na adaptação em conjunto com a mitigação é essencial na agenda climática. Para alguns sistemas, como para a sobrevivência dos corais e algas calcárias, limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais é essencial, pois a partir de 2 °C eles desaparecerão por completo[3,18].

Referências

1. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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*. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

2. Amaral, A.C.Z. et al. Brazilian sandy beaches: characteristics, ecosystem services, impacts, knowledge and priorities. *Brazilian Journal of Oceanography*, [S.l.], v. 64, n. spe2, p. 5-16, 2016.

3. BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782. Acesso em: Acesso em: 21 mar. 2024.

4. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the Global Climate 2023. Geneva: WMO, 2024. (WMO-No. 1347). Disponível em: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023. Acesso em: 3 out. 2024.

5. Copertino, M.S., Ciotti, A.M., Botta, Cardoso, L.G., Frédou, F.L., Giarrizzo, T., Kikuchi, R.K.P., Lanari, M., Mazzuco, A.C.A., Magris, R.A., Moser, G., Tardin, R. (2024). Histórico de Mudança e o Estado Atual da Biodiversidade da Zona Marinha-Costeira. Em: Seixas, C.S., Turra, A., Ferreira, B.P. 1o Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. Plataforma Brasi-leira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano. Editora CUBO.

6. Travassos, L., Nicolodi, J., Siegle, E., Elliff, C., Accioly, M.C., Bentes, B., Cardoso, P.M., Egler, C., Medeiros, T., Rodrigues Neto, R., Sousa e Silva, L. (2024). Vetores de Mudança da Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos da Zona Marinha-Costeira. Em: Seixas, C.S., Turra, A., Ferreira, B.P. 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. Editora CUBO. PG-PG.

7. Brasil. Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro – GI-GERCO/CIRM. *Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira*. Brasília/DF, 2018.

8. Lima, A.d.S. et al. Hydrodynamic and Waves Response during Storm Surges on the Southern Brazilian Coast: A Hindcast Study. *Water*, [S.l.], v. 12, n. 12, p. 3538, 2020. DOI: 10.3390/w12123538.

9. Negrão, Y.S. et al. Vulnerabilidade à erosão costeira em praias amazônicas e a ocupação populacional em áreas de riscos. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 1264–1284, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.1951.

10. Copertino, M. S. et al. Zonas Costeiras. In: Nobre, C.; Marengo, J. (eds) *Mudanças Climáticas em Rede: Um Olhar Interdisciplinar*. Contribuições do Instituto de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas. São José dos Campos: INCT, 2017. p. 608.

11. Martins, I. M.; Gasalla, M. A. Perceptions of climate and ocean change impacting the resources and livelihood of small-scale fishers in the South Brazil Bight. *Climatic Change*, v.147, p.441-456, fev. 2018. DOI: 10.1007/s10584-018-2144-z.

12. Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Soares, W. R.; et al. Increase Risk of Drought in the Semiarid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 °C. In: *Climate Change Risks in Brazil.* Springer International Publishing, 2019. p. 181–200.

13. Mussi, C.S. et al. Coastal sensitivity and population exposure to sea level rise: a case study on Santa Catarina Island, Brazil. *J Coast Conserv*, [S.l.], v. 22, p. 1117–1128, 2018. DOI: 10.1007/s11852-018-0619-8.

14. Horta, P. et al. Climate change and Brazil's coastal zone: socio-environmental vulnerabilities and action strategies. *Sustainability in Debate*, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 405–444, 2020.

15. Brasil, Ministério do Meio Ambiente. *Panorama da erosão no Brasil. Ministério do Meio Ambiente*. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial; Organização Dieter Muche. Brasília, DF: MMA, 2018.

16. Bustamante, M. M. et al. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 24, n. 7, p. 1249-1270, 2019.

17. Tedesco, E. C.; Segal, B.; Calderon, E. N.; Schiavetti, A. Conservation of Brazilian coral reefs in the Southwest Atlantic Ocean: a change of approach. *Latin American Journal of Aquatic Research*, v.45, n.2, 2017.

18. Roy, J. et al. Sustainable Development, Poverty Eradication and Reducing Inequalities. In: Massondelmotte, V. et al. *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development*. [s.l: s.n.], 2018. p. 435-558.

CIÊNCIA&CLIMA

gef

PNUD

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO