

**INCT for Climate Change Phase 2
(INCT MC2)**

**Ref: FAPESP 2014/50848-9
CNPq 465501/2014-1
CAPES 88887.136402/2017-00
INCT-MCTI/CNPq/CAPES/FAPs 16/204**

Final Report

Julho 2025

**Principal Researcher and Coordinator:
Jose Antônio Marengo Orsini**

CEMADEN/MCTI

1. Visão Geral

O INCT para Mudanças Climáticas Fase 2 (INCT MC2) visa implementar e desenvolver uma rede abrangente de pesquisa interdisciplinar sobre mudanças globais e sustentabilidade, e se baseia na cooperação entre cerca de 30 grupos de pesquisa de todas as regiões do Brasil, de diversos grupos de pesquisa nacionais e internacionais, envolvendo em sua totalidade mais de 350 pesquisadores, estudantes e colaboradores, consolidando-se como uma das maiores redes de pesquisa ambiental desenvolvidas no Brasil.

O programa é composto por seis linhas temáticas (ou subcomponentes):

1. Segurança alimentar;
2. Segurança hídrica;
3. Segurança energética;
4. Saúde e mudanças climáticas;
5. Desastres naturais, impactos na infraestrutura física em áreas urbanas e desenvolvimento urbano;
6. Impactos nos ecossistemas brasileiros diante das mudanças no uso do solo e da biodiversidade.

Todos esses componentes estão conectados por meio de 3 temas integradores ou transversais:

7. Economia e impactos em setores-chave;
8. Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários climáticos futuros para estudar vulnerabilidade, impactos, adaptação e resiliência;
9. Comunicação, disseminação do conhecimento e educação para a sustentabilidade.
10. Integração e síntese dos resultados

A partir do 6º ano, criamos uma fase de dos 9 componentes, e a estrutura dos projetos até o final do projeto em 2025 é mostrada nos relatórios anteriores do projeto.

Essa agenda proporciona excelência científica em diversas áreas das mudanças ambientais globais e suas implicações para o desenvolvimento sustentável. A ênfase nos impactos das mudanças climáticas na agricultura, saúde, energia renovável, desenvolvimento urbano e desastres naturais como temas centrais integrados à modelagem ambiental, à economia e à comunicação desses impactos ao público, à comunidade científica e à academia, à indústria, às empresas e ao governo pode contribuir para a manutenção da excelência nas atividades de

Ciência, Tecnologia e Inovação como eixo do desenvolvimento ambiental sustentável, com carácter integrador e inovador. Diferentemente do Relatório do Ano 1, onde apenas os componentes financiados pela FAPESP foram explicados, nos Anos 2, 3, 4, 5, 6 e agora no Ano 7, decidimos incluir todos os componentes do projeto, que contempla contribuições da UFMG e da FIOCRUZ em MG, e parcerias com a UFSC, UFRJ, IPEA e outras instituições fora do Estado de São Paulo. Isso proporciona uma visão holística do projeto e de seus componentes. Talvez uma das contribuições mais importantes do INCT MC2 tenha sido a participação de vários pesquisadores deste projeto na elaboração do Relatório Científico do Painel Científico da Amazônia (PAA) e atividades relacionadas em 2023 e 2024. Em resposta a esses desafios e inspirado pelo Pacto de Leticia pela Amazônia, um grupo de mais de 200 cientistas proeminentes da região se uniram para formar um projeto sem precedentes. O Painel foi convocado pela Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (SDSN) e forneceu uma avaliação científica abrangente e inédita do estado da Amazônia, tendências atuais e recomendações para o bem-estar a longo prazo do ecossistema e de seus povos. Suas recomendações promovem a conservação, bem como o desenvolvimento sustentável da região, com uma visão de uma floresta em pé, bioeconomia de rios caudalosos baseada em conhecimento, tecnologia e inovação locais e indígenas. Em março de 2023, o PAA divulgou suas conclusões iniciais, bem como uma versão preliminar de seu relatório completo para consulta pública. A SDSN e o Banco Mundial coorganizaram um diálogo de alto nível em Belém, Pará, para apresentar essas descobertas iniciais e fomentar conversas entre cientistas e formuladores de políticas para avançar em caminhos de desenvolvimento sustentável na Amazônia. Também planejamos fornecer informações científicas para a COP 29, em Baku, em novembro de 2024, e para a COP-30, que será realizada em Belém em 2025, e participamos e patrocinamos a Conferência Internacional da Rede Clima em Brasília. De 18 a 20 de junho de 2024, participei do lançamento do Policy Brief sobre a seca, organizado pela SPA em Nova York, em 8 de julho de 2024. Também foram apresentados resultados do projeto em reuniões nacionais e internacionais, na COP da UNCCD de combate a desertificação na Arabia Saudita em Outubro 2024

<https://inctmc2.cemaden.gov.br/> (campo: Publicações).

No web site do projeto aparecem [Artigos da equipe](#), [Livros e Capítulos de livros](#), Livros, [Relatórios de Atividades INCT-MC2](#), [Teses e dissertações](#)

Os objetivos e metas do projeto podem achados no web site do projeto.

2. Relatorios finais das componente do INCT MC2

2.1 Impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas brasileiros

As mudanças climáticas estão afetando significativamente todos os biomas brasileiros. De maneira diferenciada, todos os nossos biomas, Amazônia, Cerrado, Pantanal, Pampas, Caatinga, estão sendo impactados, tanto pela ação humana de mudança do uso do solo, quanto pela mudança climática. A resiliência de cada um de nossos biomas está sendo afetada, pois eles evoluíram ao longo de milhares de anos com um clima razoavelmente estável ao longo do Holoceno. O Homem mudou isso. O desmatamento no Cerrado e Amazônia alteraram porções significativas da área destes biomas. O aumento de temperatura e mudanças no regime de precipitação, junto com o aumento dos eventos climáticos extremos estão alterando as funções metabólicas que sustentam o funcionamento de nossos ecossistemas. No caso da Amazônia, que teve 19% de sua área desmatada, a degradação florestal associada ao aumento de temperatura (que em algumas regiões já atingem 2.3 graus Celsius), e à redução da precipitação (em algumas regiões de 10 a 15%) traz stress hídrico à vegetação, e altera a evapotranspiração e alocação de carbono no ecossistema. Nosso Cerrado conta com alta taxa de conversão à agricultura, e com

fortes alterações no regime hidrológico. O Pantanal tem sofrido nos últimos 5 anos com queimadas intensas que impactam a fauna e flora de modo significativo. Por outro lado, o Pampa está sofrendo inundações recorrentes e nossa caatinga está mais seca e mais quente. Estas alterações climáticas estão acentuando a perda de biodiversidade, que é significativa em todos os biomas, embora difícil de quantificar precisamente. Temos tarefas urgentes, como implementar os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, bem como cumprir com nossos compromissos associados ao Acordo de Paris. Precisamos zerar o desmatamento da Amazônia até 2030, e implementar planos de proteção ao Cerrado e demais biomas. Em paralelo, temos também que reduzir nossas imensas desigualdades sociais, e edificar um desenvolvimento que seja realmente sustentável.

Integrando a proteção da biodiversidade à mitigação das mudanças climáticas

No Brasil, diversos estudos já projetam os impactos das mudanças climáticas sobre sua rica biodiversidade, sobretudo na Mata Atlântica e no Cerrado, mas ainda há lacunas de conhecimento no Pantanal e Pampa e, sobretudo, no ambiente marinho. O Acordo de Paris tem o potencial de reduzir significativamente as ameaças à biodiversidade, embora não seja capaz de eliminá-las completamente. Portanto, além da mitigação das mudanças climáticas, é crucial implementar estratégias de adaptação climática, como a criação e manutenção de UCs. No entanto, para serem eficazes, essas áreas devem ser distribuídas de maneira mais equilibrada entre os biomas brasileiros e considerando as mudanças climáticas projetadas. Além disso, é preciso considerar mudanças de uso e cobertura e promover a conectividade entre as UCs, permitindo deslocamento das espécies em resposta às mudanças climáticas [Malecha e Vale, 2024].

Os serviços ecossistêmicos englobam todos os materiais que nós consumimos providos pelos ecossistemas, sejam alimentos (frutos, raízes, animais, mel, vegetais), matérias-primas para construção e combustível (madeira, biomassa, óleos de plantas), água potável (qualidade e quantidade) e recursos genéticos, entre outros. A resiliência dos ecossistemas e sua capacidade de reagir a mudanças estão sujeitos, em grande parte, à sua biodiversidade.

As alterações observadas na temperatura e na chuva já estão impactando o funcionamento dos ecossistemas em praticamente todas as regiões do nosso planeta. Mudanças climáticas podem, por exemplo, levar a desencontros entre a época da floração e a atividade dos polinizadores, afetando a produtividade de culturas e de ecossistemas naturais, com consequências ainda imprevisíveis para a manutenção da biodiversidade e da produção de alimentos. Também perturbam os padrões ecossistêmicos da fotossíntese e da produtividade, podendo modificar os ciclos hidrológicos e a dinâmica do ciclo do carbono.

Os efeitos sinérgicos da mudança do uso da terra, incluindo a fragmentação e redução de vegetação nativa e mudanças do clima, podem aumentar a ação de pragas, reduzindo os polinizadores e exigindo medidas de mitigação ou adaptação para garantir a produtividade de muitas culturas alimentares no Brasil e ao redor do mundo. A vulnerabilidade da nossa biota e ecossistemas aumenta significativamente e conseqüentemente reduz a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos associados, que são vitais para nosso país.

Na Amazônia, o aumento da produção de biomassa, aceleração do ciclo de vida das árvores, alterações na distribuição e abundância de espécies estão entre as mudanças relacionadas ao efeito fisiológico da elevação de CO₂ atmosférico, que são também influenciadas pela disponibilidade de nutrientes nos solos, em particular o fósforo. Em nossa vasta plataforma continental oceânica, nosso conhecimento é ainda mais restrito em decorrência da falta de programas de monitoramento, e das especificidades dos estudos nesse ambiente. No ambiente marinho, o aquecimento dos oceanos (que atingiu em média 1 grau Celsius) tem promovido a migração de espécies e estoques pesqueiros para maiores latitudes.

Para melhorar a detecção e atribuição dos efeitos das mudanças climáticas na biodiversidade e ecossistemas brasileiros, é fundamental melhorar nosso entendimento dos serviços ecossistêmicos relacionados, e analisar possíveis respostas a cenários futuros de aquecimento, prevendo e sugerindo medidas de mitigação e adaptação e procedimentos de remediação.

Mudanças de uso do solo e impactos nos ecossistemas

Por uma série de razões, a Amazônia é uma região estratégica para o planeta e para o Brasil [Artaxo et al., 2022]. Contempla a maior floresta tropical do mundo, com uma área aproximada de 6,7 milhões de km², dos quais 5.5 milhões de km² estão em território brasileiro; sua bacia hidrográfica é o maior sistema fluvial do planeta, e a floresta está distribuída entre 9 países (Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana Francesa, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela). A Amazônia também hospeda uma gigantesca e complexa biodiversidade. Desenha papel fundamental na provisão de produtos e serviços ambientais no ciclo do carbono e na regulação do clima. É o maior reservatório de carbono em regiões continentais, contendo cerca de 120 bilhões de toneladas de carbono, ou o equivalente a 10 anos de toda a queima de combustíveis fósseis. Presta serviços ecossistêmicos essenciais para a sociedade e a economia brasileira. Tem uma vasta população tradicional e indígena, detentora de ativos de valores inestimáveis como conhecimento, línguas e cultura nos povos indígenas e comunidades tradicionais [Artaxo et al., 2022b].

É consenso, para a ciência, que a preservação da floresta é fundamental para a sustentabilidade do planeta [SPA 2021]. O bioma amazônico é rico em diversidade cultural, linguística, biológica e geológica, e investimentos em ciência, tecnologia e inovação, em pesquisas básicas e aplicadas são estratégicos para a sua compreensão e sua sustentabilidade. No entanto, apesar de ser caracterizada como a região que hospeda a maior biodiversidade natural do país, o seu desenvolvimento socioeconômico em torno de atividades relacionadas à floresta ainda não alcançou escala de projeção em todo o seu potencial. Há um gigantesco desafio no âmbito da regularização fundiária, e faltam planos concretos de crescimento econômico inclusivo e sustentável. O sistema MapBiomias de mapeamento da cobertura do solo de nosso país é um excelente exemplo de esforços em tornar transparente e com fácil acesso à sociedade o impacto das mudanças do uso do solo para todo o território nacional (<https://mapbiomas.org/>).

O Cerrado e as mudanças climáticas

O Cerrado é maior região de savana da América do Sul e o segundo maior bioma sul-americano, com uma área original de cerca de 2 milhões de km², quase um quarto da superfície terrestre brasileira [Bustamante, 2024]. Ele contém um conjunto único de comunidades biológicas cuja diversidade e importância ainda não são plenamente apreciadas. Enquanto esforços importantes são feitos para preservar as florestas tropicais do Brasil, a destruição do bioma Cerrado não encontra a mesma ressonância. Paradoxalmente, a destruição dos sistemas ecológicos desse bioma ameaça os recursos naturais de suporte à vida e os serviços ecossistêmicos vitais para a maioria da população brasileira, incluindo a viabilidade contínua da agricultura. Essa antiga região, que testemunhou importantes períodos da história geológica do Brasil e da presença humana no continente, resume os principais desafios ambientais atuais em busca da sustentabilidade e traz à tona a necessidade de novas respostas da ciência e da sociedade.

No Cerrado, as seguranças alimentar, energética e hídrica do país estão intrinsecamente conectadas e são dependentes da conservação da vegetação nativa em larga escala. A agricultura no Cerrado segue o ritmo da sazonalidade da precipitação, mas as projeções mais recentes de mudanças do clima apontam para a redução da precipitação e a extensão do período seco. A adoção de práticas de irrigação tem crescido persistentemente desde os anos 1970. Porém, o desmatamento em escala regional altera o ciclo hidrológico no Cerrado e, em conjunto com a variabilidade climática, podem limitar tais práticas.

A perda da savana mais biodiversa do mundo, com expressivos estoques de carbono, responsável por significativa produção de água e energia para todo o país, traz um alto custo com graves repercussões por longo tempo. Compreender os efeitos das ações humanas sobre a estabilidade climática e propor ações de mitigação e adaptação são alguns dos grandes desafios da humanidade para o século 21 [Bustamante et al., 2019]. O país ocupa a segunda posição na lista dos detentores das maiores áreas de florestas do mundo, atrás da Rússia, sendo o primeiro quando se considera apenas as áreas de florestas tropicais. No entanto, a conversão da vegetação nativa em diferentes biomas brasileiros, em função das demandas de expansão agropecuária,

contribuiu significativamente para as emissões brasileiras quando comparado com a proporção das emissões globais do setor de uso terra. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra é responsável por aproximadamente 23% das emissões globais de GEE de origem antrópica. No Brasil, o setor é o principal responsável pelas emissões líquidas de CO₂.

No bioma Cerrado, a pressão da expansão da fronteira agrícola na região do MATOPIBA (estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) pressiona a conversão, principalmente, de áreas de vegetação nativa. Parte da abertura de novas terras para cultivos decorre da supressão de áreas florestadas e a região responde por uma parcela importante das emissões do bioma Cerrado.

A flora e a fauna nativas do Cerrado são adaptadas ao clima sazonal com uma estação seca acentuada. Solos predominantemente antigos, profundos e com baixa fertilidade, selecionaram a estrutura da vegetação nativa como uma “floresta invertida”: a maioria dos arbustos e árvores baixos visíveis acima da superfície investe a maior parte (~75%) de sua biomassa — e do carbono, como consequência — no componente subterrâneo. Suas raízes profundas podem, portanto, acessar a água nas camadas inferiores do perfil do solo. Elas também ajudam a reabastecer a água canalizando a chuva e outras águas superficiais de volta para os reservatórios profundos do solo, sendo usados intensivamente na produção agrícola (70% ou mais da água do Brasil é usada para a agricultura).

A conversão da vegetação nativa com raízes profundas e dossel heterogêneo por monoculturas com raízes rasas e dossel homogêneo determina mudanças importantes na troca de energia e água entre a vegetação e a atmosfera e já tornaram o Cerrado mais quente e seco. Como a savana mais biologicamente rica do mundo, o Cerrado abriga quase 12.000 espécies de plantas nativas, cerca de 212 espécies de mamíferos, 267 espécies de répteis e 209 espécies de anfíbios, além de uma população rica e diversificada de cerca de 837 espécies de aves, todas distribuídas em uma ampla variedade de habitats. Seus ambientes aquáticos abrigam 1.300 espécies de peixes, e estimativas recentes indicam que o Cerrado é o refúgio de 13% das borboletas, 35% das abelhas e 23% dos cupins dos trópicos.

O Cerrado é habitado por povos tradicionais (indígenas, quilombolas, sertanejos) que, ao longo de muitas gerações, desenvolveram usos sustentáveis e mutuamente benéficos da biodiversidade e dos recursos naturais da região. Evidências baseadas em satélites mostram que a vegetação nativa é mais bem protegida quando as unidades de conservação são gerenciadas por comunidades locais e tradicionais. A invasão da produção agrícola extensiva de monoculturas e a natureza fragmentada das áreas de conservação públicas e privadas deslocam as populações locais e as separam do ambiente natural mais extenso e seus meios de subsistência. Esse patrimônio e benefício cultural e funcional reduzido com a perda de territórios tradicionais devido ao desmatamento e agora é pressionado também pela mudança climática.

Políticas públicas para a preservação de nossos ecossistemas

É possível reverter os impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas brasileiros? Infelizmente a resposta a esta importante pergunta é não. Com as atuais emissões de gases de efeito estufa, o planeta está em uma trajetória de aumento médio de temperatura de 3 graus Celsius. Nos últimos 100 anos, já observamos um aumento de 1.2 graus, e devemos atingir 1.5 graus nesta década, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM). Portanto, nossa sociedade vai viver um aumento importante de temperatura, conjugado com aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos e de alterações fortes no padrão da precipitação na maior parte do país.

Levando em conta as questões científicas, de governança, finanças, e novas tecnologias poderemos construir um futuro mais resiliente, sustentável e justo, preservando os serviços ecossistêmicos através de estratégias adequadas de adaptação e mitigação de emissões. Este processo está associado aos ODS, já que temos que atender às necessidades básicas da população (educação, saúde, igualdade de gênero, erradicação da pobreza, fome zero, água limpa e outros), e ao mesmo tempo respeitar os limites da disponibilidade dos recursos naturais de nosso planeta. Estas são somente algumas das importantes questões que o Brasil terá que

enfrentar, e soluções baseadas em ciência sólida certamente têm mais chances de garantir uma trajetória sustentável a nosso país.

4.2 Saúde

No contexto das mudanças climáticas globais, a Componente Saúde do INCT-MC2 adotou abordagens metodológicas complementares, conceitual, retrospectiva e prospectiva, para investigar os impactos ambientais sobre a saúde pública no Brasil. A primeira abordagem consistiu no desenvolvimento de um modelo de vulnerabilidade socioambiental, fundamentado em indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, aplicado a diferentes regiões do país. Os índices gerados evidenciaram desigualdades estruturais, com destaque para áreas vulneráveis no Semiárido, Amazônia e Maranhão, sugerindo a necessidade de políticas públicas intersetoriais e adaptativas. Na abordagem retrospectiva, foram analisadas séries temporais de mortalidade entre 1996 e 2022, correlacionadas com variáveis solares e geomagnéticas, incluindo os índices Ap e SID. Os resultados revelaram padrões sazonais distintos entre as regiões Sul e Nordeste, com maior impacto dos índices Ap e SID sobre as taxas de IAM e AVC. As frequências ELF da Ressonância de Schumann foram analisadas como um componente adicional, apresentando correlações significativas com picos de mortalidade cardiovascular no Sul, área influenciada pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul. A abordagem prospectiva aplicou modelagem de nichos ecológicos para estimar o risco de expansão da leishmaniose visceral e tegumentar em cenários futuros de mudanças climáticas. Os modelos indicaram áreas de risco ampliado, especialmente no sul do Brasil e em áreas fronteiriças na Amazônia, onde o desmatamento, a temperatura e a cobertura vegetal foram fatores determinantes. Os resultados obtidos reforçam a importância de estratégias interdisciplinares que integrem dados climáticos, geofísicos e epidemiológicos, promovendo análises multiescalares para a formulação de políticas públicas adaptativas voltadas à mitigação dos impactos ambientais sobre a saúde humana.

Introdução

As complexas relações entre o clima e a saúde humana podem ser estudadas por diferentes abordagens, em função dos distintos mecanismos de atuação sobre os indivíduos e populações. Os efeitos diretos referem-se à ação de fatores físicos, como temperatura, umidade, pressão atmosférica e radiação, sobre a fisiologia humana, impactando especialmente os sistemas cardiovascular, respiratório e imunológico (Gasparrini et al., 2015; Romanello et al., 2023).

Estudos internacionais vêm demonstrando a crescente influência das mudanças climáticas na carga global de doenças. A literatura evidencia, por exemplo, o aumento da mortalidade por calor extremo nas cidades tropicais (Guo et al., 2014), a expansão geográfica de vetores de doenças infecciosas como dengue e leishmaniose (Liu-Helmersson et al., 2019; Escobar et al., 2016), e a relação entre variabilidade climática e surtos de doenças respiratórias e diarreicas (Levy et al., 2016). Além disso, há um campo emergente de pesquisas que investiga a influência dos fenômenos solares e geomagnéticos como tempestades solares e distúrbios no campo magnético terrestre sobre a saúde, em especial sobre desfechos cardiovasculares e neurológicos, como mostrado em estudos conduzidos na Rússia, Japão e Canadá (Babayev & Allahverdiyeva, 2007; Stoupe et al., 2006; Watanabe et al., 2021). Esses achados reforçam a necessidade de uma abordagem integrada que considere tanto os efeitos atmosféricos quanto os geofísicos na determinação dos agravos à saúde.

Neste estudo, três foram as abordagens principais:

1. Desenvolvimento de um modelo conceitual para o estudo da vulnerabilidade socioambiental da população brasileira aos efeitos do clima sobre a saúde. A partir desse modelo, foram desenvolvidas métricas quantitativas de avaliação aplicadas a municípios de diferentes estados do país.
2. Realização de um estudo epidemiológico retrospectivo, do tipo ecológico, voltado à análise dos efeitos de fenômenos geomagnéticos e solares sobre a mortalidade por diferentes causas, em duas regiões brasileiras com condições geofísicas contrastantes.

3. Condução de estudos prospectivos baseados na modelagem de nichos ecológicos, voltados à avaliação de áreas de risco para a transmissão da leishmaniose, integrando dados climáticos, ambientais e territoriais.

Área de estudo

A primeira abordagem, de caráter conceitual, envolveu municípios distribuídos em distintas regiões do país, escolhidos por sua representatividade frente à diversidade climática, socioeconômica e de infraestrutura urbana e sanitária. Essa heterogeneidade foi fundamental para a formulação de um modelo de vulnerabilidade com potencial de aplicação em escala nacional. Trabalhos anteriores apontam que o mapeamento da vulnerabilidade em contextos diversos — como por exemplo a Amazônia, o Semiárido, e o Pantanal — permite identificar padrões territoriais relevantes para a formulação de políticas públicas adaptativas e sensíveis às desigualdades (Menezes et al., 2018; Menezes et al., 2021; Santos et al., 2023; Vommaro et al., 2020).

A segunda abordagem, retrospectiva, foi conduzida nas regiões Sul e Nordeste, abrangendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, e, no Nordeste, os estados do Maranhão, Paraíba e Pernambuco. A população de base foi definida em função da diferença de latitude entre essas regiões, sendo que latitudes mais altas apresentam maiores níveis de atividade geomagnética. Essa configuração territorial permitiu a comparação entre distintos regimes de variabilidade geofísica, influenciados pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul e pelo Eletrojato Equatorial, e seus possíveis efeitos sobre a mortalidade por diferentes causas, conforme analisado nos estudos desenvolvidos pela equipe da Componente Saúde (Freitas et al., 2024; Costa et al., 2024).

A terceira abordagem, de caráter prospectivo, concentrou-se em duas áreas de significativa importância epidemiológica para a leishmaniose no Brasil: o estado do Rio de Janeiro e a Amazônia Legal. Esta última compreende os nove estados da Região Norte, além de porções dos estados das regiões Centro-Oeste e Nordeste. A seleção desses territórios justifica-se tanto pela elevada incidência da doença quanto pela ocorrência de intensas transformações ambientais recentes, notadamente o desmatamento e a expansão urbana. Esses dois recortes territoriais representam contextos socioambientais distintos, refletindo diferentes padrões de risco ecológico e graus de vulnerabilidade populacional à transmissão das leishmanioses.

Estratégia metodológica por abordagem— Modelo conceitual de vulnerabilidade

A primeira abordagem consistiu na formulação de um modelo conceitual de vulnerabilidade socioambiental aos efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde, estruturado a partir de três dimensões principais: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, conforme as diretrizes do IPCC (2014) e da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018). Essa estrutura foi amplamente adotada por estudos nacionais sobre vulnerabilidade em saúde, como os de Menezes et al. (2018, 2021) e Vommaro et al. (2020), permitindo a construção de índices compostos em escala municipal. Maiores detalhes podem ser achados no Relatório do Ano 8 do projeto, disponível no web do IMCT MC2: <https://inctmc2.cemaden.gov.br/>

A seleção dos indicadores foi fundamentada na literatura científica e na disponibilidade de dados secundários agregados, com base em fontes públicas como o IBGE, o DATASUS e o INMET. Os indicadores contemplam variáveis climáticas (como frequência de extremos térmicos e precipitação), aspectos demográficos (como densidade populacional), e socioeconômicos (como cobertura de saneamento, nível de escolaridade, pobreza e acesso à saúde). Após normalização e padronização, os indicadores foram integrados por meio de métodos de agregação linear ponderada. A análise espacial foi realizada com o apoio de sistemas de informação geográfica (SIG), permitindo a geração de mapas temáticos e a comparação entre diferentes municípios, conforme procedimentos similares aos descritos por Santos et al. (2023) e aplicados anteriormente em estudos na Amazônia Legal e no Semiárido brasileiro.

Abordagem Retrospectiva – Estudo epidemiológico retrospectivo geofísico-climático

Esta abordagem teve como objetivo principal investigar potenciais associações entre variáveis geofísicas e a mortalidade por causas específicas nas regiões Sul e Nordeste do Brasil. Para tal, foram analisados dados mensais padronizados de mortalidade por população, extraídos do Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM/DATASUS), organizados por Unidade da Federação e categorizados por causa, conforme a Classificação Internacional de Doenças (CID-10).

As causas analisadas incluíram: infarto agudo do miocárdio (IAM), pneumonia, acidente vascular cerebral (AVC), Alzheimer, Parkinson, lúpus, esclerose múltipla e causas externas (acidentes, suicídios e homicídios). O período de análise compreendeu os anos de 1996 a 2020, englobando os Ciclos Solares 23 e 24. A taxa de mortalidade específica para cada ano e região (T) foi calculada conforme a Equação 1 (Eq.1):

$$T = \frac{D}{P} \times 100,000 \quad \text{Eq.1}$$

Onde, (D) representa o número absoluto de óbitos por mês/ano na região e (P) a população total do estado no mesmo período. Essa padronização permite ajustar as taxas de mortalidade, levando em consideração variações demográficas ao longo do tempo, como recomendado em estudos epidemiológicos (FERREIRA et al., 2020; DATASUS, 2024).

Índices solares e geomagnéticos clássicos

A primeira etapa da abordagem concentrou-se na avaliação da influência de variáveis solares e geomagnéticas sobre as taxas de mortalidade. Foram considerados o número de manchas solares (SN) (SILSO, 2025), o fluxo solar F10.7 (NOAA, 2025a), os índices geomagnéticos Ap e Kp (NOAA, 2025b), e os distúrbios súbitos da ionosfera (SID) (NOAA, 2025c). O SN reflete a atividade solar baseada na contagem de manchas solares, enquanto o F10.7 mede a radiação solar em um comprimento de onda específico, funcionando como um proxy da atividade solar. Os índices Ap e Kp quantificam a intensidade das tempestades geomagnéticas em escalas lineares e logarítmicas, respectivamente, e os SIDs representam perturbações temporárias na ionosfera causadas por erupções solares.

Para avaliar a associação entre esses índices e as taxas de mortalidade, foram aplicadas análises estatísticas, incluindo o coeficiente de correlação de Pearson (LIMA, 2014) e regressões lineares simples (MARTINS, 2019), visando identificar tendências temporais. Além disso, a Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para decompor os dados em componentes principais, facilitando a identificação de padrões sazonais e espaciais (GOMES, 2024). A PCA foi aplicada separadamente para os meses de verão (JFM) e inverno (JJA), considerando as variações sazonais na influência das variáveis geofísicas. Essa abordagem permitiu identificar padrões regionais e sazonais de vulnerabilidade associados às flutuações solares e geomagnéticas.

Abordagem Prospectiva – Modelagem de nichos ecológicos para a leishmaniose

Foram aplicadas técnicas de modelagem de nichos ecológicos para avaliar a distribuição potencial de vetores da leishmaniose visceral americana (LVA) e tegumentar americana (LTA) em diferentes cenários ambientais. Os algoritmos utilizados incluíram regressão logística e máquinas de vetores de suporte (SVM), implementados no ambiente R. A modelagem considerou variáveis climáticas e ambientais como temperatura, precipitação, umidade relativa, cobertura vegetal, uso do solo e desmatamento. A validação dos modelos foi feita por meio da área sob a curva ROC (AUC) e os resultados foram representados por mapas de risco classificados por quintis, elaborados no software QGIS. Os vetores analisados foram *Lutzomyia longipalpis* e *Migonyia migonei* (estado do Rio de Janeiro) e *Nyssomyia whitmani* (Amazônia Legal), considerando registros entre 2003 e 2018. Essa abordagem permitiu

antecipar zonas de risco biológico e fornecer subsídios à vigilância entomológica e ao planejamento em saúde ambiental.

Avaliação da vulnerabilidade socioambiental à saúde

Com base em uma abordagem integrada e participativa, a Abordagem Conceitual da componente de saúde do INCT Mudanças Climáticas Fase 2 desenvolveu estudos aplicados em diferentes estados brasileiros e na região semiárida, com o objetivo de identificar padrões territoriais de vulnerabilidade da população frente aos impactos das mudanças climáticas. De maneira geral, a análise integrada dos estudos estaduais evidenciou padrões territoriais distintos de vulnerabilidade à mudança do clima, refletindo desigualdades históricas e estruturais entre regiões. Em comum, os estudos apontaram que a vulnerabilidade climática e em saúde não é distribuída de forma aleatória, mas concentrada em municípios com baixos níveis de desenvolvimento socioeconômico, infraestrutura precária, serviços públicos fragilizados e exposição acentuada a riscos ambientais. A metodologia baseada na tríade exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa permitiu identificar os principais fatores que compõem o perfil de vulnerabilidade em cada contexto, enquanto abordagens complementares, como a análise fatorial na região semiárida, aprofundaram a compreensão das interações entre determinantes sociais, ambientais e de saúde.

No Amazonas, a vulnerabilidade foi marcada por alta exposição nas regiões Nordeste e Sul, em decorrência do desmatamento e da frequência de desastres naturais. Além disso, a baixa capacidade adaptativa nos serviços de saúde e educação agrava a situação, intensificando os riscos em áreas já suscetíveis. No Maranhão, as regiões Central e Noroeste apresentaram maior vulnerabilidade, especialmente em municípios com altos índices de pobreza, baixa cobertura de atenção básica à saúde e elevada incidência de doenças relacionadas ao clima.

No Mato Grosso do Sul, a vulnerabilidade concentrou-se nas regiões Centro-Norte e Centro-Oeste, com projeções de agravamento para cenários climáticos futuros. Municípios com deficiências estruturais e baixa organização sociopolítica destacaram-se como os mais suscetíveis. No Espírito Santo, menos de 10% dos municípios apresentaram baixa vulnerabilidade, com concentração nas microrregiões Noroeste e Centro-Oeste. Nesses locais, a combinação entre alta exposição ambiental e sensibilidade social contrasta com a capacidade adaptativa desigual entre os municípios.

No Paraná, a exposição climática foi mais intensa nas regiões Norte e Noroeste, enquanto os menores níveis de vulnerabilidade foram observados em áreas com alta cobertura vegetal e capacidade institucional fortalecida, como Quatro Barras e Matinhos. Em Pernambuco, os maiores índices de vulnerabilidade foram identificados tanto em áreas densamente povoadas, como Recife, quanto em municípios do Sertão, onde a projeção de aumento da temperatura e escassez hídrica agrava as fragilidades estruturais e institucionais já existentes.

Na região semiárida, foi desenvolvido um Índice de Vulnerabilidade em Saúde (IVS) específico para contextos de seca, composto por 32 indicadores organizados em quatro fatores principais: saúde e seus determinantes sociais, economia rural e acesso à água, problemas de saúde e infraestrutura, e estrutura rural e capital social. Esse índice permitiu a identificação de áreas prioritárias para intervenções, destacando as vulnerabilidades estruturais que intensificam os impactos das secas sobre a saúde da população.

Os resultados evidenciaram uma concentração espacial da vulnerabilidade nas regiões oeste, leste e nordeste do semiárido. Nesses locais, os municípios foram caracterizados por baixos níveis de renda e escolaridade, acesso precário à água encanada e sistemas de irrigação, alta dependência da agricultura de subsistência e fragilidade nos serviços de saúde. A análise indicou que a vulnerabilidade à seca está menos associada à exposição direta ao fenômeno e mais às condições estruturais que limitam a adaptação e agravam os efeitos sobre a saúde pública.

Abordagem Retrospectiva - Impactos da variabilidade geomagnética sobre a mortalidade

A segunda abordagem deste estudo teve como foco explorar as possíveis associações entre variabilidade geomagnética e mortalidade por causas específicas no Brasil, com base em dados das regiões Sul e Nordeste, selecionadas por suas características geofísicas contrastantes. A área de estudo ilustra os estados incluídos na análise e a localização das estações magnéticas de São Martinho da Serra (RS) e São Luís (MA), fontes principais dos dados geomagnéticos utilizados. A seguir, são apresentados os principais achados de cada etapa.

Índices solares e geomagnéticos clássicos

A análise das taxas de mortalidade por diferentes doenças revelou padrões distintos de variação associados às flutuações geofísicas e sazonais nas regiões Sul e Nordeste do Brasil. As doenças analisadas incluíram Infarto Agudo do Miocárdio (IAM), Pneumonia, Acidente Vascular Cerebral (AVC), Alzheimer, Parkinson, Lúpus, Esclerose Múltipla e Causas Externas (acidentes, suicídios e homicídios).

De forma geral, o IAM, a pneumonia e o AVC apresentaram as maiores taxas de mortalidade, com destaque para o IAM, que exibiu um padrão sazonal marcante, fortemente associado às variações dos índices Ap e SID. Em ambos os períodos analisados (verão e inverno), a mortalidade por IAM foi mais acentuada nas regiões Nordeste e Sul, com variações sazonais específicas que serão detalhadas a seguir.

Múltipla e o Lúpus apresentaram as menores taxas de mortalidade, com maior variabilidade em estados do Nordeste, onde os eventos extremos de mortalidade se concentraram em períodos de elevada atividade geomagnética (índice Ap). Por outro lado, as Causas Externas (acidentes, suicídios e homicídios) apresentaram uma variação menos evidente em termos sazonais, mas mantiveram um padrão constante ao longo dos anos, com destaque para Pernambuco e Bahia no Nordeste e Rio Grande do Sul no Sul.

A análise de Componentes Principais (PCA) permitiu a identificação dos principais fatores responsáveis pela variabilidade nas taxas de mortalidade. A PCA foi aplicada separadamente para os meses de verão (janeiro-fevereiro-março, JFM) e inverno (junho-julho-agosto, JJA), capturando padrões sazonais diferenciados entre as regiões Sul e Nordeste.

No verão, o índice Ap emergiu como a variável geofísica mais influente, associando-se fortemente ao primeiro componente principal. Esse componente explicou a maior parte da variabilidade nas taxas de IAM em estados como Bahia e Sergipe, evidenciando um padrão sazonal em que o Nordeste apresentou um aumento nas taxas de IAM, enquanto a região Sul registrou uma redução.

No inverno, o índice SID foi o principal determinante no segundo componente da PCA, mostrando uma correlação inversa com a mortalidade por IAM no Nordeste e uma correlação positiva no Sul. Esse padrão sazonal diferenciou-se claramente entre as duas regiões, sugerindo uma interação complexa entre a atividade geomagnética e os eventos de mortalidade cardiovascular.

Os resultados reforçam a importância da análise regionalizada dos dados e da consideração das características sazonais ao investigar as interações entre variáveis geofísicas e mortalidade por causas específicas no Brasil.

Abordagem Prospectiva - Risco ecológico para a leishmaniose em cenários de mudanças ambientais

As leishmanioses constituem um relevante problema de saúde pública em escala global, com maior endemicidade em regiões tropicais e subtropicais. Conforme destacado por Brasil (2022), essas protozoonoses de etiologia parasitária, transmitidas por flebotomíneos infectados, manifestam-se nas principais formas clínicas: leishmaniose visceral (LV), considerada a forma mais grave devido à sua elevada letalidade, leishmaniose cutânea e leishmaniose mucocutânea.

Dados epidemológicos demonstram que cerca de 90% dos casos mundiais de leishmaniose tegumentar (cutânea e mucocutânea), dentre os quais três estão localizados na América Latina: Brasil, Colômbia e

Peru. No contexto da LV, quatro países – Brasil, Etiópia, Quênia e Sudão – respondem por aproximadamente 60% dos casos registrados. Especificamente na América Latina, entre 2001 e 2023, foram notificados 1.105.545 casos de Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA), com uma média anual de 55.645 casos, sendo o Brasil responsável por 42%. No mesmo período, a Leishmaniose Visceral Americana (LVA) registrou 73.092 casos, dos quais 96% ocorreram em território brasileiro (OPAS, 2024).

O agente etiológico pertence ao gênero *Leishmania* (família Trypanosomatidae), apresentando um ciclo de vida que envolve hospedeiros vertebrados e vetores flebotomíneos (Pimenta et al., 2018). Os vetores, por sua vez, estão classificados na família Psychodidae, subfamília Phlebotominae, com cerca de 1.000 espécies descritas mundialmente, das quais aproximadamente 10% estão implicadas na transmissão de patógenos (Brazil & Brazil, 2018). No Brasil, Aguiar & Vieira (2018) documentaram a ocorrência de 280 espécies, com distribuição heterogênea entre as diferentes regiões biogeográficas, dentre algumas das principais espécies vetoradas associadas a LTA incluem *Nyssomyia whitmani*, *Nyssomyia intermedia*, *Nyssomyia neivai*, *Bichromomyia flaviscutellata* e *Migonemyia migonei* – esta última também confirmada como vetor de LVA (Guimarães et al., 2016; Carvalho et al., 2010), além de *Lutzomyia longipalpis*.

As mudanças climáticas têm sido apontadas como um fator crítico na expansão geográfica das leishmanioses. Giorgi & Torres (2022) destacam o aumento acelerado das temperaturas médias na América do Sul, enquanto Zilli et al. (2017) observaram alterações significativas nos regimes de precipitação no sudeste brasileiro, com potenciais implicações na ecologia e distribuição dos vetores. Essas mudanças ambientais, associadas a desmatamentos e alterações antrópicas, influenciam diretamente os cenários epidemiológicos, uma vez que afetam a dinâmica dos vetores, dos agentes etiológicos e dos reservatórios animais envolvidos no ciclo de transmissão.

O impacto socioeconômico das leishmanioses é considerável, refletindo-se tanto nos custos hospitalares quanto na perda de produtividade. Dados do Ministério da Saúde brasileiro indicam que, entre 2016 e 2018, os gastos com o tratamento, somente de LVA, ultrapassaram R\$ 2,7 milhões, associados a uma taxa de letalidade de 11% (Comunicação pessoal, Grupo Técnico das Leishmanioses, 2018). Adicionalmente, a ausência de vacinas eficazes e as limitações das estratégias de controle vigentes agravam a complexidade do cenário epidemiológico.

Diante desse contexto, torna-se importante para a saúde pública, o desenvolvimento de estratégias multidisciplinares que integrem os determinantes ambientais e sociais da transmissão, articulando a vigilância em saúde com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Brasil, 2018; ONU, 2015). Desta forma, as mudanças climáticas têm ampliado o número de indivíduos em situação de vulnerabilidade social, reforçando a necessidade de intervenções intersetoriais que considerem as desigualdades socioeconômicas como fatores determinantes na incidência das leishmanioses.

Diante deste cenário nossos objetivos foram: analisar a distribuição espacial e temporal dos vetores e casos de LTA e LVA, e ainda sua associação com cenários futuros de mudanças climáticas. Somado a análise de variáveis de uso e cobertura do solo, áreas desmatadas e vulnerabilidade municipal, para a transmissão das leishmanioses.

Distribuição e projeções de vetores de leishmanioses na América do Sul

A espécie *Bi. flaviscutellata*, vetor de *Leishmania amazonensis*, apresenta atualmente uma ampla distribuição geográfica no território nacional, com registros confirmados em biomas como a Amazônia, o Cerrado e a Mata Atlântica, observa-se ainda sua presença com os países que fazem fronteira com a região norte do país. Projeções de modelos climáticos para o ano de 2050 indicam uma expansão significativa de sua área de adequabilidade ambiental, com destaque para as regiões Sudeste e porções ocidentais da Amazônia, bem como nas regiões mais ao sul do país e áreas centrais da América do Sul (Rangel et al, 2014).

No caso de *Ny. intermedia* e *Ny. neivai*, vetores de *Leishmania braziliensis*, a distribuição está associada a áreas de Mata Atlântica, com alguns registros no bioma Cerrado, Argentina e Paraguai Os modelos de nicho ecológico, para *Ny. intermedia* sugerem uma redução em sua

área de adequabilidade climática, acompanhada por um possível deslocamento em direção ao nordeste de sua distribuição atual.

Em relação a *Ny. neivai* há um aumento na área favorável, com tendência de expansão em direção à região sul do país, bem como no Uruguai e Argentina. A análise combinada dos cenários de distribuição para ambas as espécies revela que a atual zona de simpatria (abrangendo o interior dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul) pode sofrer redução significativa sob os efeitos das mudanças climáticas e uma extensão para áreas mais ao sul do país (Mcintyre et al, 2017).

Distribuição e projeções futuras dos principais vetores das leishmanioses no Brasil

Nyssomyia whitmani, principal vetor de LTA no Brasil, está envolvido na transmissão de diversas espécies de *Leishmania* dermatrópicas e atualmente apresenta distribuição em todos os biomas brasileiros (Figura 12a) (Rangel et al, 2014). Projeções para 2050 indicam aumento na área de adequabilidade climática para esta espécie, particularmente nas porções norte e sul de sua distribuição atual, além de possível expansão para o interior da Amazônia (Costa et al, 2018).

Lutzomyia longipalpis, vetor da LVA, demonstra potencial expansão para região sul do Brasil, onde condições climáticas mais favoráveis à sua ocorrência são previstas para meados do século XXI, conforme os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 de mudanças climáticas.

Distribuição dos principais vetores das leishmanioses em associação ao desmatamento no Brasil

A distribuição de *Ny. whitmani*, foi analisada em relação às áreas de desmatamento na Amazônia Legal. Dos 775 municípios que compõem essa região, a presença de *Ny. whitmani* foi registrada em 216, os quais também apresentaram casos humanos de LTA. Observou-se uma sobreposição espacial entre a ocorrência de casos humanos de LTA, a presença do vetor e áreas desmatadas nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia, Acre e Maranhão. Contudo, embora os estados do Amazonas e Roraima possuam extensas áreas de desmatamento, não foi identificada uma correlação significativa entre casos humanos e a ocorrência do vetor, fato atribuído principalmente à baixa frequência de *Ny. whitmani* nessas localidades (Costa et al, 2024).

No período de 2004 a 2015, as regiões central e norte do estado (Araguaína, Palmas, Porto Nacional, Paraíso do Tocantins), apresentaram maior número de casos humanos, com municípios classificados como áreas de transmissão intensa, e ainda maior incremento de desflorestamento, ao longo dos anos.(Afonso et al, 2017).

Expansão da Leishmaniose Visceral Americana no Sudeste Brasileiro: Impacto das Mudanças Climáticas, Urbanização e Vulnerabilidade Municipal

Este estudo analisou a distribuição espacial dos vetores *Lu. longipalpis* e *Mg. migonei*, a ocorrência de casos humanos de LVA, o uso do solo e a vulnerabilidade municipal nos estados de São Paulo, Espírito Santo e Rio de Janeiro, visando subsidiar políticas públicas preventivas.

Em relação a Minas Gerais, dos 853 municípios, apenas 99 registraram a presença de vetores: *Lu. longipalpis* foi registrada em 33, *Mg. migonei* em 37, e ambas as espécies em 29.

A análise do uso e cobertura do solo revelou que a região Metropolitana de Belo Horizonte, com sua maior concentração de áreas urbanizadas, é a única área onde ambas as espécies coexistem. Em contraste, *Lu. longipalpis* mostrou maior associação com áreas antropizadas (Vieira et al, 2024).

A classificação epidemiológica destacou que as regiões Norte, Nordeste, Jequitinhonha, Central Mineira e Metropolitana de Belo Horizonte concentram municípios com transmissão, enquanto os demais foram classificados como vulneráveis (receptivos ou não receptivos) (Vieira, et al, 2024).

A modelagem de nicho ecológico, utilizando variáveis climáticas e ambientais, demonstrou alta precisão preditiva (AUC-ROC = 0,85 para *Lu. longipalpis*; 0,88 para *Mg. migonei* no primeiro modelo). O segundo modelo, incorporando variáveis ambientais adicionais, alcançou AUC-ROC de 0,94, confirmando sua confiabilidade. As áreas de maior adequabilidade para *Lu. longipalpis* concentram-se no centro-norte do estado, enquanto *Mg. migonei* predomina no sudeste. Do total de municípios, 574 (67,29%) apresentaram aptidão alta/média para *Lu. longipalpis*, e 468 (54,87%) para *Mg. migonei*, com sobreposição em 383 municípios (44,90%) (Vieira, et al, 2024).

Analisando os vetores de LVA no estado do Rio de Janeiro, foram obtidos 42 registros para *Lu. longipalpis* e 88 de *Mg. migonei*, em 19 e 31 municípios, respectivamente. Prevê-se que ambos os vetores ocorram em simpatria na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, baixada litorânea do litoral verde e sul da região Norte. *Migonemyia migonei* ocorre adicionalmente no Médio Paraíba, Centro-Sul, Noroeste e Litoral Verde Sul.

Nos últimos três anos (2021-2023), 13% dos municípios registraram transmissão humana, 36% com LV canina; 52% eram vulneráveis, 29% dos quais eram receptivos (com vetores); tendo apenas 37% municípios com vetores. Recentemente, foi observado aumento da transmissão na cidade do Rio de Janeiro, em 2023 foram registrados 8 casos e em 2024, 4 casos com 1 óbito de LVA humana na cidade.

Considerações Finais

As considerações finais deste capítulo sintetizam os principais achados a partir das três abordagens metodológicas desenvolvidas no contexto da Componente Saúde do INCT-MC2. Cada abordagem contribuiu de forma distinta para o entendimento das interações entre variáveis climáticas, geofísicas e epidemiológicas no Brasil.

A primeira abordagem, centrada no desenvolvimento de um modelo conceitual de vulnerabilidade socioambiental, revelou a importância de integrar indicadores socioeconômicos, climáticos e de infraestrutura para mapear áreas prioritárias para intervenções preventivas. Os resultados demonstraram que a vulnerabilidade em saúde não está distribuída de forma aleatória, mas concentrada em regiões de maior pobreza, dependência da agricultura de subsistência e baixa capacidade adaptativa, como o Semiárido, a Amazônia e o Maranhão.

A segunda abordagem, de caráter retrospectivo, focou na análise da variabilidade geomagnética e suas associações com a mortalidade por causas específicas. Os resultados destacaram padrões sazonais diferenciados entre as regiões Sul e Nordeste, com maior impacto dos índices Ap e SID sobre as taxas de IAM e AVC. A Análise de Componentes Principais (PCA) evidenciou que, no verão, o índice Ap foi o principal determinante na variabilidade das taxas de IAM no Nordeste, enquanto no inverno, o índice SID mostrou correlações significativas no Sul.

A terceira abordagem, de caráter prospectivo, utilizou modelagem de nichos ecológicos para avaliar a distribuição potencial dos vetores de leishmaniose em cenários futuros de mudanças climáticas. Os resultados indicaram a expansão da área de adequabilidade climática para *Nyssomyia whitmani* e *Lutzomyia longipalpis*, especialmente em regiões previamente não endêmicas, como o sul do Brasil e áreas fronteiriças na Amazônia. Esses achados destacam a necessidade de monitoramento contínuo e de estratégias preventivas para mitigar os riscos epidemiológicos em um cenário de intensificação das mudanças ambientais.

De forma integrada, as três abordagens evidenciam a importância de incorporar variáveis climáticas e geofísicas nas análises epidemiológicas em saúde pública. A articulação entre dados ambientais, indicadores de saúde e modelagem preditiva oferece um caminho promissor para o desenvolvimento de políticas adaptativas, capazes de mitigar os impactos das mudanças ambientais sobre populações vulneráveis no Brasil.

4.3 Segurança energética

Introdução

As mudanças climáticas globais, impulsionadas principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa associadas à queima de combustíveis fósseis, têm evidenciado a profunda interdependência entre o sistema climático e o setor energético (IPCC, 2023). Se por um lado o setor de energia é um dos setores responsáveis pelas emissões desses gases (IRENA, 2023), por outro é também um dos mais vulneráveis aos impactos do aquecimento global, como o aumento da frequência de períodos prolongados de seca, com consequentes alterações na disponibilidade hídrica (Marengo et al., 2023; Llopart et al., 2020); mudanças nos padrões de vento (Pes et al., 2017) e na incidência de radiação solar na superfície (Lima et al., 2024, Zuluaga et al., 2022); além do aumento na frequência de eventos extremos que afetam diretamente a infraestrutura energética (IPCC, 2022).

Assim como a geração hidrelétrica, todas essas fontes estão intrinsecamente ligadas ao clima e às condições meteorológicas vigentes durante o processo de conversão, como o fluxo de radiação solar incidente na superfície e a velocidade dos ventos. Esses fatores podem variar em escalas temporais que vão de poucos minutos (intra-horária) até sazonais e interanuais, e em escalas espaciais que vão do local ao regional. Por isso, ferramentas que auxiliem na previsão dessas variações e no planejamento do uso combinado das fontes renováveis tornam-se cada vez mais relevantes (IEA, 2021).

Além da variabilidade natural do clima, os efeitos das mudanças climáticas impõem desafios adicionais ao planejamento, à operação e à resiliência dos sistemas energéticos (IPCC, 2022). Compreender essas dinâmicas é essencial para garantir uma transição energética segura, eficiente e adaptada às novas condições climáticas. Os estudos desenvolvidos na componente *Segurança Energética* do INCT-Mudanças Climáticas – Fase II buscaram justamente entender como as variações e tendências climáticas podem afetar a produção, a distribuição e o consumo de energia.

Este capítulo foi motivado pela necessidade de disseminar o conhecimento, as inovações metodológicas e os produtos gerados ao longo do projeto, com o objetivo de promover uma melhor compreensão sobre a influência do clima nos recursos energéticos renováveis e fornecer suporte ao planejamento e à operação do setor energético nacional. A crescente urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e em adaptar os sistemas energéticos às novas condições climáticas torna esse tema especialmente relevante para pesquisadores, formuladores de políticas públicas e cidadãos interessados em um futuro energético mais sustentável.

os principais desafios científicos abordados, destacam-se:

- i. **Caracterização da variabilidade dos recursos solar e eólico** em diferentes escalas temporais (intra-horária, diária, sazonal e interanual) e espaciais (local, regional e nacional) associada à variabilidade climática;
- ii. **Identificação de regimes de complementaridade entre fontes renováveis**, com o objetivo de elaborar estratégias baseadas em combinações sinérgicas de fontes renováveis de energia de forma a reduzir a intermitência e aumentar a resiliência do sistema elétrico nacional;
- iii. **Desenvolvimento e aplicação de parametrização numérica para diagnóstico e prognóstico** dos recursos energéticos renováveis, com base em dados observacionais, sensoriamento remoto e modelos numéricos de previsão do tempo e do clima;
- iv. **Análise dos impactos das mudanças climáticas** sobre o potencial de geração solar e eólica no Brasil, utilizando projeções climáticas de longo prazo baseadas nos cenários do IPCC;
- v. **Modelagem de sistemas energéticos** incorporando variáveis climáticas e cenários de incerteza, para apoiar decisões estratégicas de expansão e operação do setor;
- vi. **Identificação de eventos extremos nos recursos solar e eólico** no território brasileiro com intuito de identificar a persistência de extremos elevados ou mínimos de recursos de fontes renováveis intermitentes que possam potencialmente aumentar a vulnerabilidade da matriz elétrica brasileira.

Essas questões foram abordadas de forma interdisciplinar, relacionando conhecimentos das ciências atmosféricas, climatologia, sensoriamento remoto, modelagem computacional e engenharia.

Ao reunir diferentes abordagens científicas e técnicas desenvolvidas no escopo do INCT-Mudanças Climáticas – Fase II, este capítulo busca oferecer uma visão abrangente sobre como o clima influencia o setor energético e como esse conhecimento pode ser utilizado para construir sistemas mais sustentáveis e preparados para o futuro

Evolução do setor energético brasileiro

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN 2024), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), a participação das fontes renováveis atingiu 49,1% da matriz energética em 2023, um crescimento em relação aos 39,7% registrados em 2014. A matriz elétrica brasileira, que representa a parcela da matriz energética dedicada à geração de eletricidade, também se destaca por sua elevada participação de fontes renováveis. Em 2023, mais de 89% da eletricidade gerada no país teve origem em fontes limpas, com destaque para a energia hidráulica, que ainda lidera, seguida pela biomassa e pela energia eólica conforme ilustra a Figura 1. O processo de diversificação de fontes de energia foi motivado, em parte, pela necessidade de reduzir a dependência da geração hidrelétrica, especialmente em função da maior frequência de eventos de escassez hídrica. A título de ilustração, a participação de renováveis na geração de eletricidade apresentou valores inferiores a 80% em anos com ocorrência de extremos de seca como em 2014-2015 e 2021 (EPE, 2024).

A energia eólica e a solar fotovoltaica, em particular, apresentaram crescimento rápido no Brasil ao longo da última década. A capacidade instalada de geração eólica ultrapassou 25 GW em 2024, enquanto a solar fotovoltaica já representa mais de 10% da capacidade instalada na matriz elétrica nacional, considerando tanto a geração centralizada quanto a distribuída. Esses avanços foram viabilizados por políticas públicas de incentivo, leilões de energia, redução de custos tecnológicos e maior atratividade para investimentos privados.

A evolução do setor energético brasileiro, portanto, reflete um movimento para adaptação às exigências ambientais e climáticas que se apresentam na atualidade, ao mesmo tempo em que busca garantir a segurança do suprimento energético. Essa trajetória de transição energética, embora ainda em curso, posiciona o Brasil como um dos países com maior participação de renováveis no mundo. As atividades de pesquisa desenvolvidas pela componente Segurança Energética acompanharam essa trajetória de evolução com objetivo de investigar as questões científicas relevantes e produzir bases de dados e produtos relevantes para suporte do setor energético nacional.

Diagnóstico e prognóstico de recursos de energia

A crescente participação da energia fotovoltaica (PV) na matriz elétrica global e brasileira exige ferramentas robustas de previsão de curto prazo, capazes de capturar flutuações rápidas na irradiância e na geração de potência. Em sistemas fortemente dependentes de fontes renováveis variáveis, como o Brasil, previsões confiáveis de curto horizonte (minutos a algumas horas adiante) são essenciais para otimizar a operação de usinas fotovoltaicas, operação de sistemas de transmissão e distribuição, programar carregamentos de armazenamento e viabilizar a integração com outras fontes, em especial hidrelétricas e eólicas. Em regiões tropicais como a Amazônia Central, a alta variabilidade da nebulosidade impõe desafios adicionais aos modelos de previsão, exigindo abordagens capazes de lidar com flutuações rápidas na cobertura de nuvens. Nesta seção descrevemos três abordagens complementares para previsão de curto prazo aplicadas à energia solar que foram objeto de pesquisas de mestrado e doutorado, contribuindo para a formação de jovens pesquisadores.

Avanços na previsão de curto-prazo

A primeira abordagem teve como foco a modelagem de movimento de campos de nuvens utilizando método de fluxo óptico para prognóstico de irradiância global horizontal incidente na superfície (GHI) em horizontes de curtíssimo prazo (da ordem de minutos adiante). A segunda

abordagem buscou o desenvolvimento de modelagem estatística por aprendizado de máquina profundo para previsão direta de geração PV no horizonte de até algumas horas à frente.

A premissa assumida na primeira abordagem baseia-se no fato que a GHI pode apresentar variações rápidas em resposta à passagem de nuvens em escalas de alguns minutos a dezenas de minutos. Métodos de previsão estatística puramente baseados em séries temporais de dados solarimétricos observados em estação de superfície (persistência de GHI ou de índice de claridade) apresentam limitações quando as condições de céu se alteram abruptamente. Por outro lado, imagens de alta resolução espacial (da ordem de 1 km) e temporal (10 a 15 minutos) observadas por satélites meteorológicos — como as fornecidas pelo satélite geoestacionário GOES-16 — fornecem informações diretas sobre a dinâmica de nuvens possibilitando estima a atenuação da irradiância solar na superfície com base em estimativa da nebulosidade futura. Com base nessas características, a técnica de fluxo ótico (optical flow) aplicada a imagens sequenciais observadas pelo GOES-16 permite estimar vetores de deslocamento de nuvens (CMVs).

A segunda abordagem buscou prever diretamente a energia gerada por uma usina fotovoltaica em operação para horizontes de 1 hora até 3 horas à frente, fazendo uso de métodos de aprendizado profundo e de transferência de aprendizado. A geração PV não depende apenas da irradiância instantânea, mas de uma combinação de fatores meteorológicos (irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos, presença de rastreamento solar na usina; temperatura ambiente e das células fotovoltaicas, geometria Sol-Usina) e fatores sistêmicos (características do módulo, construção de string). Em horizontes de 1–3 horas, a inércia térmica do modulador e a dinâmica da atmosfera permitem que modelos baseados em séries temporais autorregressivas ou redes neurais recorrentes (“deep learning”) superem técnicas de persistência. O estudo comparou algumas arquiteturas de aprendizado de máquina como a rede LSTM, Encoder-Decoder LSTM alimentadas por conjuntos diferentes de preditores selecionados por análise de correlação e confiança mútua.

Ainda neste contexto, uma terceira abordagem está sendo investigada como tema de pesquisa de Doutorado, combinando observações em superfície de piranômetros e câmeras all-sky com técnicas de aprendizado de máquina. Esta abordagem tem se mostrado promissora e está baseada em ensemble de redes neurais evoluídas via algoritmos genéticos, utilizando como entradas séries temporais de irradiância global horizontal (GHI) e fração de cobertura de nuvens (CF).

A metodologia faz uso de dados coletados durante o experimento GoAmazon com medições simultâneas de GHI e imagens hemisféricas do céu processadas para extração da CF. A partir dessas séries, foram construídos vetores de entrada contendo defasagens de múltiplos horizontes, especialmente focando o histórico recente e as condições de 24 horas antes, com os dados reamostrados para a frequência de 2 minutos. Esses dados passaram por uma seleção usando o algoritmo ApproxHull, que identifica os conjuntos de dados de treinamento, teste e validação para estabelecer Redes Neurais com Função de Base Radial (RBF) através do Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA), buscando equilíbrio entre erro médio quadrático e diversidade. A previsão foi realizada para um horizonte de 60 minutos à frente, em passos de 2 minutos, com a mediana dos melhores modelos.

Os resultados mostram que o ensemble proposto supera significativamente modelos de persistência, mesmo em condições de céu parcialmente nublado, onde a variabilidade da irradiância é mais acentuada. Os índices estatísticos demonstram um bom desempenho quando comparados com outros modelos da literatura, mas utilizando menos informações para modelagem. Essas avaliações também demonstraram um bom desempenho na detecção desses eventos de sobreirradiância, caracterizada pela ocorrência em intervalos de curta duração de valores de irradiância superiores ao típico observado em céu sem nuvens, causados por reflexão em bordas de nuvens ou efeito lente produzido por cirrus (nuvens altas).

Estudos futuros devem ser realizados para a integração das três abordagens de previsão de curto prazo descritas nesta seção possibilitando um avanço significativo para aplicações de previsão de geração de fontes renováveis intermitentes no país. Em um contexto de variabilidade climática crescente e penetração acelerada de PV em micro-geração distribuída, o sistema híbrido de previsão pode reduzir desvios de carga em plantas fotovoltaicas isoladas, diminuir

custos operacionais de sistemas com armazenamento e promover uma melhor coordenação hidrelétrico-PV-eólico no SIN (Sistema Interligado Nacional).

Avanços na modelagem de transferência radiativa do modelo BRASIL-SR

O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR estima a irradiância solar descendente na superfície combinando observações de nuvens do satélite GOES com um esquema radiativo de dois fluxos. Este modelo vem sendo constantemente aprimorado ao longo das últimas duas décadas e é a base científica das duas edições do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017; Pereira et al., 2006). A segunda edição do Atlas abrangeu 17 anos de imagens de satélite e tem sido adotado como referência em estudos de planejamento no setor elétrico brasileiro (EPE, 2021 a, b). Ao longo da vigência do INCT-Mudanças Climáticas FASE II, diversas questões científicas foram investigadas para o aprimoramento da modelagem numérica e parametrizações adotadas no modelo visando a publicação de uma base de dados ampliada com 25 anos de dados satelitais.

Destacamos aqui dois estudos recentes. O primeiro estudo publicado por Siqueira e colaboradores (2025) investigou o desempenho do modelo em regiões tropicais no que concerne a influência dos procedimentos numéricos para determinação da cobertura de nuvens a partir do tratamento de imagens de satélite geostacionário. Uma estimativa imprecisa da cobertura de nuvens possui um impacto grande na confiabilidade das estimativas de irradiância solar, uma vez que é o principal fator modulador da irradiância solar na superfície terrestre e dado de entrada do modelo BRASIL-SR. Dados de irradiância solar global observadas em resolução de 1 min em sete estações de superfície que integram a rede SONDA distribuídas nas diferentes regiões brasileiras e imagens do satélite GOES-16 foram utilizadas no estudo. O estudo mostrou ainda que as imagens de satélite com resolução espacial menor que 3 km demandam correções de paralaxe para evitar aumento das incertezas nas estimativas da radiação solar incidente na superfície. Por outro lado, os autores não identificaram influência significativa da geometria Sol-Superfície-Satélite nas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para o território brasileiro. Todos os resultados do estudo foram implementados na versão atual que está em uso para o mapeamento do recurso solar no Brasil para os últimos 25 anos de imagens de satélite da série GOES-East.

A principal contribuição científica do estudo reside no desenvolvimento parametrizações que melhor representam a variabilidade espacial e temporal dos processos radiativos particulados derivados da queima de biomassa. Assim como os resultados do estudo de Siqueira et al. (2025), o avanço alcançado neste estudo está implementado na versão do modelo em uso no mapeamento do recurso de energia solar em andamento. A parametrização de aerossóis em uso no BRASIL-SR mostrou-se robusta com desempenho ligeiramente melhor (menores desvios) quando comparado com estimativas produzidas por modelos de transferência radiativa consolidados na literatura internacional como o REST2 e McClear.

Em condições de céu sem nuvens, a estimativa da irradiância solar na superfície do BRASIL-SR De modo geral, o INCT-Mudanças climáticas Fase II propiciou-se condições de capacitação de pesquisadores nacionais para avançar na modelagem física e estatística de transferência radiativa para diagnóstico e prognóstico da irradiância solar incidente na superfície. Os resultados alcançados foram significativos e no estado da arte desta linha de pesquisa na atualidade.

Complementaridade de recursos renováveis de energia

Como já discutido anteriormente, o fornecimento de energia elétrica no Brasil está cada vez mais dependente das condições climáticas, devido ao crescimento acelerado das fontes solar e eólica. Estudos de complementaridade entre fontes são uma das estratégias para lidar com esta intermitência, promovendo maior segurança energética e capacidade adaptativa aos cenários da mudança do clima. Complementaridade local pode ser explorada através da hibridização de usinas, combinando duas ou mais fontes de energia, como solar-eólica (WS) e solar-hidráulica

(HS). Além disso, o planejamento espacial permite explorar complementaridades entre diferentes regiões do país.

A sinergia entre a geração hidroelétrica e solar fotovoltaica também foi avaliada do ponto de vista microclimático, avaliando a brisa lacustre sobre reservatórios hidrelétricos tropicais e seu impacto sobre a nebulosidade. Por fim, um sistema híbrido eólico-solar é avaliado, onde investigou-se diferentes combinações entre usinas eólicas e solares para maior estabilidade e resiliência a extremos climáticos.

Sistemas hidráulico-fotovoltaicos

Eventos de estiagem prolongada são o exemplo mais emblemático de influência do clima na segurança energética – mas impactam também as seguranças hídrica e alimentar, visto que em muitas regiões, a mesma água é disputada para usos distintos. Regiões semiáridas, como o polígono das secas no Nordeste brasileiro, enfrentam desafios estruturais na gestão integrada de recursos hídricos e energéticos. A bacia do rio São Francisco (SFR), com 638 mil km², é uma das mais relevantes economicamente da região, concentrando grande parte da irrigação, geração hidrelétrica e abastecimento humano. No entanto, as secas prolongadas, como a ocorrida entre os anos de 2012–2018, afetaram severamente a segurança hídrica e a capacidade de geração de energia da usina hidrelétrica (UHE) Sobradinho, um dos maiores reservatórios do país.

As usinas hidrelétricas, que tradicionalmente equilibram múltiplos usos da água, tendem a priorizar a geração energética em detrimento do abastecimento hídrico, especialmente sob comando do Operador Nacional do Sistema (ONS). Nesse contexto, a proposta de adicionar energia solar fotovoltaica (especialmente ao considerar o uso da fotovoltaica flutuante – FFV) ao sistema hidrelétrico surge como alternativa promissora para mitigar os impactos da escassez e otimizar o uso da infraestrutura existente. Neste sentido, um dos estudos realizados visou avaliar, por meio de modelagem computacional, os efeitos da incorporação de energia solar flutuante ao reservatório de Sobradinho, simulando diferentes capacidades instaladas (50 a 1000 MW), com foco no aumento da segurança hídrica; na estabilização e diversificação da oferta energética; na redução de impactos ecológicos associados à baixa vazão; e na avaliação de trade-offs entre geração energética, perdas por evaporação e água não turbinada (spill) (Campos *et al.*, 2021).

O sistema foi modelado no software WEAP (*Water Evaluation and Planning*), que permitiu simular as interações entre oferta e demanda hídrica e energética. A modelagem abrangeu os cinco principais aproveitamentos hidrelétricos do São Francisco: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, o Complexo Paulo Afonso e Xingó. Foram simulados seis cenários de inserção de energia solar flutuante, considerando PV-50, PV-100, PV-250, PV-500, PV-750 e PV-1000 MW, onde cada cenário substitui parcialmente a geração hidrelétrica por solar, liberando volume útil de água no reservatório.

Dentre os principais resultados, verificou-se que a inserção de 250 MW de geração fotovoltaica flutuante foi o ponto de corte mínimo para evitar o esvaziamento do reservatório durante os anos mais secos, ficando este abaixo de 20% da capacidade em apenas 3 meses do ano de 2017; cenários PV-500 a PV-1000 mantiveram volumes superiores a 40% da capacidade. A maior segurança hídrica possibilitou manter vazões mínimas superiores a 800 m³/s, prevenindo intrusão salina e garantindo a operação de sistemas de captação de água.

Dentre os aspectos relacionados aos *trade-offs*, foi verificado que cenários com FFV entre 250 MWp e 750 MWp ofereceram o melhor equilíbrio entre ganho hídrico e energético. A manutenção das vazões mínimas evitaria a salinização do estuário, as perdas agrícolas por conta da irrigação inadequada e eventuais gastos públicos por conta de adaptações emergenciais de infraestrutura, como carros pipa, dentre outras (~US\$ 5,6 milhões em 2017). Estes resultados apoiam estratégias de mitigação de impactos climáticos, em especial ao considerar a governança integrada de bacias.

Portanto, a análise dos cenários simulados demonstra que a inserção de geração solar fotovoltaica flutuante no reservatório de Sobradinho não apenas contribui para a conservação de água, mas também oferece maior previsibilidade e estabilidade na oferta de energia elétrica durante períodos críticos. Estes resultados também reforçam a importância de se avaliar a segurança hídrica sob uma perspectiva integrada, no qual a água não deve ser gerida apenas como insumo para geração de energia, mas também como vetor de bem-estar social, equilíbrio ambiental e estabilidade econômica. Entretanto, também existem limitações técnicas, como perdas por evaporação em grandes volumes e energia não gerada por água vertida, especialmente em anos com maior precipitação. Tais desafios reforçam a necessidade de uma operação articulada entre os reservatórios em cascata, otimizando os usos múltiplos da água sob a ótica do planejamento energético nacional. Além disso, a inserção de FFV deve considerar limitações de infraestrutura de transmissão, disponibilidade de área útil no reservatório e implicações socioambientais locais.

Outro aspecto avaliado sobre os sistemas hidráulico-fotovoltaicos foi o impacto do reservatório sobre o microclima local. Brisas lacustres são conhecidas como fenômenos meteorológicos de mesoescala causados por gradientes de temperatura entre superfícies aquáticas e terrestres. Em grandes lagos e reservatórios, esse fenômeno pode causar aumento da frequência de céu claro devido à subsidência de ar seco sobre a água, inibindo a formação de nuvens sobre o lago e favorecendo sobre as bordas. Este mecanismo de circulação trata-se de um fenômeno ainda pouco estudado em reservatórios artificiais tropicais, especialmente no Brasil, onde a maioria das hidrelétricas possui grandes lagos artificiais que podem alterar significativamente o microclima local.

A análise Espacial da Nebulosidade mostra redução estatisticamente significativa da nebulosidade sobre a superfície do reservatório em comparação com áreas externas. A redução no índice de cobertura de nuvens entre o centro do lago e as áreas ao redor chega a ~5.7% no período da tarde (14h–16h). O padrão espacial observado é consistente com o esperado de uma brisa lacustre, com menor cobertura de nuvens centrada sobre o lago.

Para eliminar qualquer dúvida sobre a influência do reservatório neste padrão de nebulosidade, um recorte temporal comparando o padrão de nebulosidade antes (1984–1996) e depois (1997–2009) da construção do lago foi realizado a partir de imagens satelitais. Observou-se uma redução estatisticamente significativa da nebulosidade na área inundada durante as tardes após a construção do lago. As áreas externas ao reservatório não apresentaram mudanças importantes na vegetação, sugerindo que a redução na nebulosidade foi causada pelo lago e não por outros fatores climáticos regionais.

Com base nestas evidências, optou-se por investigar este fenômeno sobre outros grandes reservatórios no Brasil, e como essa característica pode ser aproveitada para a geração de energia solar fotovoltaica flutuante (FPV). A instalação de FPV em reservatórios oferece diversos benefícios:

- Não ocupa terras agrícolas ou urbanas;
- Apresenta maior eficiência dos painéis devido ao resfriamento proporcionado pela água e menor deposição de sujeira;
- Reduz a evaporação da água, benefício relevante especialmente em regiões secas;
- Aproveita a infraestrutura existente (subestações, linhas de transmissão, acessos).
- Maiores níveis de irradiação solar devido a brisa lacustre;

Estudos mostram que painéis solares flutuantes podem ter ganhos de eficiência de 8% a 12,5% e reduzir a evaporação em até 90%, dependendo do clima. Além disso, ao combinar geração solar com hidrelétrica, é possível mitigar a intermitência da energia solar, utilizando a flexibilidade da geração hidrelétrica para balancear o sistema.

Para avaliar os possíveis ganhos de irradiação no interior do lago, foram selecionados 11 dos maiores reservatórios hidrelétricos do Brasil, representando diferentes biomas e climas do país, como Amazônia, Cerrado, Semiárido, entre outros. Estes incluem Tucuruí, Balbina, Sobradinho, Serra da Mesa, Três Marias e Itaipu.

Imagens do satélite GOES-16 foram utilizadas para estimar a cobertura efetiva de nuvens (Ceff) para cada reservatório em três zonas distintas:

- Área interna: partes centrais, afastadas da margem;
- Área externa: faixa de terra entre 5 e 30 km da margem;
- Área total alagada: conjunto da superfície do lago.

A irradiância solar foi modelada com base na relação linear entre o índice de clareza do céu (K_t) e o Ceff, tomando como referência a transmitância de céu claro estimada com o modelo REST2v5 que usa dados atmosféricos da base MERRA-2 (NASA). Ao comparar as áreas internas e externas dos reservatórios, observou-se que há aumento médio anual da irradiância solar nas áreas internas em relação às externas em todos os reservatórios analisados. Os ganhos mensais variaram de acordo com o reservatório e a época do ano, tipicamente entre 1% e 5%, mas se mantiveram consistentes ao longo dos três anos analisados (2018–2020). As maiores diferenças de irradiância entre as áreas internas e externas ocorreram no período da tarde (14h–16h), o que reforça o potencial das áreas alagadas para instalação de FPV, visto que o desempenho fotovoltaico tende a ser mais afetado pela nebulosidade nesse horário. Uma análise paramétrica investigou quais fatores são mais importantes para determinar os ganhos de cada reservatório. A latitude e a área alagada são os fatores de maior relevância para a determinação dos incrementos de radiação. Tucuruí, na região amazônica, por exemplo, apresentou ganhos próximos de 5% enquanto Itaipu ficou próximo de 1%. A influência da latitude se explica em parte pelo impacto que esta possui na frequência de passagens de sistemas meteorológicos de grande escala como frentes frias, que se sobrepõe ao efeito microclimático do lago. Além disso, regiões tropicais possuem mais disponibilidade de umidade e calor para formação de convecção rasa, modulada essencialmente pelos fluxos de calor local, amplamente impactados pelo lago.

Sistemas eólico-fotovoltaicos

As energias eólica e fotovoltaica, embora sejam as protagonistas da transição energética, enfrentam críticas por sua volatilidade, ao não compor a energia firme do Sistema Interligado Nacional (SIN). No entanto, é plausível supor que a combinação destes dois recursos tende a reduzir sua variabilidade e por conseguinte o risco de déficit de potência caso a correlação temporal entre estes recursos seja negativa em alguma escala de interesse.

Para investigar esta hipótese, foram utilizados dados horários medidos de longo prazo (2004–2018) em duas localidades brasileiras: Petrolina (PE), no semiárido nordestino, e São Martinho da Serra (RS), no Sul do país. O objetivo foi entender como a combinação dessas fontes pode reduzir a variabilidade da geração elétrica em diferentes escalas de tempo (horária, diária e sazonal), além de testar diversas métricas para avaliar o desempenho de configurações híbridas.

Diversas métricas estatísticas foram empregadas para avaliar a complementaridade como a correlação de Pearson, desvio-padrão (SD), coeficiente de variação (Cvar) e indicadores de extremos como percentil 5 (P5) e eventos de geração muito baixa por mais de 7 horas (N7h). A hibridização foi testada com diferentes proporções de potência solar e eólica (fração solar SF de 0 a 1).

O estudo reforça que a hibridização solar-eólica melhora a estabilidade da geração, sendo vantajosa em todas as escalas analisadas, sendo que a fração solar ótima depende da métrica usada, da escala de tempo e da localidade. Em geral, frações solares de 0,3 a 0,4 são ideais para reduzir variabilidade horária e eventos extremos, enquanto frações de 0,8 a 0,9 garantem maior estabilidade intrasazonal. Trata-se de recomendações práticas para escolha de frações solares que maximizem estabilidade e reduzam riscos operacionais no país.

De maneira geral, os resultados apresentados nesta seção oferecem uma contribuição importante para o planejamento de usinas híbridas no Brasil. As limitações destas análises estão ligadas a possíveis restrições ambientais, viabilidade tecno-econômica e logística, e aspectos regulatórios, os quais foram tratados de maneira simplificada. O trabalho destaca a importância da complementaridade climática para otimizar a integração de fontes renováveis ao sistema elétrico

nacional, sugerindo que análises estatísticas tradicionais devem evoluir para abordagens que considerem a interdependência dos recursos. Como perspectivas futuras, ressalta-se a importância de estudos regionais para aprofundar a análise da complementaridade espacial entre fontes, ressaltando o papel crescente dos serviços climáticos para garantir a segurança e eficiência da matriz energética brasileira.

Impactos das mudanças climáticas nos recursos solar e eólico

A diversificação da matriz elétrica brasileira por meio do aumento da participação de fontes intermitentes de energia renovável (solar fotovoltaica e eólica) para atendimento da demanda crescente contribui para melhoria da segurança energética e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a disponibilidade desses recursos em condições climáticas futuras permanece incerta, especialmente devido aos resultados divergentes dos modelos climáticos globais (MCGs). As avaliações do impacto dos cenários futuros de clima sobre os recursos intermitentes de energia já publicados para o Brasil (Zuluaga et al, 2022) utilizaram previsões por conjuntos de modelos (ensemble) com diferentes habilidades na reprodução da irradiância solar observada, comprometendo a confiabilidade das projeções futuras. A componente Segurança Energética do INCT-MC Fase II desenvolveu estudos com a finalidade de reduzir essas incertezas aplicando uma abordagem criteriosa com base na habilidade dos modelos climáticos de representar a variabilidade espacial e sazonal dos recursos solar e eólico no território brasileiro (Lima et al. 2024; Lima et al. 2025).

Impactos das mudanças do clima na geração fotovoltaica

O estudo do impacto das mudanças do clima na disponibilidade de energia solar (Lima *et al.* 2024) fez uso de duas bases de dados distintas para estabelecer a climatologia de referência da irradiância solar incidente na superfície no território brasileiro: dados produzidos pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR que utiliza imagens de satélite para estimar a cobertura de nuvens e dados da reanálise meteorológica ERA5. Com base nessa climatológica de referência, foi realizada a avaliação da habilidade de 40 modelos climáticos globais (GCMs) disponibilizados na plataforma CMIP6 em representar a variabilidade espacial e sazonal em três regiões-chave do Brasil: Nordeste (semiárido, alta SSR), Sul (alta variabilidade sazonal) e Brasil Central (próximo a grandes centros de consumo). Os 10 modelos que apresentaram melhor desempenho estatístico na avaliação foram combinados em um conjunto de modelos denominado *Smart Model Ensemble* (SME). As estimativas do SME para as trajetórias SSP2-4.5 (cenário moderado de mudanças climáticas) e SSP5-8.5 (cenário pessimista com aumento elevado de temperatura no planeta) foram usadas para investigar projeções futuras de rendimento fotovoltaico em três períodos: futuro próximo que abrange de 2015 a 2040, meados do século que cobre o período de 2041 a 2070; e final do século que cobre de 2071 a 2100.

O conjunto *ensemble* SME reduziu significativamente a incerteza nas projeções da irradiância solar incidente na superfície apresentando uma variabilidade na ordem de 20% menor em comparação com o conjunto completo do modelo com os 40 modelos climáticos iniciais. As previsões do SME mostram que quase a totalidade do território brasileiro apresentará um aumento entre 2% e 8% na irradiância solar em superfície até 2100, particularmente no SSP5-8.5. O crescimento será mais proeminente durante a primavera, no entanto um aumento de 2 a 4% já é previsto para a estação seca (entre maio e setembro) alinhando-se com períodos de vulnerabilidade hidrelétrica, melhorando assim a resiliência geral do sistema. A exceção está na região Sul do Brasil, onde os resultados mostram uma redução de até 3% a 5%, especialmente na primavera e no outono, quando os sistemas hidrelétricos estão mais vulneráveis. As regiões Amazônica e central do Brasil apresentam os sinais positivos mais consistentes com crescimento de até +10% da irradiância solar incidente na superfície.

Para estimar a produtividade fotovoltaica, assumiu-se que a razão de desempenho (ou performance ratio, em inglês) não se altera no futuro de modo que a evolução tecnológica compensará a perda de eficiência de sistemas fotovoltaicos decorrente do aumento de temperatura ambiente. Assim, as previsões para os cenários de clima futuro indicam que a produtividade fotovoltaica deverá aumentar as regiões metropolitanas, como Brasília, Belo

Horizonte, Manaus com valores de até +0,7 kWh/kWp/ano para o regime climático previsto para a trajetória SSP5-8.5. Tendências de decréscimo pequenas em termos relativos (geralmente abaixo de 3%) estão previstas pelo *ensemble* para Fortaleza e Porto Alegre (até -0,36 e -0,49 kWh/kWp/ano, respectivamente). Regiões remotas não conectadas à rede elétrica do SIN (por exemplo, Boa Vista, Colniza) apresentaram fortes tendências positivas, reforçando a viabilidade de sistemas fotovoltaicos para substituir a geração a diesel.

O estudo demonstra que, ao selecionar cuidadosamente modelos climáticos de alto desempenho, é possível reduzir significativamente a incerteza nas projeções futuras de irradiância solar incidente na superfície. Os resultados oferecem evidências robustas de potenciais aumentos da irradiância solar na superfície na maior parte do Brasil, reforçando o papel da energia solar fotovoltaica como alternativa confiável para a matriz energética do país. Aumentos da irradiância solar durante períodos de estresse hidrelétrico fortalecem a resiliência da rede elétrica nacional. No entanto, declínios regionais — especialmente no sul e no litoral do Nordeste do Brasil — destacam a importância de portfólios diversificados de energia renovável e estratégias de adaptação personalizadas.

Impactos das mudanças do clima na geração eólica

O Brasil experimentou um rápido aumento na capacidade instalada de geração eólica nas últimas duas décadas (EPE, 2024), tornando-se um recurso crucial na matriz energética. No entanto, a disponibilidade futura de energia eólica é sensível à variabilidade climática, e os modelos climáticos globais (MCGs) frequentemente apresentam vieses substanciais em projeções em escala regional. Isso levanta desafios para o planejamento de longo prazo e investimentos em infraestrutura em energia eólica. Embora os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos eólicos tenham sido extensivamente estudados em diversas regiões do planeta (Stecher et al., 2024), avaliações abrangentes e metodologicamente robustas ainda não haviam avançado no Brasil. A componente de Segurança Energética investigou essa lacuna avaliando como cenários futuros de mudanças climáticas podem influenciar a densidade de energia eólica (DEE) no Brasil, utilizando metodologia bastante similar à apresentada para avaliação da produtividade fotovoltaica descrita anteriormente.

Assim, o estudo analisou dados de velocidade do vento de 24 modelos climáticos globais (MCGs) incluídos no CMIP6. Os modelos utilizados foram escolhidos inicialmente com base na disponibilidade de dados para o país e a resolução espacial de até 100 km para período histórico (1980-2014). O conjunto multimodelo inteligente (*ensemble* SME) foi definido com a identificação daqueles modelos climáticos, dentre os 24 utilizados, que melhor representaram os padrões espaciais e sazonais da velocidade de vento em áreas alvo de grande interesse para a geração eólica como o Nordeste e a região Sul do Brasil. A reanálise ERA5 foi adotada como climatologia de referência do regime de velocidade de vento para o período entre 1980 a 2014. O procedimento de seleção baseou-se em avaliação estatística rigorosa baseada em análises de correlação espacial, correlação sazonal, desvio quadrático médio (RMSD) e parâmetro de Taylor superior a 0,9. Assim como descrito para a irradiância solar, o *ensemble* SME reduziu as incertezas das previsões de velocidade de vento para o período histórico e, portanto, com habilidade para representar a climatologia eólica histórica do Brasil. Detalhamento maior das análises realizadas está apresentada no estudo publicado por Lima *et al.* (2025).

A DEE foi calculada para a altura típica do cubo dos aerogeradores recentes usando as velocidades do vento a 100 m acima da superfície determinadas usando com aplicação da relação de lei de potência calibrada para extrapolação vertical da velocidade a 10 m acima da superfície. O coeficiente de extrapolação foi estimado com base nas informações de velocidades de vento fornecidas pela reanálise do ERA5. As projeções futuras da DEE foram derivadas usando o método do Fator de Mudança Climática (FC), que aplica mudanças relativas nos resultados do modelo à climatologia de referência do ERA5. As tendências sazonais e regionais foram avaliadas para três períodos futuros: 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Os mapas de projeções de SME que indicam crescimento da DEE praticamente todo o Brasil, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, em ambos os cenários de emissão. No cenário pessimista (SSP5-8.5), os aumentos projetados excedem 30% em muitas áreas até o final do

século, particularmente em estações de transição (primavera e outono), que coincidem com períodos de baixa geração hidrelétrica, corroborando a complementaridade eólica-solar-hidrelétrica.

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora e estatisticamente rigorosa para avaliar os impactos das mudanças climáticas no potencial de energia eólica no Brasil. O uso de um Conjunto Multimodelo Inteligente (SME) aumenta significativamente a confiança nas projeções, minimizando a dispersão entre modelos e alinhando-se estreitamente com a climatologia observada. Em resumo, o estudo apontou que a DEE será impactada de forma positiva pelas mudanças climáticas, especialmente em cenários de alta emissão. As projeções do SME apontam crescimento do recurso eólico em áreas estratégicas como o Nordeste e Sul do país, juntamente com regiões offshore próximas de centros. Aumentos sazonais de DEE durante os meses de seca podem oferecer complementaridade valiosa com a energia hidrelétrica, melhorando a segurança energética de modo que as projeções apoiam o planejamento energético resiliente ao clima e sugerem priorizar o desenvolvimento de infraestrutura em regiões com os maiores ganhos esperados. Pesquisas futuras devem abordar eventos eólicos extremos, integração com recursos solares e hidrelétricos e estratégias de armazenamento híbrido para garantir uma transição energética diversificada e adaptável.

Estratégias de adaptação do sistema energético para as mudanças do clima

A energia hidrelétrica é a base da geração de eletricidade em muitos países do mundo, incluindo o Brasil. No entanto, a vulnerabilidade da matriz elétrica brasileira, concentrada na hidroeletricidade, cresceu em decorrência do estresse hídrico induzido por estações secas mais intensas e frequentes (Pokhrel et al, 2021). O risco associado a estes eventos impacta não apenas a segurança energética, mas também o desenvolvimento nacional e os compromissos climáticos assumidos pelo país nas Conferência das Partes do IPCC. Os modelos tradicionais para simulação de sistemas energéticos frequentemente falham em considerar essa variabilidade espaço-temporal e os efeitos em cascata das restrições hidrológicas. Nesse contexto, a componente Segurança Energética buscou avaliar a resiliência de longo prazo do sistema elétrico sob diferentes cenários de estresse hídrico, identificando oportunidades e estratégias para integrar fontes renováveis de energia (RES) e, quando possível, usar o excedente de energia para armazenamento eficiente.

Para o desenvolvimento do estudo, o modelo Calliope, desenvolvido em estrutura de código aberto por pesquisadores da Universidade Delft TU (Tröndle et al., 2022), foi adaptado para representar o sistema elétrico interconectado brasileiro (SIN). O modelo adaptado, denominado Brasil-Calliope, possibilita análises em alta resolução temporal integrando dados históricos de afluência de energia hidrelétrica e cenários probabilísticos de estresse hídrico derivados de projeções de modelos climáticos para otimização da capacidade de geração/despacho de eletricidade com objetivos de minimização de custos.

Três cenários de disponibilidade de energia hidrelétrica foram examinados:

- i) cenário de referência em que não ocorre estresse hídrico;
- ii) cenário moderado com redução de 5% na disponibilidade hídrica média climatológica;
- iii) e cenário severo com redução de 25% na disponibilidade hídrica média climatológica.

A modelagem do sistema elétrico nacional considerou as seguintes tecnologias de geração elétrica: parques eólicos *onshore*, usinas fotovoltaicas (FV) de grande porte (plantas de geração centralizada), geração fotovoltaica distribuída (usina de pequeno porte geralmente em telhados), usinas hidrelétricas a fio d'água e baseadas em reservatórios de acumulação, usinas de turbina a gás de ciclo combinado (CCGT), energia nuclear. Duas tecnologias de armazenamento foram também configuradas no modelo: baterias e hidrogênio. O estudo adotou a premissa que a geração em grandes usinas hidrelétricas não será expandida. O modelo Brasil-Calliope foi alimentado com 20 anos (2000-2019) de dados horários de clima e demanda energética.

Os cenários de escassez hídrica foram combinados com três trajetórias de custos (conservador, moderado e avançado) envolvidos com os investimentos e operação dos sistemas energéticos propostos para atender de forma resiliente a demanda energética prevista pela EPE em 2050. A trajetória de custo moderado adotou as estimativas e projeções estabelecidas na literatura acadêmica e técnica publicada por organizações com atuação consolidada no setor energético. As trajetórias de custo avançado (ou conservador) assume uma redução (ou elevação) de custo que varia entre -8% a -22% (ou entre 19 e 38%) dependendo da tecnologia como resultado de fatores diversos com o amadurecimento de tecnologias e restrições materiais estimadas pelo NREL (2020).

O estudo mostrou que a otimização de custos resulta em uma matriz energética futura com configuração altamente renovável, dominada por energia eólica *onshore* e geração solar fotovoltaica em plantas de grande porte (geração centralizada), conforme ilustra a Figura 16(b). Para atender a demanda energética em 2050 no cenário de referência (sem estresse hídrico), a capacidade instalada necessária varia de 376 a 387 GW dependendo das trajetórias de custo adotadas. No entanto, a capacidade instalada necessária em condições de estresse hídrico severo e livre de combustíveis fósseis requer a adição de 58 GW em relação ao cenário de referência.

O estudo mostra ainda que a energia hidrelétrica baseada em reservatórios continua sendo crucial para o armazenamento de energia no sistema, especialmente em condições de estresse hídrico severo. O hidrogênio e o armazenamento em baterias também desempenham papéis complementares, particularmente em cenários sem combustíveis fósseis. A Figura 16(c) ilustra o armazenamento de energia nos reservatórios hidroelétricos considerando os cenários de referência e de estresse hídrico adotados no estudo. Na trajetória de custo moderado, a capacidade instalada otimizada pelo modelo Brasil-Calliope consegue manter o armazenamento de energia em níveis equivalentes à condição de não-estresse hídrico.

Os custos do sistema aumentam de 2% a 3% em situações de estresse hídrico moderado e até 15% em situações de estresse severo, especialmente quando os combustíveis fósseis são excluídos. No entanto, a diferença entre os cenários de custo moderado e avançado é mínima ($\leq 2,7$ US\$/MWh), indicando alta resiliência às premissas de custo se metas moderadas forem cumpridas.

As emissões de GEE ao longo do ciclo de vida do setor elétrico diminuem na maioria dos cenários em comparação aos níveis atuais (50,6 MtCO₂eq/ano), atingindo um mínimo de 25,7 MtCO₂eq/ano no cenário de estresse hídrico de 25% com restrição total de uso de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. A única exceção é o cenário conservador de custo em situações de estresse hídrico severo, em que as emissões aumentam devido à maior dependência do gás natural.

O excedente de energia eólica durante a estação seca pode produzir até 0,46 Mt de hidrogênio verde anualmente — excedendo a demanda industrial atual do Brasil (0,33 Mt). No entanto, a sobreposição entre áreas ricas em ventos e regiões com escassez hídrica (por exemplo, Nordeste do Brasil) exige um planejamento cuidadoso para evitar conflitos hídricos. Ainda assim, o uso de água para eletrólise é relativamente baixo e pode ser mitigado por meio de fontes alternativas ou reciclagem.

A abordagem de modelagem dos sistemas energéticos, adotada neste estudo, fornece uma estrutura replicável para outros países dependentes de energia hidrelétrica que enfrentam riscos climáticos semelhantes. Trabalhos futuros devem incorporar os custos dinâmicos da infraestrutura de hidrogênio e investigar o papel de eventos climáticos extremos nos padrões de geração solar e eólica.

4.4 Modelagem do sistema terrestre

Introdução

Vamos abordar neste relatório o status do clima global e estudos de mudanças climáticas realizadas com o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre - BESM. Para tanto, avaliamos três artigos publicados recentemente, os quais abordam aspectos diversos da questão da modelagem climática global realizada pela componente de modelagem e cenários de mudança climática do

INCT-MC2. Um dos artigos (Nobre et al. 2023) trata da circulação média meridional oceânica do Oceano Atlântico - AMOC, que tem uma escala temporal de milhares de anos. Os outros (Alves de Oliveira et al. 2021; Bottino et al. 2024), tratam dos impactos do desflorestamento Amazônico e a mudança climática na saúde, na temperatura e precipitação no Brasil.

O status do clima global

Quanto à condição climática atual, o “sinal de alarme de incêndio” foi acionado: em 2024, atingimos a concentração de CO₂ atmosférico de 420 ppmv, assim como ultrapassamos um grau e meio de aumento da média global da temperatura do ar à superfície, em relação à temperatura média da Terra no período pré-industrial. Não somente ultrapassamos a marca de um grau e meio, mas, durante 2024, tal marca foi superada durante 300 dias dos 366 dias do ano! Em janeiro de 2025, a temperatura média do planeta foi ainda maior do que o ano anterior (sendo abril de 2025 o mês mais quente de toda a história com registros de temperatura da Terra).

Quando a temperatura do planeta passa a crescer mais aceleradamente, os grandes sumidouros de CO₂ atmosféricos, i.e. as florestas tropicais e os oceanos polares podem passar a diminuir suas taxas de remoção de CO₂ atmosférico, ou mesmo se tornarem potentes fontes de CO₂, liberando seus vastos estoques de carbono nas florestas, no fundo dos oceanos e nos solos temperados. O crescimento observado da concentração de carbono na atmosfera é fruto da combinação dos ciclos naturais de carbono no sistema terrestre, acrescidos das fontes antrópicas, que ocasionam o aumento. Porém, tal acúmulo de CO₂ atmosférico é o resíduo de aproximadamente um terço do carbono extra gerado de fontes antrópicas; pois um terço do carbono gerado pelas fontes antrópicas eram absorvidos pelas florestas e um terço pelos oceanos. Contudo, durante 2024 as florestas globais absorveram em torno de zero CO₂ atmosférico, do um terço que habitualmente absorvem por suas atividades fotossintéticas. Tal redução na absorção de CO₂ pelos biomas foi uma decorrência das extensas secas sobre os continentes observadas em 2024. Durante um período de estresse hídrico, a vegetação reduz sua taxa de fotossíntese, ela não cresce, portanto não remove carbono da atmosfera. E em algumas regiões, como os oceanos das regiões temperadas e polares, que são normalmente sumidouros de carbono, também estão se tornando apenas levemente absorventes.

Nos últimos quatro anos, o número de desastres ambientais cresceu 250% no Brasil. A mudança dos fluxos de carbono, dos grandes depósitos naturais, como as florestas tropicais e hidrometanos, faz tudo o que nós já pesquisamos e escrevemos até hoje, IPCC, etc., “livro de história para crianças dormirem”. Então, como é que nós podemos lidar com isso? Nós temos desenvolvido essa suíte de modelos; um modelo global acoplado oceano-atmosfera-biosfera-criosfera, o BESM, o Brazilian Earth System Model, mais um modelo atmosférico regional, o Eta.

O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre - BESM e Cenários de Mudanças Climáticas

E para fazer uma previsão sobre os estados futuros do clima, trocamos a roupa de gala por macacão e vamos para a oficina. No relatório se ilustra esquematicamente a sequência de integrações dos modelos BESM e Eta na geração de cenários globais/regionais de mudanças climáticas. O Relatório ilustra o funcionamento do modelo BESM, no qual o modelo oceânico (MOM6) é acoplado ao modelo atmosférico (BAM) e ao modelo de gelo (SIS) via acoplador de fluxos (FMS). O modelo conta com um acoplador de fluxos, que transfere os campos de acoplamento entre o modelo atmosférico/de superfície, o modelo oceânico e o modelo de gelo. O acoplador chama cada modelo componente, integra no tempo, depois passa os fluxos para o próximo modelo componente, e assim, de hora em hora, ele segue fazendo isso por horas, dias, anos. Para que as nossas simulações numéricas tenham algum sentido, contudo, é importante que elas representem os fenômenos físicos do sistema terrestre. Na versão anterior do nosso modelo, a AMOC, a circulação média meridional do oceano Atlântico perdia energia. Na nova versão do modelo BESM o modelo oceânico conta com uma mais alta resolução espacial, particularmente em altas latitudes, tendo vários bugs resolvidos, estamos com uma condição melhor do modelo. A outra coisa que vocês nunca escutam falar é como que está a formação de

águas profundas do modelo em pauta. Se o modelo matemático não gera as circulações oceânicas profundas que a natureza tem, então quanto podemos assegurar de que esse modelo terá a capacidade de prever uma variação climática para o futuro? Os diagramas T-S no Atlântico Sul, evidenciando que o modelo oceânico MOM6 representa bem as massas de água NADW (North Atlantic Deep Water) e AAIW (Antarctic Intermediate Water). A título de demonstração, a previsão de dez dias do modelo acoplado BESM na resolução T666L64 (i.e. grade horizontal de 20 km e 64 níveis na vertical) e as observações correspondentes para o período (Figura 5a). A nível de comparação, habitualmente rodamos o modelo regional Eta sobre a América do Sul, com grade de 20 km. Mas nós já descobrimos que a resolução é importante, então estamos migrando para mais alta resolução, e então, constatamos que o modelo representa bem as principais feições atmosféricas observadas, tais como as zonas de convergência do Pacífico e do Atlântico Sul, os jatos polares, etc. Outra condição que é comum em modelos acoplados oceano-atmosfera globais é a geração espúria de uma dupla Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), ausentes nas simulações do BESM. Então, em resumo: temos um modelo acoplado oceano-atmosfera-biosfera-criosfera que gera uma boa representação da condição média do planeta, de circulação e precipitação. Choveu bastante em abril e maio de 2024 no Rio Grande do Sul, mostra a previsão com seis meses de antecedência do modelo BESM. Embora a coerente previsão da distribuição espacial da precipitação, aquela não alcançou o total sazonal de 800 milímetros de chuva observados no período na região, tendo a previsão atingido em torno de 300 mm. Aquela previsão talvez não acionasse algum alarme na Defesa Civil, com seis meses de antecedência, pois nesta época do ano chove em anos de El Niño. Assim, prever a magnitude é essencial. Contudo, do ponto de vista matemático, o modelo ter gerado aquela representação espacial da chuva observada não é chance. Assim, precisamos desenvolver um mecanismo para capturar a magnitude correta do padrão espacial bem representado pelo modelo acoplado oceano-atmosfera BESM.

As previsões de anomalias anuais de precipitação para as Regiões Norte, Nordeste e Centroeste do Brasil mostram as previsões do BESM e as observações média de um ano, de dezembro do ano anterior até novembro de cada ano: 2005, 2010, 2016 e 2024; que são anos de El Niño. Constata-se que há um sinal que talvez possamos utilizar para nos prepararmos para um período de estiagem maior ou menor, com um ano de antecedência (Nobre et al, 2025, em preparação). Em seguida, tratamos da questão do impacto do desflorestamento e da mudança climática na saúde (Alves de Oliveira et al. 2021). Neste artigo, substituímos a vegetação da floresta Amazônica por vegetação de savana e forçamos radiativamente o modelo com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do protocolo CMIP5. O histograma da temperatura máxima observada na Amazônia, no caso da linha vermelha e rosa. Em linha contínua está mostrado o resultado da simulação com a cobertura florestal e a concentração de CO₂ atmosférico atuais, e o tracejado é como seria com a condição futura de concentração de CO₂ atmosférico para os cenários RCP4.5 (em verde) e RCP 8.5 (em azul). O eixo X representa o índice WBGT, que é o conforto térmico. Leva em consideração a temperatura e a umidade. WBGT de 34 °C é um limite de conforto térmico, 40 °C é limite de sobrevivência. Quando uma pessoa fica submetida a 40 °C por um número de horas, a pessoa morre, porque não troca calor com o ambiente. Então, as condições na Amazônia hoje não chegam a 34 °C; para um cenário de desflorestamento, que é a última curva contínua, e mudança climática no final do século, a média passa a ser 34 °C. E, neste caso, ultrapassamos os 40 °C. Qual é o alerta que esta figura evoca? É que quando um cenário mostra que foi atingido os 40 °C WBGT, mesmo que seja na ponta, compreenda que aquela é uma subestimativa. Isto porque o modelo acomoda muitas aproximações. É como um automóvel em marcha com o breque de mão meio puxado. Então, quando ele indica que existe uma condição crítica, esta pode ser muito mais crítica no mundo real. Todos os modelos estão corretos no sentido do sinal que preveem; mas a velocidade de mudança climática com que os modelos apontam têm sido muito menor do que a mudança observada. O segundo artigo (Nobre et al. 2023) aborda o declínio e a recuperação da AMOC. Isso é um tema muito discutido entre oceanógrafos. Se a circulação da AMOC irá ou não colapsar no futuro? E se ela colapsar, quais serão suas decorrências para o clima global? A Figura 9 mostra um índice de variação temporal em mil anos de integração do modelo BESM,

sendo a curva azul representa a variação da quantidade de gelo no Ártico, a curva vermelha a salinidade no Atlântico Norte e a curva preta a AMOC. Integramos o modelo BESM por mil anos, mantendo a concentração de CO₂ atmosférico constante aos níveis pré-industriais (i.e. 240 ppmv) (CTRL) e, numa integração em paralelo, quadruplicamos a quantidade de CO₂ instantaneamente (Abrupt4xCO₂) e fizemos outra rodada de mil anos. A diferença entre as integrações Abrupt4xCO₂ e CTRL mostrou na Na integração Abrupt4xCO₂, há um aumento médio global da temperatura do ar. A quantidade de gelo marinho no Ártico varia sazonalmente, sem nunca colapsar a zero. Mas a AMOC retorna próxima aos seus valores da integração CTRL após quatro séculos de integração. Quando a AMOC decai, o que acontece é que há um fluxo de água doce do Ártico, um aumento de 0,1 Sverdrup, que são 10⁶ metros cúbicos por segundo de água doce, fria, que resfria o Atlântico Norte. O fluxo de água doce acarreta uma diminuição da salinidade, tornando a água mais flutuante, então ela não afunda, cortando a produção da água NADW. Contudo, quando as águas superficiais do Atlântico Norte se resfriam, a atmosfera passa a ceder calor para o oceano, o que resulta em seu gradual aquecimento, a uma taxa de 10 a 20 watts por metro quadrado por 400 anos. Assim, com o tempo a atmosfera elimina água fria superficial do Atlântico Norte, a qual evapora menos, diminuindo a salinidade superficial. Por outro lado, o aumento do rotacional do vento ocasiona o bombeamento de Ekman das águas subsuperficiais mais salinas para a superfície, contribuindo para restabelecer a salinidade à superfície.

As animações de diagramas Temperatura/Salinidade, em vários lugares do globo. Os pontos nos quais os diagramas foram calculados e representa o Atlântico Norte, que recebe água fria de degelo do Ártico. Instantaneamente caem ambas a temperatura e a salinidade, rapidamente. As quais, ao longo do tempo, começam a restaurar até retornar “abruptamente” à condição inicial. As demais figuras, no Atlântico Tropical, no Atlântico Sul, no Índico, em todas elas, a primeira coisa que acontece é a salinidade aumentar, a temperatura aumentar, e depois ela decai. Aqui no ponto C, no Atlântico Equatorial, no ponto D, no Atlântico Sul, primeiro a salinidade aumenta, então isso sugere uma relação de causalidade. O Atlântico Norte interrompe a circulação, o Atlântico Equatorial Norte se torna mais salino e mais quente. Quando o Atlântico Norte se aquece, fundamentalmente, aumenta a incidência de secas, tanto na Amazônia quanto no Nordeste do Brasil. E o aumento da incidência de secas na Amazônia significa fragilizar um sistema que já está fragilizado. Bottino et al (2024) mostra uma atualização de artigo que publicamos em 2009 (Nobre et al. 2009) sobre a relação entre desflorestamento Amazônico e oceano. Com nosso modelo atualizado (BESM2.8), focamos no impacto percentual do desflorestamento e do aquecimento global na precipitação e na temperatura no continente como um todo. O sinal do aquecimento global, que é obtido pela diferença entre a integração de controle e aquela com a forçante radiativa atmosférica devida ao acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, ou somente com o desflorestamento, sem alterar a forçante radiativa da atmosfera e a soma dos dois. Então, na parte central da Amazônia, os resultados de nosso estudo, no nosso modelo “com o breque de mão puxado”, a redução da precipitação na floresta amazônica, devido ao próprio desflorestamento é possível transformar a Amazônia num deserto. Quanto à extensão da estação seca, que pelo aquecimento global o aumento da estação seca se dá mais na costa norte-nordeste. No caso do desflorestamento, tal aumento se dá na parte central da Amazônia, sendo que a combinação dos dois efeitos afeta a Amazônia e o Centro-Oeste. E períodos secos mais longos significam uma floresta menos resiliente. E, por fim, os efeitos na temperatura.

Enquanto o aquecimento global causa um aquecimento do continente como um todo, o desflorestamento tem um efeito muito forte local de aumento de temperatura de 10 graus Celsius. E o efeito combinado, chegamos a 14 graus, 15 graus na Amazônia, Nordeste 10 graus, Sudeste e Sul 5 a 7 graus na variação da temperatura máxima do ar. E esse é, novamente, o alarme do como é que transformamos esta figura em política pública.

Considerações Finais

Enquanto uma grande plantação de soja ou qualquer outra cultura, no Centro-Oeste, ou no Arco de Fogo estaria refém dessas mudanças, pequenos produtores rurais poderiam se valer de técnicas, como aquelas desenvolvidas no projeto CNPq/Ecolume, que são pequenas bolhas de sobrevivência no bioma de Caatinga, onde o agricultor passa o ano todo somente com a água captada da chuva, com produção de energia e alimentos. Esta componente abordou as condições climáticas atuais da Terra, mostrando a forte aceleração com a qual eventos climáticos extremos estão ocorrendo no planeta, mas em particular no Brasil. Mostrou também o emprego do modelo acoplado oceano-atmosfera-biosfera-criosfera global - BESM do INPE para estudos de mudanças climáticas. Dentre os principais resultados encontramos a importância da Floresta Amazônica para a estabilidade climática e regularidade do regime de chuvas sobre o Brasil. No mais, apontou para caminhos futuros de desenvolvimento da modelagem do Sistema Terrestre no INPE, em cooperação com instituições no Brasil e no mundo. Como parte integrante do INCT-MC2, o BESM será o modelo base com o qual o Brasil contribuirá para os cenários globais de mudanças climáticas do programa CMIP 7.

Modelagem regional

O modelo numérico regional Eta emprega a coordenada vertical *eta* que é praticamente horizontal, o que oferece vantagens na reprodução de processos atmosféricos em regiões de terrenos complexos. Essa caracterização é apropriada para simulações mais acuradas em regiões como os Andes e o Planalto Central brasileiro. Foram desenvolvidas versões do Eta com solo profundo, incorporação de biomas brasileiros e, mais recentemente (Gomes et al., 2023), uma versão unificada para diferentes horizontes temporais e resoluções espaciais. Projetos em desenvolvimento incluem o acoplamento do Eta com o modelo oceânico MOM6 (Laureanti, 2023) e com o modelo de lagos FLake (Afonso e Chou, 2023).

Estudos de mudanças climáticas configurando o modelo Eta em alta resolução foram utilizadas para estudos de desmatamento a 1km (Pilotto et al, 2023), impactos em ilhas a 4 km (Chou et al. 2020), e tempestades severas em áreas de topografia complexa 5km (Ferreira et al. 2023; Sondermann et al. 2023). Foi realizada a atualização do mapa de vegetação e da fração de cobertura verde (FCover), anteriormente com resolução de 14 km, substituída por dados de alta resolução (1 km) do programa Copernicus. A nova versão, interpolada mensalmente, apresenta maior detalhamento espacial, com notável incremento na bacia amazônica e redução no sul, centro-oeste e sudeste do Brasil, em comparação à versão anterior. Também foram incluídas 18 classes de vegetação, abrangendo caatinga e áreas de desmatamento.

Impactos do Desmatamento na Amazônia simulados em 1 km de resolução

O esquema de superfície NOAH-MP foi acoplado ao modelo Eta (Pilotto et al., 2023). Esta versão foi configurada na resolução de 1km e empregada para capturar o crescimento do desmatamento na região de Ji-Paraná (RO) e avaliar os impactos na vazão dos rios. A rodada de 1km foi executada de forma contínua de 1983 a 1989 atualizando anualmente a área desmatada, conforme os dados observados de desmatamento. A mesma rodada foi executada, mas mantendo a cobertura vegetal de 1983. Os resultados mostraram aumento da evapotranspiração em áreas desmatadas durante a estação chuvosa e redução durante a seca. No que se refere à vazão, o experimento indicou aumento em anos de condição normal e La Niña e redução sistemática durante a estação seca conforme o percentual de desmatamento aumentava.

Simulação de mudança natural dos biomas a partir do modelo com vegetação dinâmica, Eta-INLAND

Esta versão do modelo Eta-INLAND, desenvolvida durante a pesquisa de pós-doutorado, é capaz de projetar mudanças em biomas. Embora os processos que envolvem o impacto do aumento de CO₂ nas plantas ainda precisem ser aprimorados, os impactos são diferenciados em cada bioma.

Os impactos sobre os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica foram obtidos utilizando a versão desacoplada do INLAND forçado com o modelo Eta-HadGEM2-ES. No período de 2055 a 2065, algumas áreas de floresta tropical na parte sul do Bioma Amazônia foram substituídas por Cerrado no cenário RCP4.5 e por pastagem natural no cenário RCP8.5. No final do século (2085-2095), os pontos da grade com vegetação do tipo Floresta Tropical foram reduzidos e grande parte da área definida como Bioma Amazônia foi substituída por vegetação do tipo Floresta Decídua ou Pastagem Natural. Ao comparar as mudanças nos tipos de vegetação com as projeções de temperatura e precipitação nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, observou-se que o padrão de mudança no tipo de vegetação foi fortemente determinado pelo padrão de mudança nessas variáveis. No bioma Cerrado, os impactos são ainda mais significativos; por exemplo, no meio do século, na década de 2055–2065, já são projetadas mudanças nos tipos de vegetação que abrangem praticamente toda a área do Cerrado.

Cenários de uso e cobertura do solo, SSP3, na Amazônia aplicado ao Eta-NOAH-MP

O esquema de superfície terrestre anterior do NOAH foi substituído pelo esquema NOAH-MP (Pilotto et al., 2023). A versão foi modificada para conter 8 camadas de solo, o que resultou em fluxos superficiais mais acurados no modelo Eta/NoahMP. As profundidades das camadas de solo são: 0,1, 0,4, 1, 2, 3,5, 5,6, 8,4 e 12 metros. Esta versão mostrou-se capaz de executar simulações de longo prazo na altíssima resolução de 1km. A substituição da superfície terrestre do esquema NOAH para o NOAH-MP ainda requer algum ajuste fino das propriedades da superfície terrestre. Em 20km, foi simulado o clima de 2011-2040, considerando as mudanças climáticas devido ao aumento de CO₂ e às mudanças no uso da terra na Amazônia, cenário SSP3. Esta simulação produziu um aumento no transporte de umidade na Amazônia, na região Nordeste do Brasil e ao sul do Rio da Prata. Este resultado pode ser indicativo de um aumento nos eventos de inundação na estação chuvosa. Também se notou uma redução no transporte de umidade na região Sudeste do Brasil e no norte da Bacia do Prata.

4.5 Comunicação

O time responsável pelo desenvolvimento das ações dentro do tema transversal “Comunicação, disseminação do conhecimento, educação para a sustentabilidade” do INCT-MC2 desenvolveu suas atividades através da Rede Latino-Americana de Divulgação Científica e Mudanças Climáticas (Rede DCMC), um coletivo de pesquisadores e instituições de pesquisa do Brasil, Argentina, Chile, Colômbia e México.

Nesta componente se busca aqui, refletir sobre o papel da comunicação, da arte e do cuidado na construção de respostas éticas e sensíveis à crise climática. O tema de fundo inspirador das atividades do coletivo foi o desenvolvimento de abordagens transdisciplinares e relacionais, que evidenciem as limitações dos dualismos da modernidade ocidental e proponham formas regenerativas de habitar o planeta.

O Antropoceno como condição de base da contemporaneidade

Incêndios florestais, enchentes, secas prolongadas e eventos climáticos extremos já não são mais exceções, mas sintomas recorrentes de um contexto em que a intervenção dos processos da modernidade industrial nos biomas e ecossistemas tirou o planeta da condição de equilíbrio termodinâmico em que se encontrava (Marengo, 2025). Antropoceno é um conceito oriundo da geologia que rapidamente ganhou valência nas humanidades. Embora controverso em sua definição estratigráfica, o conceito tem ganhado centralidade como operador heurístico e político (Marras e Taddei, 2022). Ele indica que não apenas foram alterados os ciclos biogeoquímicos fundamentais — como os do carbono, nitrogênio e fósforo —, mas que as práticas culturais, econômicas e políticas do mundo ocidental estão na raiz dessas transformações. Como propõe uma diversa gama de autores (Danowski e Viveiros de Castro, 2014; Povinelli, 2024; Taddei, 2024), não se trata apenas de reconhecer o impacto humano

sobre o meio ambiente, mas de compreender que essa marca é produto de um modelo civilizacional específico, baseado no extrativismo, na racionalidade instrumental e em modos de habitação do mundo que perpetuam relações coloniais (Ferdinand, 2022; Taddei, Shiratori e Bulamah, 2022).

Essa constatação, no entanto, ainda que fundamentada em indicadores científicos robustos, não tem produzido os efeitos esperados em termos de transformação social ou política (Taddei, 2022). Apesar do crescente volume de dados, diagnósticos e alertas científicos, as respostas institucionais permanecem tímidas, e a percepção pública muitas vezes oscila entre a indiferença, o negacionismo e o desespero. É nesse contexto que se impõe a necessidade de repensar a comunicação, a educação e a produção de conhecimento como práticas implicadas na própria construção do mundo — e não apenas como instrumentos auxiliares da ciência (Dias, 2022, Murriello e Bengtsson, 2023; Garcia, 2024; Cangi, 2023).

Críticas ao modelo do déficit

Subsiste no universo acadêmico uma compreensão ultrapassada e amplamente criticada do que são a comunicação e a educação ligadas a conceitos científicos. Trata-se da representação da comunicação científica e da educação como um fluxo linear — em que o conhecimento gerado em centros de pesquisa se transfere, por canais informacionais, até públicos considerados ignorantes. O termo déficit é empregado na descrição desse modelo porque a ideia mais comum é que certas formas de comportamento individuais e coletivos, sobretudo os de alguma forma identificados com problemas ambientais, são gerados por uma ausência, uma espécie de vácuo — no caso, de informações de natureza científica. Nesse modelo, a comunicação e a educação são dois tipos distintos de processos cujo objetivo é “preencher” esse vazio com informações científicas. Uma expectativa decorrente deste modelo é que a “entrega” da informação resultaria em transformação das práticas e comportamentos coletivos vinculados à questão sobre a qual a informação faz referência.

Este modo de conceituar os processos comunicativos e educativos foi extensamente criticado (Bucchi, 2008; Sturgis e Allum, 2004; Wynne, 1992). Por um lado, há aí uma simplificação excessiva da compreensão do que são o ato de comunicar, a aprendizagem e as práticas e comportamentos coletivos, incluindo as decisões governamentais (Jasanoff, 2005). Por outro, há pouquíssima evidência empírica de que a razão principal de práticas e comportamentos ambientalmente deletérios seja falta de informação. Não há correlação robusta entre níveis de escolaridade e atitudes de negacionismo científico em países em que as taxas de escolarização são muito mais altas do que a brasileira, por exemplo (Gregory e Miller, 1998). Há também estudos empíricos que mostram que a presença de dados científicos não é condição suficiente para a mudança de padrões de tomadas de decisão (Irwin e Wynne, 1996).

Um exemplo didático, e marco importante na história deste campo de pesquisa no campo das ciências do clima, refere-se à previsão da ocorrência do fenômeno El Niño em 1998. O El Niño é um processo decorrente da interação da atmosfera e do oceano Pacífico que faz a temperatura da superfície do oceano variar de forma cíclica. Sabe-se que ele afeta o clima de todo o planeta; mais especialmente, o El Niño está ligado à ocorrência de secas e, portanto, de grande sofrimento social, em regiões da América do Sul e da África. Depois de haver sido modelado nos anos 1980 e previsto, pela primeira vez, em 1993, a previsão de uma nova ocorrência do fenômeno, em 1997, gerou grande expectativa na comunidade científica de que o sofrimento causado pelas secas pudesse ser mitigado pela ação protetiva dos governos, devidamente informados. O que se constatou, depois que a previsão foi amplamente difundida e da ocorrência do fenômeno, é que a informação não evitou nem mitigou os impactos socioeconômicos já conhecidos. A informação foi amplamente difundida — mas não foi capaz, por si só, de gerar as transformações necessárias para que os impactos fossem reduzidos (Glantz, 2001; Broad e Agrawala, 2000; Broad, Pfaff e Glantz, 2002; Cash et al. 2003). Este evento foi um dos catalizadores do debate que inseriu a própria produção da ciência como algo a ser incluído entre as variáveis de análise. Ao invés de simplesmente produzir e emitir mensagens científicas, as pesquisas evidenciaram a necessidade do fazer científico adotar uma abordagem mais reflexiva sobre sua relação com o resto da sociedade e direcionada à produção

de ciência entendida como *usável* (Lemos e Dilling, 2007) e *acionável* (Kirchhoff, Lemos e Dessai, 2013)

O modelo do déficit falha não apenas por sua ineficácia prática, mas também por carregar um pressuposto colonial de superioridade epistêmica. Ao representar os públicos como recipientes vazios ou como atores passivos, ignora os saberes já existentes nos territórios, nas culturas e nas experiências comunitárias (Santos, 2023; Taddei, 2008).

Arte, imaginação e criação de futuros

A insuficiência das estratégias convencionais de comunicação científica diante da crise climática sugere a necessidade de outras formas de engajamento sensível e cognitivo com o mundo. Nesse contexto, a arte surge como campo privilegiado para a experimentação de narrativas, afetos e práticas que escapam às gramáticas instrumentais da modernidade. Como argumentam Guzzo et al. (2024), as práticas artísticas no Antropoceno operam ativando modos de sentir e imaginar que reconfiguram o próprio problema climático e os horizontes de resposta possíveis. Uma dimensão importante da crise climática e ambiental é a maneira como certas ideias, cristalizadas em torno de formas de organização social, modelos econômicos e políticos e ideias sobre o mundo, acabam materializando os processos disfuncionais que geraram a crise. Nesse contexto, embora a disponibilidade de informação científica seja importante, ela se mostra insuficiente e ineficiente. A questão aqui, então, é entender como os padrões coletivos de percepção e ação no mundo são constituídos e como são transformados.

A literatura acadêmica mostra que as artes visuais desempenharam um papel importante em como ocorreram as transformações históricas na percepção do meio ambiente e sua relação com os humanos. A pintura de paisagens, por exemplo, está fortemente ligada às transformações sociais que resultaram na criação de parques nacionais, nos Estados Unidos (Bravo e Silverman, 2024; Murray, 2024). O argumento, aqui, é que, no contexto da crise climática e ambiental do Antropoceno, o que artistas engajados têm feito é produzir obras que colocam as pessoas na posição de serem capazes de perceber e sentir o mundo de forma diferente e, a partir disso, imaginar o futuro de maneiras alternativas. Compreender o conteúdo lógico e analítico da informação científica é importante, mas insuficiente para produzir as transformações sociais que os relatórios do IPCC dizem serem necessárias.

O argumento é construído em torno da ideia de que engajar-se na construção de transformações sociais que resultem em um futuro diferente implica a necessidade do desenvolvimento de diferentes percepções sobre a realidade (Guzzo e Taddei, 2019). Tomemos um exemplo do diálogo de saberes com as filosofias indígenas contemporâneas. Autores como Ailton Krenak (2021, 2022) e Davi Kopenawa (Kopenawa e Albert, 2015, 2023), por exemplo, nos fazem compreender e pensar a natureza e a relação que temos com ela de maneiras contraintuitivas. Os paradigmas técnicos hegemônicos no campo da hidrologia, por exemplo, representam rios como “corpos de água”, ou seja, como grande quantidade de moléculas de água. Isso permite que intervenções técnicas massivas sejam materializadas para a conveniência dos humanos. O rio Pinheiros, em São Paulo, por exemplo, teve seu curso invertido no século 20 e correu contra a gravidade por sessenta anos (Seabra, 1987). Krenak, por sua vez, refere-se ao rio Doce, em Minas Gerais, como seu avô. Kopenawa nos diz que, para o povo Yanomami, os humanos se originaram a partir da cópula entre o demiurgo Omama e a filha do dono dos rios. Ambos chamam a atenção para como os modos de percepção indígenas colocam especial atenção em como os seres se constituem mutuamente: os rios são elementos fundamentais dentro dos biomas em que nos desenvolvemos como seres humanos. Tão importantes que, no contexto do pensamento indígena, são pensados através de uma relação de parentesco (ideia também proposta por autoras da filosofia ecofeminista, como Donna Haraway; ver Haraway 2015, 2023). Krenak e Kopenawa não oferecem solução técnica para os problemas que temos, e essa não é a intenção de ambos. O objetivo é gerar uma transformação de percepção, onde algo que tenha sido reduzido a um reservatório de recursos econômicos volte a se revelar como elemento fundamental para a reprodução de inúmeras formas de vida, muitas das quais a nossa depende para sua própria existência saudável e a longo prazo.

A ideia de que as mudanças necessárias para o futuro demandam transformações em como percebemos o mundo, em grande medida, já não é mais controversa. No entanto, na grande maioria dos casos, somos incapazes de gerar essa autotransformação por meio da autoindução. A associação inusitada de elementos do mundo, na forma de narrativas filosóficas, no caso de autores indígenas como Krenak, ou de experiências de imersão sensorial, como na produção de artistas contemporâneos, parece mais eficaz em criar as rupturas e ressignificações necessárias para que sejamos capazes de imaginar futuros alternativos.

Compreendida dessa maneira, a arte não é apenas um meio de representação, mas uma forma de habitar o problema. Em vez de oferecer soluções únicas ou respostas definitivas, os projetos artísticos contemporâneos exploram a ambiguidade, o inacabamento e a especulação como formas de lidar com a incerteza (Cangi, 2023; Cangi, Gonçalves, 2023). Isso é especialmente relevante num cenário em que as estratégias de controle e previsão — centrais à racionalidade moderna — mostram-se insuficientes diante das transformações em curso (Fonseca e Amorim, 2022).

Há, ainda, uma dimensão mais profunda nessa questão. Há alguns anos, Krenak afirmou, em uma entrevista, que precisamos começar a “produzir florestas como subjetividade” (Reis, 2021) – não apenas florestas físicas, mas florestas como um modo de existência. Uma maneira de entender o que Krenak nos incentiva a fazer é reproduzir em outros contextos – em diferentes espaços, tempos, atividades, práticas e até mesmo modos de pensamento – as formas de relações e ações por meio das quais a vida é produzida e reproduzida em uma floresta. Uma maneira pela qual vários pesquisadores do tema transversal incorporaram isso foi adotando a perspectiva de que comunicar e educar é, entre muitas coisas, produzir encontros entre atores heterogêneos (Miranda, Bellini, Dias, 2024). O objetivo é replicar na diversidade de pensamento o que a floresta faz com a diversidade em relação à vida – a biodiversidade. Isso se concretizou por meio de experimentações na forma de residências artísticas, momentos de imersão e de contato entre diferentes modos de relacionamento com o mundo, fora do âmbito da experiência cotidiana.

Neste contexto, foram especialmente poderosas as residências artísticas realizadas, ao longo da duração do INCT-MC fase 2, em ambientes de pesquisa e produção científica (Aranha e Dias, 2024; Fonseca e Kroef, 2023) e em comunidades indígenas e quilombolas. Pesquisadores-artistas-educadores realizaram residências de trabalho colaborativo com pesquisadores do projeto AmazonFace, na Amazonia, com técnicos da EMBRAPA em Campinas, com hidrólogos da Universidade de São Paulo em São Carlos, com pesquisadores e técnicos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden), em São José dos Campos, e da Fundação Oswaldo Cruz, no Rio de Janeiro. Uma residência especialmente importante denominou-se “Perceber-fazer floresta I e II” e foi organizada em conjunto com as comunidades indígenas Baré, Karapãna e Guarani-Kaiowá e a comunidade quilombola Jongo Dito Ribeiro.

A principal plataforma na qual os resultados destas ações e reflexões foram publicizados é a revista *ClimaCom Cultura Científica – pesquisa, jornalismo e arte*¹. Trata-se de um periódico que reúne produções acadêmicas nas áreas de artes, ciências sociais e humanidades, em interface com temas ambientais, com foco especial no novo regime climático. A revista é organizada na forma de dossiês temáticos, constituindo uma plataforma transdisciplinar de experimentação estética e crítica. Ao longo das atividades do INCT-MC fase 2, pesquisadores das demais componentes do projeto foram convidados a editar dossiês ligados às suas áreas de atividade. Surgiram, desta forma, os dossiês *Diálogos do Antropoceno* (2018, número 12), *Inter/transdisciplinaridade* (2018, número 13), *Florestas* (2020, número 17), *Diante dos Negacionismos* (2021, número 21), *Ciência.Vida.Educação* (2023, número 24), *Desastres* (2023, número 25), *Territórios e Povos Indígenas* (2024, número 26), dentre outros².

¹ Ver <https://climacom.mudancasclimaticas.net.br>

² A equipe do tema transversal produziu, ainda, grande quantidade de obras e intervenções artísticas na forma de exposições e catálogos, dezenas de livros e centenas de artigos científicos, muitos dos quais em periódicos de alto impacto, como *Nature Climate Change* (Asayama et al., 2022), *Annual Review of Environment and Resources* (Guzzo et al., 2024), *Climate Services* (Escada et al., 2021) e *Sociologias* (Fleury, Miguel e Taddei, 2019). Foram realizadas, também, oficinas, encontros e mesas de trabalho com

Mais do que difundir conteúdos, a revista propõe modos de ver e sentir que desestabilizam fronteiras entre disciplinas, entre humano e não humano, entre teoria e prática. Talvez ainda mais importante seja o fato de que muitos dos trabalhos apresentados na ClimaCom refletem a perspectiva desenvolvida pelos pesquisadores, ao longo dos anos, de assumir o público como potência criativa em comunicação e educação. Em outras palavras, o público não é tomado como um recipiente, algo dado, pronto e acabado, à espera de um encontro com algo – a informação científica – já produzido de antemão. Em vez disso, o público passou a ser compreendido como uma força criativa estratégica, com toda a sua heterogeneidade e singularidades. Tal abordagem exige repensar o que significa comunicar e educar, colocando em questão, mais uma vez, o modelo de comunicação denominado modelo emissor-receptor, ou modelo do déficit de conhecimento.

Cuidado como Modo de Vida

Se o Antropoceno revela a insustentabilidade do modelo civilizacional moderno, é necessário imaginar outro princípio organizador para nossas práticas, instituições e modos de vida. É nesse ponto que a noção de cuidado emerge não como sentimento ou virtude individual, mas como fundamento epistêmico e político. Cuidar, como propõem diversos autores (Fonseca, 2022; Haraway, 2023; Pellejero, 2024; Taddei, 2024), é reorganizar os vínculos que nos constituem, reconhecendo que nossas ações estão enredadas em relações de interdependência com múltiplas formas de vida e com os ecossistemas (Aranha e Dias, 2024; Dias, Guzzo, Fonseca, 2022; Dias et al., 2022).

Essa abordagem desloca a centralidade da racionalidade instrumental e da objetividade distanciada que marcaram a ciência moderna. Em vez de se posicionar sobre o mundo para explicá-lo ou controlá-lo, trata-se de se implicar com ele, sentir-se afetado e responder com responsabilidade. Nessa perspectiva, o cuidado torna-se uma episteme: uma forma de conhecer baseada na atenção, no envolvimento e na coabitação.

Pensar a comunicação e a educação a partir do cuidado é, portanto, propor práticas que não se limitem à transmissão de conteúdos, mas que cultivem o encontro, a escuta e a experiência compartilhada. Implica também reconhecer que as soluções para os dilemas do Antropoceno precisam ser construídas localmente, por coletivos que se compreendem como interdependentes e vulneráveis. É nesse contexto que Guzzo et al. (2024) ressaltam a relevância das práticas artísticas decoloniais, enraizadas em territórios e cosmologias não modernas. Ao contrapor o paradigma extrativista herdado da modernidade ocidental, essas práticas afirmam modos de existência baseados na interdependência entre seres, materiais e paisagens. Longe de negar a tecnologia ou idealizar o passado, essas iniciativas propõem futuros em comum com o mais-que-humano.

Esse reposicionamento do cuidado como eixo organizador das práticas sociais encontra eco em movimentos que, em diferentes partes do mundo, buscam reinventar as formas de habitar o planeta. Comunidades indígenas, quilombolas, feminismos do Sul Global, ativismos ambientais e práticas artísticas comprometidas com o comum são fontes vitais de inspiração para essa mudança de paradigma (Veron et al., 2024; Wunder et al., 2022). Não se trata de romantizar essas experiências, mas de reconhecê-las como portadoras de saberes que, ainda que historicamente marginalizados, hoje mostram-se indispensáveis à reconstrução de mundos possíveis.

Conclusão

Diante da emergência climática e da evidência de que os modos de vida modernos nos conduziram a um impasse civilizacional, este capítulo, refletindo a trajetória do coletivo de pesquisadores-educadores-artistas que compõe a equipe do tema transversal, propõe uma reflexão sobre o papel da comunicação, da arte, da educação e do cuidado na construção de

alunos e professores de escolas da rede pública, além de ações de colaboração com o movimento Escolas Pelo Clima e com o Cemaden Educação. A lista completa de atividades pode ser encontrada nos relatórios disponíveis no site do INCT-MC fase 2 ou no site da Rede Latino-Americana de Divulgação Científica e Mudanças Climáticas.

outros futuros. A experiência do tema transversal do INCT Mudanças Climáticas Fase 2 mostra que é possível criar espaços interdisciplinares e sensíveis para pensar a crise de forma mais ampla, profunda e comprometida.

A comunicação, compreendida como coengendramento de mundos, deve ativar sensibilidades e fomentar espaços de escuta e ação coletiva. A arte, assim como as artes de comunicar e de educar, então, atuam como ferramentas críticas e criativas, capazes de deslocar imaginários e abrir brechas no presente. O cuidado, por sua vez, precisa ser reposicionado como fundamento epistêmico — uma maneira de conhecer, agir e viver em relação.

4.6 Economia

Introdução

Ao longo dos sete anos do INCT-MC2, o subcomponente de economia consolidou-se como um eixo estratégico no esforço multidisciplinar voltado à compreensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre a sociedade brasileira.

A proposta metodológica adotada articulou abordagens estruturais e empíricas, possibilitando análises rigorosas sobre os efeitos econômicos de eventos climáticos extremos, mudanças graduais de longo prazo e diferentes alternativas de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação. Esse arranjo permitiu não apenas a simulação de cenários futuros com base em modelos integrados, mas também a identificação de efeitos observados em dados históricos, enriquecendo o embasamento técnico-científico necessário à formulação de estratégias sustentáveis em múltiplas escalas.

A estrutura deste relatório reflete essa abordagem integrada. Na primeira seção, apresentam-se os fundamentos da estrutura analítica e das estratégias metodológicas que orientaram as atividades do componente de economia, com destaque para a complementaridade entre modelos estruturais e empiricamente fundamentados. A segunda seção é dedicada aos resultados temáticos, organizados em dois grandes eixos: o **Eixo 1**, centrado nas avaliações *ex ante*, abrange desde a descrição detalhada da estrutura econômica até o uso de modelos preditivos e suas aplicações em cenários nacionais e internacionais; já o **Eixo 2** concentra-se nas avaliações *ex post*, com foco na mensuração empírica dos efeitos econômicos observados de eventos climáticos e intervenções de política pública. O capítulo se encerra com considerações finais que sintetizam os principais avanços e destacam as contribuições para o desenho de políticas públicas.

Estrutura Analítica e Metodologia

Por se tratar de um tema transversal, o trabalho desenvolvido no subcomponente de economia do INCT-MC2 foi organizado em dois grandes eixos metodológicos, cada um com abordagens complementares voltadas à análise dos impactos econômicos das mudanças climáticas:

Eixo 1 – Avaliações *ex ante*: As avaliações *ex ante* foram fundamentadas em modelos estruturais, como os de Insumo-Produto, Equilíbrio Geral Computável (EGC) e Modelos de Avaliação Integrada. Essas ferramentas permitiram a simulação de cenários futuros de mudança climática, possibilitando a mensuração de seus efeitos potenciais sobre setores e regiões específicas do país. Tais análises fornecem uma perspectiva estratégica e prospectiva, voltada à antecipação de riscos e à identificação de oportunidades relacionadas à transição climática.

Dentro desse eixo, duas metodologias principais foram continuamente aprimoradas ao longo da Fase 2, com contribuições relevantes de pesquisadores como o professor Fernando S. Perobelli (Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF), participante desde a primeira fase do INCT, e o pesquisador Inácio F. de Araújo Junior, que atuou de forma próxima nos últimos anos, além de outros pesquisadores.

A primeira metodologia refere-se à descrição numérica detalhada da estrutura econômica, viabilizando o mapeamento dos fluxos intersetoriais com alto grau de desagregação. Por meio da construção de sistemas de Insumo-Produto, obtém-se uma representação estática da

economia em determinado ano, útil para revelar padrões estruturais e relações econômicas. Essa base informacional permite, posteriormente, a introdução de teoria econômica para analisar os efeitos de choques diversos — como desastres naturais, eventos climáticos extremos, conflitos geopolíticos ou mudanças regulatórias.

A segunda metodologia foi desenvolvida com o objetivo de construir sistemas de informação capazes de alimentar modelos preditivos. A principal inovação foi a transição de uma abordagem puramente orientada por dados (*data-driven models*) para um arranjo integrativo baseado em modelos (*model-driven data*), promovendo um fluxo de informações em “via de mão dupla”. No modelo *data-driven*, parte-se de dados empíricos para identificar padrões e gerar modelos, enquanto no *model-driven*, a estrutura teórica define quais dados são necessários e como devem ser organizados. Essa interação contínua entre teoria e evidência empírica ampliou significativamente a capacidade de diagnóstico e simulação do componente de economia.

Eixo 2 – Avaliações *ex post*: O segundo eixo metodológico centrou-se nas avaliações *ex post*, com base em modelos econométricos e forte ênfase na identificação causal. Foram empregadas técnicas como Diferenças em Diferenças, Controle Sintético, Regressão com Descontinuidade e Variáveis Instrumentais, que permitiram isolar os efeitos específicos de eventos climáticos e intervenções públicas sobre variáveis econômicas e ambientais.

Integração entre os eixos: A complementaridade entre os dois eixos foi fundamental para a construção de um arcabouço analítico sólido. A articulação entre modelos estruturais e evidências empíricas permitiu cruzar perspectivas prospectivas e retrospectivas, unindo a capacidade preditiva das simulações com o realismo das observações históricas. Essa integração viabilizou a produção de resultados confiáveis, com elevada relevância prática e política, oferecendo bases qualificadas para decisões públicas em diferentes escalas — do nível regional ao internacional.

Resultados Temáticos por Eixo

As próximas subseções são dedicadas ao detalhamento dos estudos de acordo com o eixo metodológico proposto, *ex ante* ou *ex post*.

Eixo 1 – Avaliações *ex ante*

Os estudos *ex ante* permitem antecipar efeitos econômicos diretos e indiretos, simular cenários, avaliar riscos decorrentes dos resultados obtidos, e assim definir prioridades de ações.

Descrição numérica e detalhada da estrutura de uma economia

A aplicação das metodologias desenvolvidas no âmbito do INCT-MC2 não se restringiu ao contexto nacional. Ao contrário, sua robustez e flexibilidade possibilitaram sua transferência para diferentes países e regiões, consolidando um relevante agenda de cooperação internacional em modelagem econômica regional.

Atualmente, a abordagem tem sido empregada em estudos conduzidos em contextos tão diversos quanto Portugal (Açores), Angola, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Croácia, Egito, Equador, Grécia, Iraque, Líbano, Marrocos, México, Paraguai, Polônia, Arábia Saudita, Ucrânia e Peru. Cabe ressaltar que alguns estudos suscitam o INCT-MC1 já detalhados em relatórios anteriores; sendo assim, dedicaremos o espaço para apresentar os resultados concernentes ao INCT-MC2. – (Haddad; El-Hattab; Ali, 2017), (Haddad et al., 2020a), (Haddad; Gonçalves Júnior; Nascimento, 2017), (Haddad et al., 2020b), (Haddad et al., 2016), (Haddad, 2014), (Elshahawany; Haddad; Lahr, 2016).

Assim, essas experiências reforçam o papel do INCT-MC2 não apenas como centro de excelência nacional, mas também como polo de inovação metodológica e técnica em escala internacional, com capacidade de gerar impacto em múltiplos contextos socioeconômicos e institucionais.

Modelos preditivos

Além das matrizes inter-regionais, o componente de economia do INCT-MC2 também avançou no desenvolvimento e aplicação de modelos de EGC regionais e espaciais, com o objetivo de capturar os impactos econômicos de mudanças climáticas com maior granularidade territorial. Esses modelos permitem analisar efeitos diferenciados sobre setores e regiões específicas, incorporando heterogeneidades espaciais e encadeamentos econômicos complexos. A abordagem é particularmente útil na avaliação de impactos de desastres naturais, como demonstrado em estudos internacionais (Zhou; Chen, 2021), e foi amplamente aplicada no âmbito do INCT-MC2.

Essa linha de pesquisa dá continuidade a esforços anteriores de modelagem integrada no Brasil, como os realizados no contexto do estudo “Economia da Mudança do Clima no Brasil” (2010) (Margulis; Schmidt; Marcovitch, 2010), do qual participaram diversos pesquisadores do INCT. Nessa abordagem, a economia é concebida como a etapa final de uma cadeia de modelagem que integra impactos físicos, hidrológicos e ecológicos, traduzindo-os em variáveis econômicas e sociais. A estratégia metodológica adotada combinou essa visão integrada com o aprofundamento de parcerias específicas com outros grupos de pesquisa, possibilitando a adaptação dos modelos a diferentes problemas empíricos — como estimativas de perdas econômicas associadas à elevação do nível do mar, eventos extremos em áreas costeiras e projeções de custos climáticos em horizontes como 2050 ou 2070.

As interações entre os diferentes módulos abordados no estudo, destacando o modelo de EGC na análise dos impactos econômicos desencadeados pelo aquecimento global e ampliados pelas mudanças no clima. Cabe ressaltar que, ao mensurar os efeitos econômicos, o modelo fornece estatísticas essenciais para o planejamento e a formulação de políticas públicas, além de subsidiar a priorização de medidas voltadas ao desenvolvimento sustentável e à gestão adaptativa.

Seguindo essa lógica integradora entre abordagens estruturais e empíricas, e com base em parcerias interdisciplinares e internacionais, o componente de economia do INCT-MC2 construiu um arcabouço analítico sólido para a avaliação dos impactos econômicos das mudanças climáticas. A seguir, são apresentados os resultados mais relevantes desse processo de desenvolvimento, com ênfase nas evidências geradas e em sua aplicabilidade para a formulação de políticas públicas.

No que se refere às pesquisas desenvolvidas o desenvolvimento das atividades do subcomponente de economia do INCT-MC2 foi viabilizado, em grande parte, por financiamento complementar proveniente de projetos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), incluindo bolsas e auxílios vigentes ao longo da segunda fase do instituto. Esses recursos foram fundamentais para a continuidade da formação de recursos humanos e o aprofundamento das linhas de pesquisa estratégicas.

Atualmente, diversos projetos estão em andamento, ampliando o escopo temático e metodológico das investigações. O pesquisador Inácio F. de Araújo Júnior está finalizando seu pós-doutorado (2022–2025), com foco na avaliação integrada dos impactos de eventos extremos, por meio da articulação entre modelos EGC e análise de risco. A doutoranda Eduarda M. de Figueiredo desenvolve pesquisa sobre os impactos da diversidade de gênero no contexto das mudanças climáticas (2022–2025), contribuindo para a incorporação de aspectos sociais e distributivos nas análises econômicas.

O estudo em andamento (Visentin et al., 2025) avalia os impactos econômicos das anomalias hidrológicas sobre a agricultura irrigada no Brasil, com foco na viabilidade de seguros multianuais como instrumento de adaptação climática. A pesquisa integra quatro modelos — econométrico, hidrológico, de EGC e o Modelo de Transferência de Risco Hidrológico do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da USP (MTRH-SHS) (Mohor; Mendiondo, 2017) — para estimar os efeitos diretos e indiretos da escassez de Água Azul³ sobre setores econômicos e regiões hidrográficas. O estudo também contribui para a agenda de financiamento climático, em consonância com as diretrizes da *United Nations Environment Programme*

³ Água doce disponível em corpos hídricos superficiais e subterrâneos (Hoekstra et al., 2011).

Finance Initiative (UNEP FI), ao propor instrumentos financeiros voltados à resiliência hídrica e à segurança alimentar. Como legado, os avanços dessa pesquisa têm o potencial de serem incorporados ao novo INCT Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa (ONSEAdapta), coordenado por Suzana M. G. L. Montenegro (Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE) e Eduardo Mario Mendiondo (Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento Escola de Engenharia de São Carlos da USP), fortalecendo a integração entre economia, segurança hídrica e políticas públicas voltadas à adaptação climática.

Com relação às **pesquisas concluídas**, além das atividades centrais conduzidas no âmbito do INCT-MC2, o componente de economia foi significativamente fortalecido por projetos financiados por agências externas, especialmente a FAPESP, que viabilizaram bolsas e auxílios voltados à pesquisa, à formação de recursos humanos e à cooperação internacional. A seguir, destacam-se os principais projetos concluídos que contribuíram diretamente para o avanço metodológico e temático do programa.:

Exemplos de aplicações e resultados recentes

Como parte do avanço metodológico e da articulação com instituições parceiras, o componente de economia do INCT-MC2 gerou uma série de estudos aplicados com resultados concretos e relevantes para o debate sobre políticas públicas de adaptação e mitigação. A seguir, são apresentados oito exemplos representativos dessa produção recente:

(i) **Crescimento verde e transição energética:** Projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (406105/2022-7) e pelo Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), em parceria com o Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Faculdade de Ciências Econômicas (CEDEPLAR) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desenvolveu modelos econômicos para simular cenários de crescimento verde no Brasil, avaliando os impactos macroeconômicos de políticas sustentáveis e da implementação de um mercado de carbono regulado.

(ii) **Impactos econômicos da mudança do clima sobre a agricultura:** (Souza; Haddad, 2022) estimaram os impactos econômicos das mudanças climáticas no Brasil até 2100, com foco em seis culturas agrícolas. Os resultados indicaram perdas anuais no Produto Interno Bruto (PIB) entre 0,4% e 1,8%, com impactos indiretos superiores aos diretos, evidenciando a heterogeneidade regional e a necessidade de políticas públicas adaptativas.

(iii) **Economia Azul no Brasil:** O estudo de (Haddad; Araújo, 2025) estimou a contribuição da economia do mar (ou Economia Azul) para o PIB e o emprego no Brasil. Em 2019, as atividades diretamente ligadas ao oceano representaram 2,91% do PIB e 1,07% do emprego nacional. Quando considerados os efeitos indiretos e os encadeamentos produtivos, esses valores aumentam para 6,39% do PIB e 4,45% do emprego, com um multiplicador de 2,20 para o PIB e 4,16 para o emprego. Os resultados revelam forte heterogeneidade regional e setorial, com destaque para os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo, que concentram grande parte das atividades da Economia Azul. Importante notar que estados sem litoral também se beneficiam economicamente por meio das cadeias produtivas associadas. A professora Andrea Bento Carvalho, do ICEAC da FURG, tem atuado ativamente nessa agenda, representando os avanços da pesquisa em Economia Azul no âmbito do INCT-MC2.

(iv) **Impactos econômicos da escassez hídrica:** (Rocha, 2021) desenvolveu tese com o modelo *Brazilian Multisectoral and Regional/Interregional Analysis Model with Water Module* (BMARIA-H2O) para estimar os impactos econômicos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica nas 12 regiões hidrográficas brasileiras. As perdas econômicas variaram entre R\$ 12,3 bilhões (cenário realista) e R\$ 29,7 bilhões (cenário pessimista), afetando fortemente setores intensivos em uso de água.

(v) **Tributação, desmatamento e políticas públicas:** Uma frente recente e estratégica de pesquisa envolve a interface entre tributação, desmatamento e sustentabilidade ambiental, com

ênfase na formulação de propostas que possam orientar políticas públicas. A partir de 2024, com o apoio de recursos adicionais provenientes do *Bezos Earth Fund* (no âmbito da *Green Macroeconomic Modeling Initiative – GMMI*), do *Erasmus+ Programme* (Croácia), e de bolsas da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do CNPq para o Instituto de Pesquisas Econômicas (IPE) da USP, foi iniciado um projeto voltado ao desenvolvimento de modelos econômicos que avaliem os impactos potenciais da reforma tributária brasileira sobre o uso da terra e o desmatamento. O projeto conta com interlocução direta com o Ministério da Fazenda, fortalecendo o vínculo entre pesquisa aplicada e formulação de políticas públicas. A proposta promove a integração de subcomponentes temáticos — economia, segurança alimentar e ecossistemas — e aproveita a rede interinstitucional consolidada pelo INCT-MC2, envolvendo parceiros nacionais e internacionais, como CEDEPLAR-UFMG, Universidade Federal do Paraná (UFPR), UFRJ e *University of Split* (Croácia). Essa iniciativa amplia o escopo do componente de economia ao incorporar a dimensão fiscal como instrumento de governança ambiental e climática, buscando alternativas para alinhar eficiência tributária e preservação ambiental.

(vi) **Avaliação econômica de projetos e financiamentos verdes:** Em parceria com o Banco do Nordeste e outros bancos de desenvolvimento, o grupo desenvolveu ferramentas que integram a dimensão ambiental na análise de projetos financiados. As ferramentas avaliam indicadores como consumo de água, uso de energia e emissões associadas à cadeia produtiva, já incorporadas ao processo de avaliação de crédito no banco.

(vii) **Desastres naturais e avaliação de riscos sistêmicos:** (León et al., 2022) desenvolveram modelo probabilístico para avaliar impactos econômicos de terremotos com base em 44.350 simulações no Chile. A metodologia, aplicada também em países como Costa Rica, Essuatíni e Egito, mostra que as perdas econômicas indiretas podem superar os danos físicos diretos, destacando a importância da substituição produtiva e da resiliência regional. A abordagem tem sido usada amplamente pela *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) e outros organismos internacionais.

(viii) **Determinantes econômicos do desmatamento na Amazônia:** (Haddad et al., 2024c), na *Nature Sustainability*, mostraram que mais de 83% do desmatamento na Amazônia Legal é impulsionado por demandas externas à região, sendo quase 60% de origem doméstica (demanda do restante do Brasil). O estudo desmonta a narrativa dominante de que o desmatamento é majoritariamente exportado, apontando para o consumo interno como principal vetor. Os autores recomendam políticas de rastreabilidade e reformas fiscais para mitigar esse impacto.

Internacionalização de modelagens e avaliação econômica de desastres climáticos

As metodologias desenvolvidas pelo subcomponente de economia do INCT-MC2 têm sido amplamente aplicadas e adaptadas em contextos internacionais, demonstrando sua robustez e flexibilidade analítica. A seguir, destacam-se quatro experiências recentes que ilustram a capacidade dessas ferramentas de contribuir para o diagnóstico e a formulação de políticas em diferentes países e contextos de desastre.

(i) **Cooperação com o Banco Central da Colômbia:** O livro *The Colombian Economy and Its Regional Structural Challenges: A Linkages Approach* (Haddad; Bonet; Hewings, 2023) é resultado de uma parceria com o Banco da República da Colômbia. Utilizando modelos de equilíbrio geral computável adaptados da experiência brasileira, a obra aborda os desafios estruturais regionais da Colômbia em três dimensões: competitividade da oferta, fragilidades da demanda e sustentabilidade socioambiental. Os capítulos incluem análises sobre integração global, capital humano, desigualdades regionais e transferência de renda interterritorial, com recomendações relevantes para países latino-americanos com desafios semelhantes.

(ii) **Avaliação de riscos em cidades portuárias do Egito:** Em colaboração com o Banco Mundial, (Haddad et al., 2025) aplicaram um modelo inter-regional de EGC para estimar os impactos econômicos de inundações catastróficas em Alexandria, Damietta e Port Said. O

estudo combina dados econômicos e mapas globais de risco para simular perdas sob diferentes cenários climáticos. No cenário pessimista (SSP5-RCP8.5⁴), estimaram-se perdas locais de até US\$ 61,8 milhões. Os resultados reforçam a importância de investimentos em infraestrutura resiliente em áreas urbanas portuárias.

(iii) **Terremoto de 2023 no Marrocos:** Após o terremoto que atingiu o Marrocos em setembro de 2023, o governo solicitou apoio técnico para avaliar os impactos econômicos do desastre e da reconstrução. Os estudos *Assessing the Economic Impacts of Al-Haouz Earthquake* e *Economic Impacts of the 2023 Earthquake in Morocco* (Haddad et al., 2024a) e (Haddad et al., 2024b) estimam perdas de 0,24% do PIB nacional e mais de 10% no produto regional de Al-Haouz. Com simulações contrafactuais, os autores demonstram que o plano de reconstrução — orçado em 120 bilhões de dirhams — pode gerar efeitos positivos significativos nas regiões afetadas, especialmente quando os investimentos são alinhados a planos de desenvolvimento regional. O estudo destaca ainda como a escala do desastre e a disponibilidade de recursos influenciam a velocidade e o alcance da recuperação.

(iv) **Enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul:** A expertise acumulada foi aplicada recentemente ao caso das enchentes no Rio Grande do Sul. O estudo de (Simões, 2025) estima, por meio de modelos inter-regionais de insumo-produto e EGC, os impactos econômicos diretos e indiretos das perdas de produtividade agrícola. Com base em um índice municipal de perdas, os resultados apontam para impactos sistêmicos significativos: os R\$ 8,5 bilhões em perdas diretas nas culturas de soja, milho e arroz geram um impacto equivalente a até 0,14% da produção nacional, com multiplicador médio de 3,5 vezes. Os efeitos são especialmente severos no interior do estado, reforçando a necessidade de políticas públicas regionalmente orientadas.

Eixo 2 – Avaliações *ex post*

O Eixo 2 do subcomponente de economia do INCT-MC2 concentrou-se em avaliações empíricas de impacto com forte ênfase em estratégias de identificação causal. A seguir, destacam-se quatro canais temáticos de integração e seus respectivos estudos.

(i) **Regulação e fiscalização ambiental: impacto da suspensão de inspeções na exportação de madeira nativa:** O estudo “Passando a boiada: efeitos da suspensão da inspeção de exportações de produtos de madeira nativa” (Araújo; Féres, 2024) avalia os impactos da decisão do Ibama, entre 2020 e 2021, de suspender exigências de inspeção para exportações de madeira nativa. A análise, baseada em dados de desmatamento do Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER) desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), comércio e custos de transporte, identifica um aumento de 10,5% nas exportações e crescimento de áreas associadas à extração ilegal. Os resultados reforçam a importância de sistemas robustos de rastreabilidade e fiscalização para garantir sustentabilidade e acesso a mercados internacionais.

(ii) **Sustentabilidade agrícola: uso de pesticidas e eficiência produtiva:** Em “*Pesticide Use in Brazil: Virtuous or Vicious Cycle?*” (Rodrigues; Féres; Coelho, 2023), os autores avaliam a eficiência do uso de agrotóxicos com base nos Censos Agropecuários de 2006 e 2017. Utilizando modelos de função de produção com controle de danos, o estudo mostra que mais de 75% dos municípios fazem uso excessivo de pesticidas. Acesso ao crédito aumenta esse uso, enquanto práticas sustentáveis e cooperativas têm efeito moderador. O trabalho aponta para um ciclo vicioso de dependência química e propõe políticas públicas que incentivem a transição agroecológica.

⁴ SSP5-RCP8.5 é um cenário climático extremo utilizado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) que descreve um futuro com rápido crescimento econômico impulsionado pelo uso intensivo de combustíveis fósseis, o que leva a altas emissões de gases de efeito estufa e grandes desafios para mitigação. Ele representa uma trajetória de emissões elevadas, com forçamento radiativo atingindo cerca de 8,5 W/m² até 2100 e concentração de gases de efeito estufa (CO₂ equivalente) chegando a aproximadamente 1370 ppm, pressupondo crescimento contínuo das emissões e poucos esforços para reduzi-las (Haddad et al., 2025).

(iii) **Produtividade urbana e choques climáticos: efeitos das ondas de calor sobre o trabalho urbano:** O estudo de (Oliveira; Paliolol; Pereda, 2021) representa uma contribuição importante para a análise dos efeitos das mudanças climáticas em áreas urbanas — ainda pouco estudadas em comparação ao meio rural. Os autores mostram que choques de temperatura afetam negativamente a produtividade do trabalho urbano, medida por salários. Os resultados abrem caminho para futuras pesquisas sobre os impactos econômicos de ondas de calor em cidades, com implicações para saúde, produtividade e desigualdade urbana.

(iv) **Mobilidade, inundações urbanas e produtividade: tempo de deslocamento em São Paulo:** (Vieira; Haddad, 2020) desenvolveram o *Weighted Travel Time Index* (TTI), utilizando dados da plataforma Uber Movement e uma pesquisa domiciliar de mobilidade na Região Metropolitana de São Paulo. O índice permite medir atrasos por congestionamento com alta resolução temporal e espacial. Entre 2016 e 2018, a média de congestionamento foi de 34,88%, com picos de 55,4% no período da tarde. O estudo quantificou os efeitos de eventos como chuvas intensas e greves, estimando o custo econômico dos atrasos. A ferramenta é de baixo custo e útil para políticas públicas de mobilidade e adaptação climática.

Entre os exemplos de aplicações e resultados recentes, destacam-se:

(i) **Avaliação fiscal e conservação ambiental:** (Ruggiero et al., 2022) investigaram os efeitos do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) Ecológico sobre a criação de Unidades de Conservação (UCs) na Mata Atlântica, demonstrando impactos positivos iniciais, mas com efeito decrescente à medida que mais áreas são protegidas. O estudo revela tensionamentos entre objetivos estaduais e prioridades municipais na conservação ambiental.

(ii) **Política tributária e sustentabilidade:** (Moz-Christofolletti; Pereda, 2021) avaliaram os efeitos distributivos e ambientais de políticas fiscais energéticas no Brasil. Impostos sobre gasolina e diesel mostraram-se progressivos e eficazes na redução de emissões, enquanto subsídios ao etanol foram mais equitativos, embora com menor impacto ambiental isolado. Esses estudos demonstram o potencial das abordagens *ex post* para avaliar políticas e eventos em contextos diversos — do desmatamento e uso agrícola à mobilidade urbana e mudanças climáticas — utilizando dados observados e técnicas estatísticas avançadas para inferência causal. A integração dessas evidências com os modelos estruturais do Eixo 1 fortalece a capacidade de resposta do componente de economia a desafios climáticos e socioeconômicos.

Considerações finais

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo demonstram a relevância e a maturidade alcançadas pelo componente de economia do INCT-MC2 no reconhecimento sistêmico da economia nacional e regional, tanto brasileira e de países da África, Europa, América do Norte e América do Sul, proporcionando a estruturação de uma base dados robusta para o subsídio do enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. A combinação entre metodologias estruturais e empíricas mostrou-se capaz de mensurar impactos econômicos em múltiplas escalas e sob diferentes perspectivas — prospectivas e retrospectivas, nacionais e internacionais, setoriais e inter-regionais.

A integração entre modelos de equilíbrio geral computável, abordagens econométricas e sistemas interdisciplinares de dados possibilitou o desenvolvimento de estudos aplicados com impacto concreto no debate de políticas públicas, contribuindo para a formulação de estratégias de mitigação, adaptação e transição sustentável. Destaca-se, ainda, o papel desempenhado pelo subcomponente de economia na formação de recursos humanos qualificados e na internacionalização da agenda científica brasileira, por meio de parcerias com instituições acadêmicas e organismos multilaterais.

Como desdobramento natural das atividades realizadas, o subcomponente deixa um legado importante: um arcabouço metodológico replicável, uma rede de pesquisa colaborativa ativa e uma agenda de investigação com forte capacidade de resposta a temas emergentes. O trabalho desenvolvido ao longo da Fase 2 do INCT-MC2 estabelece, assim, bases sólidas para a

continuidade e expansão das análises econômicas aplicadas às mudanças climáticas, com potencial crescente de contribuição científica e impacto social.

4.7 Segurança alimentar

Introdução

O setor agrícola é particularmente sensível à variabilidade e às alterações climáticas e a agricultura é um dos pilares da economia do Brasil. Representando cerca de 25% do PIB, constitui o suporte dos meios de subsistência e da segurança alimentar de 70-80% da população, em especial nas zonas rurais. Portanto, é urgente uma abordagem mais ampla com das mudanças climáticas e de seus impactos na agricultura pela potencial vulnerabilidade à variabilidade climática, especialmente na região onde os rendimentos são mais baixos, o que tem forte impacto na segurança alimentar. Com uma visão mais abrangente dos impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar, neste capítulo serão avaliadas as questões que envolvem a relação entre clima-agricultura-pecuária-economia e as implicações no Brasil.

Os impactos das mudanças climáticas e suas variabilidades, com implicações na agricultura, pecuária e economia, tem estreita relação com a produção de alimentos e os mercados que o regulam. No final deste processo está então a segurança alimentar.

As questões relacionadas com a segurança alimentar e as alterações climáticas têm sido cada vez mais debatidas e analisadas por investigadores de diferentes áreas do conhecimento. Estas duas questões representam importantes desafios para a população mundial e envolvem diretamente o setor agrícola e as suas relações com outros setores econômicos. Como a demanda por produtos agrícolas crescerá com o aumento da população e da renda nas próximas décadas, ações setoriais podem contribuir significativamente para as metas internacionais de redução e estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Especificamente, é consenso que, por meio de uma gestão adequada e de uma agricultura regional, práticas alternativas no setor de agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use) podem contribuir grandemente para mitigar as emissões de GEE.

Os sistemas produtivos baseados na intensificação sustentável da produção agrícola passam necessariamente por uma abordagem integrada entre as alterações climáticas, as ações de adaptação e a mitigação das emissões de GEE. A identificação de sinergias entre mitigação e adaptação no setor AFOLU é essencial, pois a segurança alimentar e os impactos das alterações climáticas no setor agrícola requerem ações integradas. O efeito combinado das estratégias de atenuação e adaptação é maior do que quando estas medidas são aplicadas individualmente. Além disso, a maioria das técnicas de mitigação atualmente utilizadas na agricultura foi originalmente concebida como "estratégias de gestão ótima", destinadas a melhorar a estabilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas a longo prazo, gerando cenários do tipo "win-win". Por exemplo, no Plano ABC está previsto a expansão da área utilizada com sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) em quatro milhões de hectares. O governo lançou o "Programa Nacional de Recuperação de Pastagens Degradadas" MAPA(2024) com objetivo de recuperar 40 milhões de hectares de pastos, transformando-os em sistemas produtivos. Espera-se que com essas ações, os impactos na oferta de alimentos sejam minimizados.

Esses sistemas possibilitam, entre outras consequências, a fixação de carbono e a redução de emissão de óxido nitroso e, conseqüentemente, a redução das emissões de GEE's. Da mesma forma, a estratégia adaptativa se configura por proporcionar maior produtividade e maior resiliência dos sistemas agrícolas, tornando os produtores menos vulneráveis às mudanças climáticas. Além do aprimoramento de aspectos técnicos e, principalmente, da aplicação de tecnologias para aumentar a produtividade dos alimentos, é necessário estimular a reflexão sobre a contribuição da agricultura familiar para garantir a segurança alimentar em escala global, assim como investigar quais são os desafios no Brasil para a segurança alimentar. Para tanto, é necessário fazer valer a inserção do tema na agenda política das organizações de agricultores familiares no Brasil (CONTAG 2024) por meio da análise dos resultados das políticas e programas que visam aproximar produtores e consumidores no país. Além disso,

investigar os conflitos entre a agricultura familiar e as variações de preços no mercado pode contribuir para reduzir a vulnerabilidade dos agricultores.

A explicação dessas evidências empíricas pode levar à compreensão da estreita ligação entre agricultura e segurança alimentar. Assim, neste capítulo busca-se analisar como as medidas de mitigação no setor agrícola podem contribuir para a redução da vulnerabilidade às alterações climáticas da agricultura brasileira. Além de todas as questões de segurança alimentar e intensificação agrícola sustentável, a análise de políticas cujo foco é a redução de GEE é importante na medida em que pode afetar outros países, positiva ou negativamente, por meio do comércio internacional.

Apesar do grande número de projeções climáticas disponíveis a partir de modelos climáticos globais e regionais, ainda existe uma grande incerteza nas projeções climáticas em várias regiões da América do Sul, e mais especificamente do Brasil. Algumas áreas podem apresentar condições mais úmidas, outras são mais secas, mas a fronteira entre elas ainda não está bem definida. Em muitas partes do Brasil isto pode levar a uma deficiência de água devido à diminuição da precipitação e/ou ao aumento da evapotranspiração, conduzindo a uma redução estimada da disponibilidade de água *per capita*, o que pode resultar num aumento significativo da insegurança alimentar devido a impactos na produção de alimentos.

Neste relatório num primeiro momento foram avaliadas as variações espaciais dos principais elementos climáticos que têm relação direta com a agricultura. Em seguida, serão analisados os impactos dos principais componentes da cesta básica do brasileiro, ou seja, arroz, feijão, trigo e mandioca até o ano de 2050. Posteriormente, será feita uma avaliação dos impactos na produção de *commodities*, mais especificamente, soja e milho. Por fim, será apresentada uma avaliação sobre a ocorrência e distribuição de pastos degradados no Brasil, que podem ser reconvertidos em áreas produtivas, minimizando os impactos na oferta de alimentos.

Cenários atuais e projetados de variáveis climatológicas no Brasil entre 1986 e 2050

Esta análise espaço-temporal foi a primeira feita no início do estabelecimento do INCT 2-Mudanças Climáticas. Os dados climatológicos foram levantados, organizados e padronizados para todo o território brasileiro. As variáveis consideradas para o período de 01/01/1980 a 31/12/2015 foram evapotranspiração de referência (ET_o em mm), precipitação (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), radiação solar (kWh/dia/m²), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), utilizando a base de dados *Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)* (XAVIER et al, 2016). Esta grade de dados climáticos é estimada a partir de dados das estações meteorológicas terrestres no Brasil que são operadas por agências federais brasileiras (INMET e ANA) e pelo departamento de águas e energia elétrica do Estado de São, num total de 3.625 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas de controle. Informações climatológicas como precipitação futura (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) são obtidas a partir do modelo HADGEM2-ES, de 1970 a 2100.

Dado o grande número de modelos climáticos globais existentes e da divergência observada entre eles, é imprescindível utilizar uma metodologia de avaliação do comportamento dos modelos que seja capaz de identificar os que representam adequadamente a região de interesse. O desenvolvimento do modelo HadGEM2 resultou em um modelo de sistema terrestre de ferramenta científica útil para prever clima futuro e entender as dinâmicas climáticas dentro o sistema Terra (COLLINS et al, 2011). Este modelo foi estabelecido considerando a dinâmica dos ciclos de carbono terrestre e de carbono oceânico, a química atmosférica, os aerossóis, a radiação química e a hidrologia química, descritos por Martin (2011).

A integração do modelo seguindo o protocolo 5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* ou CMIP5) sugere que a representação das condições atuais também é satisfatória (COLLINS et al, 2011).

Utilizando os 14 modelos de projeção climática indicados no CMIP5 para toda a cobertura geográfica brasileira, nos cenários RCP4.5 e RCP 8.5, Marcos Junior et al. (2018) obtiveram como as projeções de temperatura, precipitação e evapotranspiração ao longo do século XXI para o Brasil. As regiões mais afetadas pela elevação da temperatura média anual são o Norte e

o Centro-Oeste. Contudo, espera-se aumento destas variáveis para todo Brasil. O mesmo comportamento é esperado para a evapotranspiração, que reflete o aumento da demanda futura por mais água destinada às áreas de irrigação. Com relação à precipitação obtida, projeta-se que nas regiões Norte e Nordeste haja diminuição das precipitações ao longo do século, enquanto para as demais regiões a maioria dos modelos indica aumento nas médias anuais.

Essas duas bases de dados, Xavier e HADGEM2-ES, foram comparadas com os dados climatológicos medidos através do método de Kolmogorov-Smirnov (K-S) que atesta o grau de concordância entre os dados medidos e os dados observados.

Apoiado no método K-S, o balanço hídrico para cada estação meteorológica foi realizado para os períodos de 1986-2015, 2006-2015, 2021-2030 e 2030-2040. A espacialização para avaliação da deficiência hídrica para todo o território brasileiro ao longo dos anos foi feita através da ferramenta de krigagem ordinária, utilizando as ferramentas estatísticas de um sistema de informações geográficas (SIG).

Os resultados mais importantes obtidos no subcomponente agricultura do INCT Fase 2, em 2019, foi finalizar a organização dos dados espaciais referentes ao uso da terra e simular o balanço hídrico para todo o Brasil, em uma grade regular de 25 km, para os anos de 1986-2005, 2005-2015, 2020-2030, 2030-2040 e 2040-2050, utilizando o modelo HADGEM2-ES. Com o avanço do projeto, para avaliar os impactos na produtividade, utilizou-se o modelo mais recente, ou seja, o HadGEM3-GC31-MM.

O balanço hídrico climatológico (BHC) é a metodologia usualmente empregada para monitorar a quantidade de água armazenada no solo ao longo das estações do ano, que variam em função da perda e reposição de água. O BHC contabiliza a quantidade de entrada e saída de água numa região, no período de 30 anos, conhecido também por normal climatológica, e o sucesso de aplicação da ferramenta depende das variáveis locais (DANTAS et al., 2007).

A demanda por água em cenários futuros pode ser prevista através no balanço hídrico projetado, ou seja, aplica-se a metodologia para uma dada condição inicial e, então, comparam-se os resultados a um conjunto de dados climáticos futuros (GONDIM, 2011; PONPANG-NGA, 2016).

A partir dos resultados do balanço hídrico, foram obtidos os mapas de deficiência hídrica que indicam quais áreas serão mais afetadas pelo aumento da temperatura e redução das chuvas.

A sequência de etapas para elaboração da metodologia para projeções climáticas está sujeita a inúmeras incertezas que são agregadas ao processo de modelagem matemática. Contudo, apesar de tais limitações, esta é a metodologia que vem sendo utilizada para quantificar os efeitos da interferência de ações antrópicas no sistema climático com a finalidade de propor estratégias de mitigação e adaptação aos novos cenários (TORRES, 2014).

Para prever a influência das mudanças do clima na agricultura, as projeções climáticas elaboradas por etapas de modelagens matemáticas consideram também as forçantes radiativas, conhecidos como RCPs, que consistem de séries temporais de concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa e aerossóis. Os RCPs foram selecionados para abranger uma variedade de futuros viáveis, desde os otimistas, nos quais a forçante radiativa decorrentes de ações antrópicas é reduzida (RCP 2.6), até situações pessimistas (RCP 8.5). Há também os cenários intermediários, como no caso do RCP 4.5 (LIDDICOAT et al 2013).

Em geral, 85% da produtividade das culturas depende diretamente da maior ou menor deficiência de água no solo.

A evapotranspiração na média climática varia de 801 mm a 2.287 mm no Brasil, sendo a ETP total máxima de 2.465 mm, 2.901 mm e 2.877 mm para as séries históricas 2006-2015, 2021-2030 e 2031-2040, respectivamente. Enquanto a mínima é de 749 mm para 2006-2015 e manteve-se no índice de 826 mm para 2021-2030 e 2031-2040 na média para todo território.

A utilização de séries de dados meteorológicos comparadas à normal climatológica permite a comparação direta entre a condição do período base (“atual”) com cenários futuros. Portanto, utilizando um dos cenários futuros do IPCC, como o presente no modelo HadGEM2-ES, com a forçante RCP8.5, observam-se os seguintes impactos: aumento da temperatura, aumento da evapotranspiração potencial, redução do excedente hídrico e aumento da deficiência hídrica. Essa tendência permite uma proposição de modelo de organização territorial junto com soluções alternativas, para resolver ou minimizar o quadro levantado pelas emergências climáticas.

Projeção da produção das culturas de arroz, feijão, trigo e mandioca

Em função da avaliação de parâmetros fortemente influenciados pelas mudanças climáticas, é importante verificar qual foi a evolução da oferta de alimentos, em termos de produção agrícola, para alguns componentes da cesta básica, como, arroz, feijão, trigo e mandioca, que têm importante relação com a segurança alimentar. Posteriormente foi feita uma projeção do possível aumento dessa oferta de alimentos a partir do uso de práticas mais sustentáveis.

Arroz:

O arroz é um produto básico da alimentação do brasileiro e está presente no consumo alimentar em todas as regiões do Brasil. Projeta-se que a oferta deste grão se manterá estável, acompanhando o crescimento populacional, com ligeira retração próximo a 2050, quando se espera uma desaceleração do crescimento populacional no Brasil.

As projeções do MAPA indicam uma produção de 12,2 milhões de toneladas em 2050, em uma área de aproximadamente 1,6 milhão de hectares. Dado o histórico da produção de grãos e uso da terra no Brasil, espera-se que o arroz, juntamente com o feijão, percam área em relação a outras culturas como soja e milho. Do mesmo modo, espera-se que a menor área seja compensada com ganhos de produtividade, estabilizando a produção em cerca de 1,6 milhão de hectares.

Feijão

Assim como no caso do arroz, as projeções indicam uma estabilidade no consumo do feijão, com ligeira retração próximo a 2050, acompanhando a desaceleração do crescimento populacional no Brasil.

As projeções indicam uma produção de cerca de 3 milhões de toneladas em 2 milhões de hectares em 2050. Espera-se uma redução da área em relação às outras culturas devido à pressão da expansão de soja e milho. Essa perda de área será compensada por ganhos de produtividade através da ampliação da utilização da tecnologia de fixação biológica de nitrogênio em leguminosas.

Trigo

A produção de trigo foi de 6,3 milhões de toneladas em 2020, utilizando uma área de 2,4 milhões de hectares. Projeta-se um aumento da demanda internacional do trigo até 2050, ocasionado pelo crescimento populacional e vulnerabilidade climática da cultura em diferentes regiões do mundo. Projeta-se portanto um crescimento vigoroso da produção via exportações, pressionado pela maior demanda externa até 2050.

Espera-se que o trigo ganhe área em relação às demais culturas nas regiões onde a irrigação e o desenvolvimento de novas cultivares têm proporcionado um aumento significativo de produtividade. Projeta-se uma área de até 3,7 milhões de hectares em 2050. Portanto, em função da conjuntura nacional e internacional, o trigo é uma cultura cuja projeção indica um aumento da oferta de grãos.

Mandioca

A produção de mandioca em 2020 foi de aproximadamente 18 milhões de toneladas em 1,2 milhão de hectares. A mandioca é amplamente utilizada no dia a dia do brasileiro; contudo os dados históricos mostram que a produção vem perdendo espaço na competição pelo uso do solo com outras culturas. Diversos fatores que afetam tanto o lado da oferta, como preço e variabilidade climática, quanto o lado da demanda, como renda dos consumidores, por exemplo, estão contribuindo para esse efeito na produção de mandioca. Até 2050, a mandioca perderá área em relação às demais culturas comerciais. Projeta-se uma produção de cerca de 16,2 milhões de toneladas até 2050 em uma área de cerca de 1 milhão de hectares. A redução na produção de mandioca reflete a retração da demanda, a

medida que as famílias migram para fontes de carboidratos mais atrativas (arroz e derivados do trigo, por exemplo) com o aumento esperado da renda.

Analisando-se todo o período e todas as culturas, percebe-se que haverá uma retração da área plantada principalmente para as culturas de arroz, feijão e mandioca e um pequeno acréscimo na área de milho. Isso significa que pouco a pouco essas áreas serão substituídas por *commodities* como soja e milho e isso certamente terá reflexo na oferta de alimentos. A figura 12 ilustra a projeção das áreas plantadas até o ano de 2050 para várias culturas do Brasil.

As projeções da produção e da área das principais culturas mostram que a área plantada no Brasil deve ultrapassar 100 milhões de hectares em 2050. Essa expansão está concentrada em soja, milho (segunda safra) e, cana-de-açúcar (não mostrado na figura 12). Parte do aumento da produção de milho e algodão deve se dar na área de soja. Algumas lavouras, como arroz, feijão e mandioca, devem perder área. Naturalmente, uma parcela da expansão de área de soja, milho e cana-de-açúcar deverá ocorrer sobre novas áreas e substituição de outras lavouras. Essa expansão também poderá ocorrer em áreas de pasto degradado. Contudo, é de suma importância que haja uma aceleração da conversão, por falta de manejo, de áreas de pastagens de baixa ou baixíssima produtividade em áreas de lavouras ou em sistemas integrados de produção.

Até 2050, há necessidade de acomodar uma expansão de cerca de 45,6 milhões de hectares em áreas de lavouras. Essa expansão implica em um incremento de 37 milhões de hectares à área atual de soja e cerca de 6 milhões de hectares à área atual de milho. A redução da pressão pela extensão da área de lavouras no Brasil passa obrigatoriamente pela ampliação de técnicas e tecnologias que aumentam a produtividade da terra sem a necessidade de novas áreas. A ampliação do Sistema de Plantio Direto de alta qualidade, associado com sistemas integrados de produção podem colocar a produtividade dos grãos em um novo patamar. Adicionalmente, o avanço rápido da pesquisa, inovação e tecnologia de novos cultivares deve ampliar a adoção da fixação biológica de nitrogênio em leguminosas (feijão) e gramíneas, contribuindo com a produtividade de milho, arroz e pastagens.

Uma avaliação rápida sobre o consumo de alimentos no Brasil, principalmente no que diz respeito a alguns itens da cesta básica, indica que o brasileiro está se alimentando menos. Na evolução do consumo de arroz, feijão, mandioca e trigo, entre os anos de 1985 e 2020, em todos os casos, o consumo em kg/habitante caiu. O mais acentuado foi na mandioca, a base da alimentação nas regiões Norte e Nordeste.

Com o aumento da temperatura e da oferta de chuva, a situação da produção de alimentos pode ser afetada. Nos últimos cinco anos o que se observou foi forte impacto das mudanças do clima na produção de soja e milho, reduzindo a safra em mais de 25 milhões de toneladas.

impactos na produtividade dos grãos

Os dados utilizados para estimativa de perdas de produtividade das culturas foram extraídos de dois modelos meteorológicos distintos, um focado na modelagem meteorológica do passado (Xavier et al., 2016) e Xavier et al., 2022) e o outro (HadGEM3-GC31-MM) que tem por objetivo de modelar as tendências futuras dos fatores climáticos, principalmente temperatura e precipitação. A avaliação do regime hídrico é contabilizada pela precipitação e as perdas pela evapotranspiração, considerando a variância temporal em intervalos sequenciais e decadais. Além disso, são considerados três cenários do sistema radicular, com profundidade rasa (75 mm), média (100 mm) e mais profunda (125 mm) para determinação do volume de água. Devido ao grande volume de dados, todas as etapas de processamento foram conduzidas por meio de uma estrutura que automatiza o cálculo do balanço hídrico em todas as mais de 11 mil estações meteorológicas virtuais do chamado modelo (Xavier et al., 2022). Os produtos resultantes foram exportados como resultados de uma única estação, para cada valor de capacidade hídrica disponível (representando a profundidade do sistema radicular) e para cada década, bem como para todo o período. Para se estimar as perdas de produtividade futuras, são utilizados os dados do Modelo CIMIP6 corrigido. Assim é possível verificar o impacto na produtividade nos próximos anos (2020 a 2050).

Apesar dos grandes avanços científicos no uso do geoprocessamento de imagens de satélite para estimar a área de culturas agrícolas, ainda não existe um método mecânico para avaliar as perdas na produtividade. Assim, são utilizados os seguintes parâmetros de culturas:

- Duração do ciclo vegetativo, subdividido em fases fenológicas, pela identificação de períodos críticos (estágios), como período inicial, desenvolvimento da cultura, meia estação e final da estação;
- Kc (coeficiente de cultura), como método de definição da demanda de água da planta;
- Profundidade do sistema radicular, particularmente importante para estimar a capacidade de água disponível (CAD).

A estimativa da produtividade é feita a partir da equação de Doorembos & Kassan (1977):

$$PR = [1 - K_y(1 - ETR/ET_o * K_c)] * PPf \quad [Eq. 2]$$

Onde:

- PR = produtividade real,
- PPf = produtividade potencial final, e
- Ky = coeficiente de ajuste.

No caso do Ky, como estamos trabalhando no Brasil todo, inicialmente vamos utilizar Ky=1, quando a produtividade é diretamente proporcional a redução do uso da água.

Este método foi utilizado para avaliar perdas na agricultura em função das mudanças climáticas foi em Assad e Pinto (2008), utilizando o modelo PRECIS do IPCC. As avaliações das perdas foram feitas até o ano de 2070. Já em 2007, o modelo indicava que em 2020 poderia haver perdas em grãos na região Sul, no valor de 7 bilhões de reais. Neste caso, houve um erro no valor absoluto. Segundo a Conab (2023), em 2020 a projeção do montante perdido no Brasil correspondeu a 36,7 milhões de toneladas. Equivalente a uma perda de R\$84,8 bilhões.

Os cenários de avaliação de perdas foram se ajustando em função dos novos modelos climáticos lançados pelo IPCC. Assad et al. (2016), a partir relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), e utilizando as simulações dos modelos mais recentes referentes aos cenários das mudanças do clima até o ano de 2100, fizeram projeções de impactos para as principais culturas brasileiras e que dizem respeito à agricultura familiar, como milho, milho safrinha, feijão e arroz, e de quão vulneráveis estão estas culturas se a temperatura continuar subindo nas atuais taxas (0,3°C) por década. Ao mesmo tempo, foi feito um esforço de caracterizar os eventos extremos que vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos. Projeções para os próximos anos referentes à frequência de ocorrência de temperaturas diárias superiores a 34 °C foram feitas para todo o país, e atingem todos os agricultores. Isso foi feito para as chuvas extremas, ou seja, estimadas as frequências de ocorrência de chuvas intensas em todo o país, o que tem consequências imediatas na desestruturação e na erosão dos solos e em perdas de fertilizantes, além de perda de produtividade das culturas. Todas as simulações foram feitas a partir dos modelos do último relatório do IPCC AR5, com os cenários extremos RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados desta simulação feita em 2016 mantiveram as tendências de perdas acentuadas na agricultura, que segundo a CONAB seguiram um padrão de 15% de perdas na safra.

Em oito anos em dez houve perdas no Rio Grande do Sul (Figura 14). Estes resultados indicam que não se trata de um fenômeno cíclico, pois foram observadas perdas nos anos de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016 e 2020. Segundo os resultados dos modelos agrometeorológicos, utilizando os dados do CIMIP6 indicados na Tabela 2, em todos os casos, o impacto na produtividade é negativo, o que indica uma possível redução na oferta de alimentos se as práticas atuais de produção forem mantidas. Entretanto, com a adoção de práticas agrícolas do programa ABC, da agricultura regenerativa e a intensificação da produção, o que se tem observado é um aumento da produtividade, especialmente da soja e do milho.

Com o uso de modelos matemáticos calibrados para as condições do Cerrado, Macena et al. (2024) conseguiram simular as emissões de óxido nitroso (N₂O), sob diferentes sistemas de manejo para um período de 50 anos. Os autores constataram que, com o aumento da temperatura ao longo do tempo, essas emissões serão cada vez maiores, enquanto a produção de

biomassa e o rendimento de grãos diminuirão. Esses resultados pela via da emissão dos GEE mostram claramente que haverá perdas na produção de grãos no Brasil, e, portanto, comprometendo a segurança alimentar.

Pastagens e emissões da pecuária

Segundo o MAPA(2024), o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD), instituído pelo Decreto nº 11.815 de dezembro de 2023, solidifica o compromisso do Brasil com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Paris, por meio da promoção de políticas e ações para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e adaptação às mudanças climáticas. Este programa surge em um contexto no qual há o entendimento de que a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais estão integrados à promoção da segurança alimentar e nutricional, bem como ao desenvolvimento econômico do país.

Em relação à pecuária bovina, em 2022, o país registrou um rebanho de 234,3 milhões de cabeças (IBGE, 2022)¹, produzindo 8 milhões de toneladas de carne (IBGE, 2024)². Deste total, 2,9 milhões de toneladas foram exportadas, representando 22,9% das exportações mundiais (FAO, 2023)³. Para sustentar essa produção, a pecuária brasileira ocupa uma área de 179 milhões de hectares de pastagens (LAPIG, 2022). No entanto, mais de 60% dessas pastagens encontram-se com baixo ou médio vigor (degradadas ou em processo de degradação), resultando em baixa produtividade e elevadas emissões de GEE. A conversão dessas áreas degradadas em sistemas de produção sustentáveis é crucial para a preservação dos biomas, a redução das emissões e o aumento da produtividade agropecuária.

Outra consideração é que, a partir dos avanços científicos nos sistemas de produção de soja e milho, é possível indicar que o aumento da produção dessas culturas deverá ocorrer pela conversão de áreas de pastos degradados. Com esta estratégia é possível adotar sistemas integrados de produção, onde numa mesma área é possível praticar duas lavouras e aumentar a produtividade da carne, com redução de emissão de GEE.

O bioma Cerrado é um bom exemplo de possível adoção dos sistemas integrados. No início da ocupação do Cerrado brasileiro, com a introdução do plantio da soja, as cultivares eram de ciclo longo com produtividade em torno de 1,7 toneladas por hectare (Arantes e Souza, 1993). Atualmente a produtividade média no Cerrado passou de 2,9 t.ha⁻¹ a 3,26 t.ha⁻¹ (PAM 2022). Esses resultados oficiais indicam um ganho médio de produtividade superior a 170%, ou seja, superior a 4% ao ano. Entretanto esses ganhos vêm diminuindo e estão no patamar de 1,2%. Plantando uma única safra por ano, com as práticas de preparo, adubação, plantio e colheita, significa utilizar 42% do tempo útil do cultivo agrícola na propriedade. Após a colheita, o solo fica exposto e nos outros 58% do tempo útil há emissões de GEE, erosão, baixa infiltração de água etc. Essa foi a premissa utilizada nos estudos anteriores, ou seja, indução ao desmatamento para produzir mais, com alta emissão de GEE. Introduzindo a prática de manejo de solo baseada nos sistemas integrados, os solos ficam cobertos por mais tempo, evitando perdas de solo e aumentando a quantidade de água e a capacidade de infiltração. A combinação soja e milho permite uma produtividade **média nacional** em torno de sete toneladas de grãos por hectare, crescendo a taxas superiores a 3 a 4% ao ano. Portanto, somente desmatar para produzir não é uma prática sustentável.

O exemplo acima que mostra como funciona o manejo de culturas em áreas com pastos degradados. No caso do Mato Grosso, a média de produtividade em sistemas integrados pode chegar a 9,5 toneladas de grãos/ha, com uma remoção média de 1.3 t C/ha/ano.

Observa-se que ao longo dos anos a perda nominal de carbono no solo é estimada em 10%, podendo ter um ganho de até 23% com a recuperação dos pastos degradados. Ao introduzir as culturas, por exemplo soja+milho, o ganho seria mais carbono no solo e aumento da produtividade da área. Esta hipótese, adotada pelo Plano ABC/ MAPA, duplica a produção sem haver necessidade de desmatar.

O ciclo soja+milho não fixa carbono, mas ao introduzir o pasto no sistema ao longo dos anos há um ganho importante de matéria orgânica no solo, e conseqüentemente de carbono orgânico.

Com o aumento do sistema radicular no pasto de *Brachiaria*, observa-se um ganho substancial na matéria orgânica do solo e consequente aumento no carbono orgânico. Com isso, tem-se como benefícios maior infiltração de água, redução da erosão do solo e aumento da tolerância aos veranicos intensos.

Nos estudos desenvolvidos na fase dois do INCT-Mudanças Climáticas, procurou-se identificar onde estavam estes pastos degradados e utilizando **metodologia da Embrapa (2018)** para priorização de áreas de pastos degradados que podem ser transformadas em sistemas produtivos, este potencial foi mapeado e quantificado.

Neste caso foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados com prioritários para recuperação em três níveis: Municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados, até 45 mil e até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF (Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta).

Isso corresponde à redução pela pecuária de 11,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, sem considerar as remoções.

Considerações finais

O subcomponente segurança alimentar do INCT-MC 2 abordou o tema da agricultura e oferta de alimentos sobre diversos aspectos.

O primeiro deles foi de identificar a vulnerabilidade climática para agricultura brasileira, considerando a deficiência hídrica, a temperatura e a evapotranspiração. A avaliação da vulnerabilidade permitiu concluir que em todos os aspectos, num horizonte de produção agrícola até o ano de 2050, se nenhuma medida de adaptação ao clima for feita, a produção agrícola estará comprometida. Observou-se um significativo aumento da deficiência hídrica, indo na direção da região Nordeste para a região Centro-oeste. As consequências do aumento da deficiência hídrica, associada ao aumento da temperatura e da evapotranspiração, teria forte impacto na produção de milho (segunda safra) e redução da produtividade da soja. Já na região Sul, com possível aumento da chuva anual, essa região seria menos vulnerável na produção de celulose, em função da baixa ou nenhuma deficiência hídrica, e a possível consolidação da produção de culturas perenes.

Num segundo momento, a partir dos estudos desenvolvidos neste subcomponente, com relação às principais culturas que fazem parte da cesta básica, observou-se que haverá uma retração da área plantada, principalmente para as culturas de arroz, feijão e mandioca e um pequeno acréscimo na área de milho. Isto significa que pouco a pouco essas áreas serão substituídas pelas *commodities* como soja e milho e isto certamente terá reflexo na oferta de alimentos. Foram identificados ganhos de produtividade na produção de arroz, nenhuma alteração na produtividade do feijão, um ganho razoável na produção de trigo, principalmente com a expansão de trigo irrigado na região Centro-oeste, e uma redução na produção da mandioca, o que indica uma redução da oferta deste produto principalmente para a população de baixa renda.

Com relação às *commodities*, foram analisadas as culturas de soja e milho e outras culturas da cesta básica. Diferentemente do que foi observado em relação às análises estatísticas dos dados do MAPA, ao aplicar modelos agrometeorológicos alimentados por dados dos modelos Climáticos do CIMP6 do IPCC, não haverá ganho de produtividade para nenhuma cultura em nenhum bioma. Por ordem de intensidade de perda de produtividade, a Amazônia será o bioma mais afetado, seguido do Cerrado, depois Caatinga e finalmente Pampa e Mata atlânticas. As condições para que isso aconteça é não considerar nenhuma medida de adaptação dos sistemas de produção nestes biomas.

Entretanto, considerando a adoção de sistemas de produção integrados, a situação pode ser revertida e a oferta de alimentos ampliada.

Em outro momento, quando analisada a situação das pastagens degradadas, que podem ser revertidas em áreas de produção integrada, foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados prioritários para recuperação em três níveis: i) municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados; ii)

municípios com até 45 mil; e iii) municípios com até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF, injetando na produção agrícola, ainda que potencialmente, 202 milhões de toneladas de grãos (com Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta) e estimativamente, mais 10 milhões de cabeças com peso de abate de 7 arrobas.

Isso significa que de uma situação de alta vulnerabilidade da agricultura, e consequentemente da produção de alimentos, as ações de adaptação dos sistemas de produção a modelos mais equilibrados são uma grande oportunidade para o Brasil, se manter num alto patamar de oferta de alimentos, considerando as *comodities* e os produtos da cesta básica.

4.8 Segurança hídrica

Os resultados alcançados pela Subcomponente de Segurança Hídrica do INCTMC2 durante o período 2017-2025 são relacionados com a promoção e atualização dos respectivos objetivos e metas, com destaques para:

- Novos métodos de comunicação entre cientistas, formadores de políticas públicas e sociedade,
- Novos testes científicos sobre segurança hídrica sobre escalas espaçotemporais, e
- Novas alianças para cofinanciar pesquisas de impacto entre ciência para políticas públicas.

Estes avanços são desenvolvidos com estratégias e sinergia interdisciplinar (Figura 2) para:

- (1) Organização de cursos, oficinas e seminários internacionais em parceria com Centros de Pesquisa, Inovação e Difus (p.ex "CEPIDs"/FAPESP),
- (2) Novos financiamentos de projetos para diálogos interdisciplinares, intersetoriais e interinstitucionais para compartilhar conhecimento em torno das metas do INCT-MC2,
- (3) Otimização da formação de capacidades dentro e fora das subcomponentes do INCTMC2 com outros grupos, i.e. FAPs estaduais, INCTs e redes de longa duração (p.ex. CEPID),
- (4) Aprimoramento da comunicação com tomadores de decisão e sociedade em períodos de pandemia COVID-19,
- (5) Submissão de novas propostas e e publicação de manuscritos coautorados em revistas científicas de alto impacto e corpo editorial,
- (6) Identificação e retenção de jovens talentos promovendo objetivos e plano do INCT-MC2, Alianças nacionais e internacionais para pesquisas relevantes para políticas públicas com impactos locais

A Caminho da Governança Policêntrica e Adaptativa para Segurança Hídrica

O argumento central de governança policêntrica de Segurança Hídrica do INCT-MC2 é: “como novas parcerias público-privadas sustentáveis e resilientes promovem investimentos adequados nos serviços climáticos para fortalecer sistemas de alerta antecipados e híbridos, baseados nas comunidades, e a tomada de decisão para adaptação dos recursos hídricos de setores sensíveis ao clima e para as populações tropicais mais vulneráveis, usando métricas e níveis de índices, com mecanismos flexíveis, ajustáveis e participativos, por meio de métodos de adaptação, de mitigação e de transformação”,

Integrando estratégias globais, p.ex. IPCC/AR6, UNESCO-IHP IX, UNEP WWQA, WMO, IBPES e COPs, os métodos policêntricos e adaptativos promovem "arquétipos" para resiliência participativa com atores, modelos e bases de dados (ver Figura 2) através de:

- *Diálogos Sinérgicos e Interdisciplinares com novos INCTs*: "Observ. Nac. Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa" ("[ONSEAdapta](#)", SDG6) e de “Combate à Fome” (SDG 2);
- *Grupos Associados com Equidade, Diversidade e Inclusão*: “IEA/USP Saúde Planetária” (SDG 3), e FAPESP: “CEPIDs” ([CeMEAI-“Matemática Aplicada à Indústria”](#), SDG 9) e Centro de Biodiversidade Dinâmica e Mudança Climática (SDG 15), Centro de Inteligência Artificial ([CAAI](#)), Belmont Forum ([MADIS-“Management of Disaster Risk and Societal Resilience”](#));

- Cursos, Oficinas e Webinars de Segurança Hídrica: com InnSciD SP 2021 + TWAS Science Diplomacy LAC, [UNESCO-PHI-IX \(2022-2029\)](#);
- Aceleradores Educacionais "Game-Changer": com o INterdisciplinary CLimate INvestigation cEnter (INCLINE/USP), o Centro de Educação e Pesquisa em Desastres (CEPED/USP), a Cátedra UNESCO de Águas Urbanas: Qualidade, Gestão, Recuperação e Reúso (SDG 4) e iniciativas IAHS/Panta Rhei usando novas ferramentas de acesso aberto, i.e. the [Brazilian Ecohydrological Simulation Tool \(BEST\)](#) e o modelo comunitário [HydroPol2D](#);
- Jogos Educativos Participativos: a partir de novos arquétipos Panta Rhei, p.ex. "Coevolutionary Amazon Health & Sanitation" paradox ("CASH" Paradox), "[BRazil's Offset of Net-Zero Emissions toward GOals for Leveraging Development](#)" ("[BRONZE-2-GOLD](#)"), "Recycling Water Assets for Sustainable Habitats" ("[ReWASH](#)"), e o intitulado "Climate Justice, Equity, Diversity & Inclusion to Accelerate Water security and Adaptation Knowledge Exchange for Net-zero & Sustainability" ("[JEDI AWAKENS](#)");
- Novos Pilotos Demonstrativos: do consórcio FAPESP-NSFChina SDIC Flash Droughts Under Climate Change, do FACEPE-FAPESP Global change, sustainable development with WEFE viability e da iniciativa 2023-2022 IAHS New Scientific Decade HELPING;
- Gestão de Dados FAIR: com princípios CARE, por meio do [IAHS Panta Rhei benchmark dataset with socio-hydrological data of paired events of floods and droughts](#), o Plano Operacional [UNESCO-IHP-IX \(2022-2029\)](#), o [IWA 'Earth Observation for water management' Community of Practice](#), e as bases de dados brasileiras, p.ex. [PNSH/ANA](#), [CAMELS'BR](#) & [CABra](#);
- Novos Centros de EAD sobre Ação Climática: em parceria com iniciativas educativas das Nações Unidas para promover treinamento interdisciplinar das experiências do INCTMC2 por meio de cursos e lectures da: 1) Comissão Técnica de Educação da ABRHidro; 2) IAHS International Commission on Human-Water Feedbacks; 3) WG History of Hydrology, e 4) UNEP World Water Quality Alliance;
- Ação & Engajamento Social: pelas campanhas #OneDropOfScience #OneDoseOfResilience #BeFAIRwithCARE #GenerationRestoration, com publicações de impacto (p.ex. [Nature](#)) e com [bases de dados de secas e cheias Panta Rhei e sociohidrologia](#) do INCTMC2,
- Alinhamento de ações locais com iniciativas globais: (ver Figura 1) com premissas de WMO State of the Climate in Latin America and the Caribbean e a recomendação UNESCO por Ciência Aberta,

Aliança entre conhecimento ancestral e tradicional de segurança hídrica visando a uma governança policêntrica, participativa, resiliente e humanista

A gestão de riscos de inundações e secas em bacias críticas

Estes resultados iniciais do INCT-MC2 Segurança Hídrica destacam a) a grande heterogeneidade espacial e temporal das estimativas futuras, b) as limitações de extrapolações para escalas de bacias menores, e c) a necessidade de estudos de caso comparados, especialmente na gestão de riscos de extremos de inundações e secas em bacias de tamanho menor ou onde a ação local é mais importante. Nesse aspecto, a subcomponente de Segurança Hídrica do INCT-MC2 compara estudos de secas e cheias recorrentes no Brasil com outros estudos de caso, utilizando novos índices de: impactos, ameaças, exposição, vulnerabilidade e deficiências na gestão de riscos de extremos recorrentes (cheias e secas). Com base em dados históricos, aparecem as frações de cada indicador que contribuem para riscos de inundações e para secas Na Parte Central aparecem a distribuição geográfica de eventos pareados de inundações e secas extremos para a gestão de risco, e os pesos dos indicadores de mudança, classificados pela mudança do impacto, que é considerado sob controle de ameaças, exposições e vulnerabilidade, e que são exacerbados quando há deficiências na gestão de risco (Kreibich et al, 2022). Estes resultados fornecem evidências que a segurança hídrica está ligada fortemente à forma de gestão adaptativa frente às ameaças, vulnerabilidades e exposições, havendo uma tendência à diminuição de impactos (cores azuis, parte inferior) ou aumento destes (cores laranja-vermelho, parte inferior) frente a estes

extremos. Embora inicial, estes indicadores fornecem comparações relativas sobre a capacidade de aprendizagem de adaptação local com com velhos e futuros eventos extremos. No caso brasileiro, foi analisada a segurança hídrica da bacia crítica do Sistema Cantareira, manancial de água superficial que impacta a Região Metropolitana de São Paulo.

A escassez hídrica e a segurança hídrica

Dos resultados anteriores, a subcomponente de segurança hídrica do INCT-MC2 detalhou aspectos ligados à escassez hídrica sob mudanças. Por exemplo, aparecem as mudanças estimadas de escassez hídrica (Ballarin et al, 2023). Se mostram as mudanás relativas da média de escassez hídrica de longo período entre um futuro distante (2070–2100) e períodos históricos (1980–2010) para cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Nessa figura são detalhadas as mudanças por bioma brasileiro, por exemplo "A: Amazonia", "C: Cerrado", "Ca: Caatinga", "Af: Mata Atlântica", e "P: Pampa". Destaca-se a relação entre as mudanças relativas entre um futuro distante (2070–2100) e um período histórico (1980–2010) de: *disponibilidade hídrica*(ΔQ), *demanda hídrica* (ΔDem), e no *índice de escassez hídrica* ($\Delta Scarcity$) para cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Serviços Climáticos, Produção de água e Serviços Ambientais

Os resultados das figuras anteriores do INCT-MC2 Segurança Hídrica destacaram a criticidade de sistemas de mananciais e seus serviços ambientais. Especialmente, esta subcomponente analisa projetos de adaptação para atender potenciais tendências de *disponibilidade hídrica*(ΔQ), *demanda hídrica* (ΔDem), e no *índice de escassez hídrica* ($\Delta Scarcity$). Destes, há uma relação direta entre serviços climáticos e serviços ambientais a partir dos regimes e perturbações na produção de água. Os serviços climáticos em escala de mananciais locais se vinculam a projetos de Pagamento por Serviços Ambientais, p.ex., da Mata Atlântica brasileira. Na Figura 7, o tamanho dos círculos azuis é relativo ao número de projetos por estado, e são determinantes para as subseqüentes leis federais: 14026/20 ("Novo Marco de Saneamento") e 14119/21 ("Pagamento por Serviços Ambientais", PSA).

A segurança hídrica, os riscos e os seguros climáticos

Estes resultados de PSA-hídrico promovem elementos de adaptação que complementem a solvência econômica de projetos através de seguros climáticos para segurança hídrica. Especialmente, para mitigar impactos negativos de potenciais tendências de *disponibilidade hídrica*(ΔQ), *demanda hídrica* (ΔDem), e no *índice de escassez hídrica* ($\Delta Scarcity$), a segurança hídrica é expandida a partir da aplicação de seguros climáticos. Uma análise de sensibilidade de aversão ao risco usando gráficos de probabilidades tipo violinos (eixo vertical) de prêmios de seguros climáticos de longo prazo (eixo horizontal) (p.ex. Sistema Cantareira, 2,800 km²) afluentes à região metropolitana de São Paulo (ca. 9 milhões de habitantes). A Figura 8 mostra a grande variedade de estratégias de adaptação contabilizadas para distintos períodos de secas, p.ex. do período 2007-2100, usando RCP 4.5 e RCP 8.5, usando saídas HadGEM e MIROC, e sob diferentes tempos de retorno de secas e de diferentes tipos de cobertura para durações da demanda. Os gráficos também indicam a grande variabilidade de opções de securitização de serviços climáticos para extremos hidrológicos, especialmente em bacias hidrográficas de tamanho de interesse às companhias de abastecimento para retiradas de água superficial. Por outro lado, a Figura 9 destaca a dinâmica de seguros hídricos com base em mudanças climáticas para segurança alimentar (parte superior, Benso et al, 2023) e como um monitor de risco de secas agregadas e de simulações de prêmios de seguros, para secas e inundações, podem afetar o grau de solvência de companhias de água sob impactos de secas e de inundações com mudanças

climáticas (parte inferior, Gesualdo et al, 2024). Mais detalhes aparecem no site oficial: <http://inctmc2.cemaden.gov.br/>.

Segurança Hídrica com Sociohidrologia, Ciência Cidadã e Comitês de Bacias

No INCT-MC2 Segurança Hídrica, algumas limitações dos arquétipos sociohidrológicos são relacionadas a discussões interdisciplinares. Enquanto a sociohidrologia apresenta várias vantagens também é influenciada por algumas limitações, p.ex. 1) adequação para estudos de caso onde atores, dados e metodologias podem ser confirmadas em escala local; 2) prioridade de aplicação bacias hidrográficas de tamanho menor e/ou de alta influência decisória e participativa, p.ex. em comitês de bacia hidrográfica, 3) integração com métodos de ciência cidadã, p.ex. percepção individual de cidadãos voluntários. Apresenta-se uma dinâmica de alocação de água a partir da releitura das reuniões com tomadores de decisão participantes de comitês e/ou colegiados locais de água (Nunes et al, 2024). Estes resultados evidenciam aspectos subjacentes na segurança hídrica não explicitados em modelos de simulação, ou de métricas ou índices que não avaliam a natureza policêntrica da governança de águas. O INCT-MC2 Segurança Hídrica (Souza et al, 2020) destaca as discrepâncias entre a percepção cidadã sobre a Pegada Hídrica Cinza de lixões de município de tamanho médio sob mudanças climáticas, incluindo agregados no período 2009-2050. A série temporal 2009-2016 é agregada com os do período 2020-2050 dos cenários RCP 4.5 & RCP 8.5 de mudança climática e de percepção de voluntários. Também, o INCT-MC2 Segurança Hídrica apresenta a simulação contínua de um modelo sociohidrológico que incorpora fatores adimensionais de memória social de impactos de inundações para o período 2020-2100 sob cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 sobre um município brasileiro de tamanho médio.

Objetivos, metas e participação de atores do INCT-MC2 Segurança Hídrica estão disponíveis em: <https://drive.google.com/file/d/1TdgfSYySSZ2knN0A4ycgRueUQ7Uc75ym/view?usp=sharing>.

Referências

Referências completas aqui citadas estão listadas no oficial do INCT-MC2 at: <http://inctmc2.cemaden.gov.br/>

4.9 Desastres e cidades

Ao longo do desenvolvimento do INCT-MC Fase 2, diversos estudos têm destacado que a frequência e a magnitude de eventos climáticos e meteorológicos extremos podem variar de acordo com as mudanças climáticas em cada parte da superfície. Estudos prévios apontaram que os eventos extremos estavam aumentando em todo o globo, inclusive no Brasil, tanto em frequência quanto em intensidade (Rosenzweig e Solecki, 2010). Os impactos desses eventos extremos podem se estender a diferentes aspectos urbanos, como habitação, transporte, energia, abastecimento de água e saúde pública, com consequências significativas para a sociedade e para a economia.

O Brasil tem sido impactado por eventos climáticos extremos em diversas regiões, como na Amazônia (Marengo et al., 2018; Anderson et al., 2018) e na região Nordeste (Brito et al., 2017; Jimenez et al., 2021; Silva et al., 2023), que sofreu com secas prolongadas, enquanto graves inundações causaram grandes perdas nas regiões Sudeste e Sul, culminando em diversas mortes e um número significativo de desalojados e desabrigados (Ávila et al., 2016; Marengo et al., 2020a; Marengo et al., 2020b, Marengo et al., 2020c, Alvalá, 2025). Em paralelo ao aumento da intensidade e frequência de desastres relacionados a eventos climáticos extremos, o Brasil vem realizando esforços significativos para conhecer os riscos. Especificamente, em relação às inundações, o Brasil ficou em segundo lugar no total de estudos desenvolvidos sobre o tema entre 2000 e 2020, em comparação com outros países da América Latina e do Caribe (Pinos e Quesada-Román, 2022).

Na década de 2010 a 2020, estudos apontaram um aumento na frequência e intensidade de extremos de precipitação, destruição de moradias e infraestruturas, em decorrência de enxurradas e deslizamentos generalizados no Brasil (Fernandes e Rodrigues, 2017; Borges et al., 2018). Na década acima, destacou-se o grande desastre que impactou a região serrana do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011, com registro de mais de 900 mortes, 300 pessoas desaparecidas e dezenas de milhares de desalojados e desabrigados (Alvalá e Barbieri, 2017a), além de severas perdas econômicas, estimada em R\$ 4,8 bilhões (Banco Mundial, 2012).

No outro extremo, com relação ao fenômeno da seca, a combinação entre mudanças climáticas e competição por recursos hídricos pode levar a crises potencialmente catastróficas em diferentes regiões do Brasil. Tais mudanças podem afetar, por exemplo, a agricultura de subsistência na região semiárida do Brasil, a disponibilidade hídrica e a saúde da população, forçando o fenômeno de migrações que gera ondas de "refugiados climáticos". Esse fenômeno contribui com a criação de cinturões de miséria urbana, agravando os problemas sociais já presentes nas grandes cidades do país (Marengo, 2008). Quando afeta comunidades vulneráveis e com baixa capacidade de resposta ou adaptação, o impacto da seca pode ganhar proporções de calamidade, como afirmam Egler e Gusmão (2011).

As secas impactaram várias regiões do Brasil, tendo sido abordada em estudos que focaram a região semiárida do Brasil desde o século passado (Marengo et al., 2017a; Brito et al. 2018; Cunha et al., 2018; Souza Jr et al., 2025), enquanto diversos outros estudos abordaram as secas severas ocorridas na região Nordeste a partir de 2010 (Marengo et al., 2017a,b; Cunha et al., 2019a), bem como incluíram a relevância do monitoramento das secas nessa região (Alvalá et al., 2017b), mas também os desafios para a consolidação de um sistema de alerta de risco associado às secas no Brasil (Cunha et al., 2019b). Também afetaram a região Sudeste entre 2014 e 2015; a Amazônia em 2005, 2010 e 2016; Sul do Brasil em 2005 e 2012 (Marengo et al., 2008, Marengo e Spinoza, 2016, Nobre et al, 2016, Rodrigues et al., 2017, Marengo et al., 2018; Cunningham et al., 2017) e entre 1998 e 2020 (Fernandes et al, 2021).

EVENTOS EXTREMOS DE TEMPO E CLIMA E DESASTRES RECENTES NO BRASIL

Na década atual, extremos de precipitação continuaram impactando várias regiões e cidades do Brasil, deflagrando deslizamentos de terra e/ou enxurradas e inundações, como na região Sudeste do Brasil, em especial na área mais ao norte do estado de Minas Gerais e parte sul do estado da Bahia em 2021, cujas perdas estimadas totalizaram aproximadamente 3,1 bilhões de dólares (Marengo et al., 2023a); em Petrópolis, localizada na região serrana do estado do Rio de Janeiro em fevereiro e março de 2022 (Alcântara et al., 2023); na Região Metropolitana de Recife em maio-junho de 2022 (Marengo et al., 2023b); em São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, em fevereiro de 2023, que culminou em 64 mortes (Marengo et al., 2024a); na região do Vale do Taquari, RS, entre 01-07 de setembro de 2023, resultando em desastres associados principalmente a enchentes, impactando 107 municípios, resultando em 54 mortes e afetando mais de 400 mil pessoas (Alvalá et al., 2024b); no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio de 2024, este último afetando grande parte do estado, incluindo a capital, Porto Alegre, isto é, 478 municípios, o que culminou em mais de 180 mortes, quase 2,4 milhões de pessoas afetadas e prejuízos financeiros que somaram 11 bilhões de reais, segundo a Confederação Nacional de Municípios (Marengo et al, 2024b).

Em decorrência dos desastres explicitados acima, centenas de famílias foram atingidas, por exemplo, pelas fortes chuvas registradas na região litorânea norte do estado de São Paulo, na região Sudeste, no início da segunda quinzena de fevereiro de 2023. Especificamente, entre os dias 18 e 19 de fevereiro, uma frente fria atravessou o Oceano Atlântico subtropical, mais quente no litoral do estado de São Paulo, provocando chuvas intensas que provocaram deslizamentos de terra e inundações no município de São Sebastião, a cidade mais antiga do litoral norte (cidade fundada em 1636) e um dos 15 municípios paulistas considerados balneários pelo estado. A população do município, segundo o Censo de 2022, é de 81.595 habitantes, com densidade demográfica de 202,77 hab/km² e área total de 402.395 km² (Alvalá et al., 2024a).

Um estudo detalhado das causas e impactos da chuva resultante da frente fria, combinada com o efeito orográfico da Serra do Mar, que culminou em um volume de chuva sem precedentes de 683

mm e que atingiu a cidade em menos de 15 horas foi conduzido por Marengo et al. (2024a). Vale ressaltar que no dia 16 de fevereiro foram emitidos alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de um evento crítico que poderia desencadear inundações e deslizamentos de terra em municípios da Região Metropolitana e do litoral de São Paulo. Posteriormente, no dia 17 de fevereiro, foram confirmadas as previsões de chuvas extremas para o fim de semana. Além disso, a previsão de risco geo-hidrológico, divulgada pelo CEMADEN, válida para 18 de fevereiro, indicou risco “muito alto” de processos hidrológicos e movimentos de massa em municípios da porção leste do estado de São Paulo. No dia seguinte, 19 de fevereiro, a previsão de risco continuou indicando um risco muito alto de processos geo-hidrológicos em uma região que abrangia o litoral norte de São Paulo (Alvalá et al., 2024a). Portanto, alertas específicos de riscos hidrológicos e geológicos, que deveriam acionar o plano de contingência do município de São Sebastião, foram emitidos com dias de antecedência.

EVENTOS EXTREMOS DE TEMPO E CLIMA E DESASTRES RECENTES NO BRASIL

Na década atual, extremos de precipitação continuaram impactando várias regiões e cidades do Brasil, deflagrando deslizamentos de terra e/ou enxurradas e inundações, como na região Sudeste do Brasil, em especial na área mais ao norte do estado de Minas Gerais e parte sul do estado da Bahia em 2021, cujas perdas estimadas totalizaram aproximadamente 3,1 bilhões de dólares (Marengo et al., 2023a); em Petrópolis, localizada na região serrana do estado do Rio de Janeiro em fevereiro e março de 2022 (Alcântara et al., 2023); na Região Metropolitana de Recife em maio-junho de 2022 (Marengo et al., 2023b); em São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, em fevereiro de 2023, que culminou em 64 mortes (Marengo et al., 2024a); na região do Vale do Taquari, RS, entre 01-07 de setembro de 2023, resultando em desastres associados principalmente a enchentes, impactando 107 municípios, resultando em 54 mortes e afetando mais de 400 mil pessoas (Alvalá et al., 2024b); no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio de 2024, este último afetando grande parte do estado, incluindo a capital, Porto Alegre, isto é, 478 municípios, o que culminou em mais de 180 mortes, quase 2,4 milhões de pessoas afetadas e prejuízos financeiros que somaram 11 bilhões de reais, segundo a Confederação Nacional de Municípios (Marengo et al., 2024b).

Em decorrência dos desastres explicitados acima, centenas de famílias foram atingidas, por exemplo, pelas fortes chuvas registradas na região litorânea norte do estado de São Paulo, na região Sudeste, no início da segunda quinzena de fevereiro de 2023. Especificamente, entre os dias 18 e 19 de fevereiro, uma frente fria atravessou o Oceano Atlântico subtropical, mais quente no litoral do estado de São Paulo, provocando chuvas intensas que provocaram deslizamentos de terra e inundações no município de São Sebastião, a cidade mais antiga do litoral norte (cidade fundada em 1636) e um dos 15 municípios paulistas considerados balneários pelo estado. A população do município, segundo o Censo de 2022, é de 81.595 habitantes, com densidade demográfica de 202,77 hab/km² e área total de 402.395 km² (Alvalá et al., 2024a).

Um estudo detalhado das causas e impactos da chuva resultante da frente fria, combinada com o efeito orográfico da Serra do Mar, que culminou em um volume de chuva sem precedentes de 683 mm e que atingiu a cidade em menos de 15 horas foi conduzido por Marengo et al. (2024a). Vale ressaltar que no dia 16 de fevereiro foram emitidos alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de um evento crítico que poderia desencadear inundações e deslizamentos de terra em municípios da Região Metropolitana e do litoral de São Paulo. Posteriormente, no dia 17 de fevereiro, foram confirmadas as previsões de chuvas extremas para o fim de semana. Além disso, a previsão de risco geo-hidrológico, divulgada pelo CEMADEN, válida para 18 de fevereiro, indicou risco “muito alto” de processos hidrológicos e movimentos de massa em municípios da porção leste do estado de São Paulo. No dia seguinte, 19 de fevereiro, a previsão de risco continuou indicando um risco muito alto de processos geo-hidrológicos em uma região que abrangia o litoral norte de São Paulo (Figuras 1 e 2; Alvalá et al., 2024a). Portanto, alertas específicos de riscos hidrológicos e geológicos, que deveriam acionar o plano de contingência do município de São Sebastião, foram emitidos com dias de antecedência.

EVENTOS EXTREMOS E SECAS NO BRASIL

Especificamente sobre eventos extremos que deflagram desastres em decorrência de déficit de chuvas, estes têm impactado todas as regiões do Brasil. Historicamente, o semiárido brasileiro é a região onde as secas ocorrem com maior recorrência e intensidade, além de apresentar os impactos mais severos devido à elevada vulnerabilidade socioeconômica e a baixa disponibilidade hídrica. Entre 2012 e 2017, a região semiárida foi intensamente impactada por um processo prolongado de seca, definido como o “evento” mais intenso dos últimos 30 anos (Brito et al., 2017; Cunha et al., 2018). Considerando os impactos acumulados entre 2012 e 2016, aproximadamente 1.100 municípios foram afetados (33,4 milhões de pessoas atingidas por ano), especialmente com relação ao abastecimento de água e às perdas dos sistemas agroprodutivos, com impactos estimados em aproximadamente R\$ 104 bilhões (Marengo et al., 2017). Embora historicamente as secas sejam recorrentes na região semiárida, nos últimos anos eventos severos têm sido registrados em diferentes regiões do Brasil, com impactos em diversos setores estratégicos do país (Coelho et al., 2016; Nobre et al., 2016; Alvalá et al., 2017; Cunha et al., 2019; Marengo et al., 2020a; Fernandes et al., 2021; Deusdará et al., 2022; Cuartas et al., 2022).

Ainda no contexto de extremos associados às secas, mais recentemente a bacia amazônica foi impactada por uma seca extrema que teve início no verão austral de 2022-2023 e se estendeu até 2024, a qual aconteceu mais cedo do que outras secas anteriores (Marengo et al. 2024c). Embora alguma chuva tenha caído durante o verão austral, os totais permaneceram abaixo da média. Temperaturas mais altas durante o inverno austral e a primavera de 2023, que afetaram a maior parte da América do Sul Central, agravaram as condições de seca. Isso coincidiu com um intenso El Niño e temperaturas anormalmente altas no Oceano Atlântico Norte tropical desde meados de 2023. A diminuição da precipitação em toda a bacia amazônica, assim como anomalias negativas na evapotranspiração (derivadas do calor latente) e nos indicadores de umidade do solo, bem como o aumento das temperaturas durante a estação de transição seca para chuvosa, setembro-outubro-novembro (SON) de 2023, combinaram-se para atrasar o início da estação chuvosa no ano hidrológico de 2023-2024 em quase dois meses e contribuiu para que ela fosse atipicamente fraca. Nos meses de SON de 2023 registrou-se um déficit de precipitação da ordem de 50 a 100 mm/mês e temperaturas 3°C acima do normal na Amazônia, levando à redução da evapotranspiração e dos indicadores de umidade do solo. Esses processos, por sua vez, determinaram um início excepcionalmente tardio e um prolongamento da estação seca, afetando o ano hidrológico de 2023-2024. Essas mudanças foram agravadas por ondas de calor de junho a dezembro de 2023. Eventos combinados de seca e calor e suas consequências são as ameaças naturais mais críticas à sociedade. Os níveis dos rios atingiram níveis recordes ou secaram completamente, afetando os ecossistemas amazônicos. O aumento do risco de incêndios florestais é outra preocupação exacerbada por essas condições. Com base em imagens de satélite, Souza Jr et al. (2024) apresentaram uma primeira estimativa da extensão da perda de água nos 4,2 milhões de km² do bioma Amazônia brasileiro (aproximadamente 62% do bioma Amazônia total) em 2023, tendo estimado uma perda de 3,3 milhões de hectares de água superficial em relação a 2022, com uma precisão geral de 92%. As perdas de água superficial concentraram-se nos estados do Amazonas (59,4%) e Pará (25,5%), totalizando 2,8 milhões de hectares. O clima mais quente e seco da região afetou os principais rios da Amazônia. Entre eles, os rios Solimões, Negro, Purus, Acre e Branco apresentaram quedas extremas em seus níveis em algumas regiões, resultando em um alto impacto negativo na biodiversidade aquática, ainda que estimado apenas em áreas locais. Um total de 1,14 milhão de hectares de perda de água superficial (ou seja, 35%) foi detectado em territórios de áreas protegidas, afetando comunidades extrativistas, indígenas, afro-brasileiras, pesqueiras e tradicionais. A análise de proximidade revelou que 75% da perda de água superficial em 2023 ocorreram a 25 km de pequenas cidades, 48% e 65,8% a 50 km de aldeias indígenas e áreas urbanas, respectivamente. O estudo destacou ainda que os resultados reforçam a vulnerabilidade das pessoas às mudanças climáticas, antecipando um cenário plausível de impacto adverso na região amazônica e incitando soluções para adaptação e mitigação. Portanto, um sistema de monitoramento integrado baseado na dinâmica climática e hídrica a partir de

estações terrestres e via satélite é necessário para melhorar a compreensão do problema e o tempo de resposta aos impactos negativos das mudanças climáticas.

SECAS E O IMPACTO NOS RECURSOS HÍDRICOS – SECAS HIDROLÓGICAS

As mudanças climáticas vêm provocando impactos crescentes nos sistemas hidrológicos, alterando os padrões de precipitação, aumentando a frequência e a intensidade de eventos extremos, e comprometendo a regularidade e a disponibilidade dos recursos hídricos. No Brasil, onde mais de 50% da eletricidade é proveniente de usinas hidrelétricas, a capacidade de monitorar e antecipar eventos de secas são fundamentais para assegurar a segurança hídrica e energética do país. Diante desse cenário, avanços metodológicos que quantificam as condições de seca e seus impactos nos recursos hídricos, isto é, as condições de seca hidrológica, se destacam como ferramentas estratégicas para antecipar cenários futuros e orientar políticas públicas eficazes. O desenvolvimento e implementação de índices hidrológicos capazes de capturar a variabilidade do regime hidrológico ante eventos de secas, e a capacidade de recuperação das bacias hidrográficas, bem como avaliar e entender o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos são primordiais para fortalecer a resiliência e a capacidade adaptativa das bacias frente às transformações atualmente em curso. A recorrência de crises hídricas no Brasil e em diversas regiões do planeta nas últimas décadas reforça a urgência de desenvolver instrumentos técnicos que orientem ações de mitigação e planejamento estratégico em múltiplas escalas de gestão.

Como uma das contribuições do INCT-MC Fase 2, destaca-se o estudo que teve como objetivo principal adaptar e implementar o Índice Padronizado Bivariado (TSI – Two-variate Standardized Index), o qual considera conjuntamente os dados de precipitação e vazão, bem como avaliar seu desempenho na detecção e monitoramento de secas hidrológicas em comparação com índices tradicionalmente utilizados, como o SPI (Índice Padronizado de Precipitação) e o SSFI (Índice Padronizado de Vazão), em diversas escalas temporais (de 6 a 48 meses). A pesquisa focou a bacia do rio Paraná, por desempenhar papel estratégico na matriz energética brasileira. Além dos índices de seca, variáveis adicionais, como o armazenamento total de água terrestre (TWS) obtidos do satélite GRACE, dados de níveis de reservatórios e da profundidade do lençol freático foram consideradas, com o intuito de construir uma abordagem mais abrangente e integrada para avaliação das secas na bacia e sub-bacias. A análise conjunta dos índices e dessas variáveis permitiu uma avaliação abrangente dos eventos de seca e a verificação do desempenho do TSI como uma ferramenta operacional para a gestão dos recursos hídricos. Os resultados revelaram que o TSI tem capacidade de capturar com precisão o início, a persistência e a severidade dos eventos de seca hidrológica, especialmente nas escalas de 12 e 24 meses, estas mais adequadas para a caracterização dos processos hidrológicos regionais em bacias de grande porte. Em bacias com regimes climáticos bem definidos – com alternância entre períodos secos e chuvosos –, há um desacoplamento significativo entre os eventos de seca meteorológica e os de seca hidrológica, o que reforça a necessidade de índices multivariados que integrem diferentes dimensões do sistema hidrológico (Figura 7: sub-bacias Nova Ponte, Emborcação, Itumbiara, Furnas e Marimbondo). O TSI mostrou-se sensível a essas diferenças, sendo capaz de capturar a defasagem entre a redução da precipitação e os impactos sobre a vazão dos rios, especialmente em bacias com grande capacidade de armazenamento ou influência subterrânea significativa. Por outro lado, em bacias sem estações secas e chuvosas definidas, podem ser usados tanto os índices de secas clássicos como o SPI e o SSFI, como o índice bivariado TSI (Sub-bacias Jurumirim, Capivara e Itaipu). Essa característica confere ao TSI um caráter conservador, ideal para a detecção precoce de sinais de seca e para o monitoramento de sua persistência, mesmo após o retorno da precipitação. Os resultados destacam ainda o potencial do TSI para aplicabilidade mais ampla além do Brasil, sugerindo que ele pode ser efetivamente utilizado para avaliação de diversas bacias com padrões climáticos distintos, destacando-se seu potencial como uma ferramenta operacional globalmente aplicável para a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos.

ESTUDOS DE ATRIBUIÇÃO REAL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE EVENTOS EXTREMOS

Considerando os eventos mais destrutivos ocorridos nos últimos anos, uma das atividades mais relevantes do INCT-MC Fase 2 foi determinar o efeito das mudanças climáticas nos extremos e desastres, bem como a constatação da intensificação do Ciclo Hidrológico no Brasil que afeta as seguranças hídrica, energética e alimentar, este também relevante no contexto de outras subcomponentes do projeto.

Como resultados relevantes, estudos foram conduzidos abordando extremos e desastres cujos impactos foram significativos em diferentes regiões no Brasil. No primeiro, referente à seca na Amazônia em 2023, a qual foi caracterizada como a de maior intensidade, no período de junho a novembro, se comparada com a média do período de 1980-2010, destacou-se que o El Niño reduziu a precipitação aproximadamente na mesma proporção que as mudanças climáticas; porém, a severidade da seca deveu-se ao aumento da temperatura global e, portanto, às mudanças climáticas, bem como estas aumentaram a probabilidade de ocorrência da seca meteorológica em 10 vezes e a seca hidrológica em 30 vezes. No segundo estudo, associados às enchentes no estado do Rio Grande do Sul em 2024, foram registrados 420 mm de chuvas entre os dias 26/04 a 04/05, com ambos, mudanças climáticas e El Niño contribuindo igualmente, isto é, 2 vezes para a probabilidade do evento extremo acontecer, enquanto as mudanças climáticas/El Niño contribuem entre 6 a 9%/3 a 10% de aumentar a sua intensidade, respectivamente. O terceiro estudo, sobre queimadas no Pantanal em 2024, os resultados apontam que o Pantanal brasileiro apresenta condições cada vez mais quentes e secas à medida que o clima se aquece, considerando-se períodos distintos, isto é, de 1979 a 1999; de 2000 a 2028; de 2019 a 2023 e em 2024. No mês de junho de 2024, o Pantanal se singularizou por condições anormalmente extremas de calor, seca e ventos que levaram a incêndios florestais. Ainda no contexto do Pantanal, duas questões foram postuladas, com vistas à avaliar (i) como as mudanças climáticas influenciaram as condições climáticas associadas aos incêndios em junho no Pantanal brasileiro?; (ii) com que frequência devemos esperar condições climáticas similares para incêndios no mês de junho no Pantanal brasileiro? Para responder a primeira questão, avaliou-se o percentual de variação do aquecimento, considerando a Classificação Diária de Severidade para o mês de junho desde o clima pré-industrial, cujos resultados indicaram aproximadamente 34% de variação com 0,7°C de aquecimento na virada do século; 40% de variação com 1,2°C de aquecimento em 2024 e aproximadamente 45% com 2°C de aquecimento no futuro (por volta de 2060 considerando-se as políticas atuais). Concernente à segunda questão, as respostas apontaram 1 evento em 161 anos (antes das mudanças climáticas), 1 evento em 35 anos (aquecimento de 1,2°C em 2024), 1 evento em 18 anos (com aquecimento de 2°C por volta de 2060 considerando-se as políticas atuais).

No estudo para avaliar a intensificação do ciclo hidrológico, considerou-se as tendências de vazão no Brasil, período de 1980 a 2015, cujos resultados apontaram as regiões mais secas; mais úmidas; acelerando; e desacelerando em termos da intensidade de variação, associadas às regiões Nordeste e Centro Oeste; partes norte das Regiões Norte e Sul do Brasil; partes centro e sul da Região Norte, parte da região Sudeste e do oeste da Região Sul; sul da região Sul do Brasil, respectivamente (Chagas et al., 2022).

CHUVAS EXTREMAS E RISCOS DE DESASTRES HIDRO-GEO-METEOROLÓGICOS NO BRASIL CONSIDERANDO CENÁRIOS DE AQUECIMENTO GLOBAL

Visando aprimorar estudos prévios, no escopo do INCT-MC Fase 2 priorizou-se aprofundar análises com o propósito de estabelecer critérios de priorização dos municípios brasileiros para identificar regiões de especial atenção, isto é de maior risco no território brasileiro considerando o clima presente e futuro (2021-2050) (Marengo et al., 2021a).

Portanto, uma análise da vulnerabilidade e o risco dos municípios brasileiros frente a desastres de origem geo-hidrológica, com foco em deslizamentos de terra, inundações bruscas, enxurradas e alagamentos foi conduzido (Marengo et al., 2021b), para o qual se considerou características demográficas de populações residentes em áreas vulneráveis e combinação com modelos empíricos de impacto potencial com projeções climáticas do CMIP6, considerando três cenários de aquecimento global (1,5 °C, 2,0 °C e 4,0 °C). O período histórico de referência (1961-1990)

foi comparado com projeções futuras para identificar mudanças nos padrões de chuvas extremas e seus impactos. Ressalta-se que para as projeções climáticas considerou-se um conjunto de simulações globais de alta resolução do projeto HELIX realizadas com o modelo HadGEM3A do CMIP6 e os respectivos modelos forçantes do CMIP5.

Os resultados apontaram que as regiões Sul, Sudeste e parte do Nordeste, especialmente estados como Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Bahia e Pernambuco, apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade-exposição e ameaça climática para deslizamentos de terra. A combinação desses fatores resultou em *hotspots* de alto impacto potencial, que foram validados por dados históricos de desastres. As projeções do clima futuro indicaram aumento relativo do risco em praticamente todo o território nacional, com destaque para as regiões Sul e Sudeste, onde a convergência entre modelos é alta. Cenários mais críticos (2,0 °C e 4,0 °C) mostraram incrementos de até 10% do indicador, com riscos significativamente altos para áreas densamente povoadas e regiões costeiras. Para inundações bruscas e alagamentos, as regiões Sul e Sudeste, além de partes do Nordeste, são as mais vulneráveis e expostas a chuvas intensas de curta duração. Grandes centros urbanos, localizados em Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, apresentaram alto impacto potencial, alinhando-se com registros históricos de desastres. As mudanças relativas mostraram tendência de aumento nos impactos, especialmente no Sul e Sudeste, com valores superiores a 10% no cenário de 4,0 °C e alta concordância entre modelos.

Particularmente avaliou-se um município específico, Blumenau, SC, que está entre os municípios mais críticos para deslizamentos e inundações. Os incrementos relativos variaram de +1,53% a +9,85%, dependendo do cenário de aquecimento, com concordância dos modelos. A combinação entre alta vulnerabilidade atual e projeções de intensificação de eventos extremos demanda ações urgentes de adaptação e redução de riscos, as foram repassadas ao município.

De modo geral, o estudo evidencia que o aumento do aquecimento global amplificará a frequência e magnitude de desastres hidrometeorológicos, especialmente em regiões com alta vulnerabilidade socioambiental e densidade populacional. Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas robustas, sistemas de alerta precoce e planejamento urbano para mitigar impactos. Apesar das incertezas em algumas regiões, a convergência dos modelos para áreas críticas fornece subsídios científicos para ações prioritárias. Como contribuição adicional deste estudo, os resultados subsidiaram outras etapas de pesquisas conduzidas durante o projeto INCT-MC Fase 2 e também do CEMADEN/MCTI, destacando-se (i) o desenvolvimento de um índice de risco para Blumenau, considerado um dos municípios mais críticos pelas análises apresentadas conforme destacado anteriormente; (ii) a composição de um indicador de eventos extremos relacionados à desastres geo-hidrológicos para todo Brasil, este adotado pela Casa Civil em 2023 para estabelecer a lista de municípios prioritários para ações da União em gestão de riscos (Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR); (iii) insumos fundamentais para a composição do GeoRisk – Sistema de Previsão de Risco de Deslizamentos de Terra para todo Brasil (www.georisk.cemaden.gov.br).

CARACTERIZAÇÃO DA POPULAÇÃO EXPOSTA AOS RISCOS DE DESLIZAMENTOS, INUNDAÇÕES E ENXURRADAS NO BRASIL

Estudos foram conduzidos no escopo do Projeto INCT-MC fase 2 visando explorar a Base Estatística Territorial de Risco (BATER), produzida no âmbito da parceria IBGE e CEMADEN. Num primeiro esforço, Souza et al. (2019) apresentaram a metodologia desenvolvida por Assis Dias et al. (2018) para definir a delimitação da BATER, bem como uma análise de potenciais aplicações, como, por exemplo, a correlação cruzada com outras bases de dados existentes (por exemplo, aglomerados subnormais, tipologias urbanas). Alvalá et al. (2019) contribuíram para a compreensão das condições da população vivendo em áreas de riscos em escala intraurbana e a potencial aplicação de tais informações no sistema de alerta precoce brasileiro. Por meio da integração de dados demográficos do Censo 2010 e mapeamentos de áreas de riscos de deslizamentos e de inundações de 825 municípios historicamente afetados por desastres no território brasileiro, estimaram uma população de 8.266.566 pessoas vivendo em 27.660 áreas de

riscos e em 2.470.506 domicílios. Esse resultado indicou que, para cada 100 habitantes, 9 viviam em áreas de risco de desastres no Brasil.

Saito et al. (2019) realizaram um estudo com o objetivo de analisar as condições de exposição dos grupos populacionais em áreas de risco de desastres em 479 municípios brasileiros. Os resultados mostraram que o maior número de pessoas expostas estava na região Sudeste do país, embora, em termos proporcionais, na região Nordeste, 15 em cada 100 pessoas viviam em áreas de riscos. Numa análise mais abrangente, Saito et al (2020) avaliaram a distribuição da população residente em áreas de risco de desastres no Brasil, em 825 municípios, em escala intraurbana, considerando três relevantes aspectos: a distribuição da população exposta de acordo com a classificação do porte municipal; a densidade populacional em áreas de risco de desastres; e a classificação do desenvolvimento humano municipal para os municípios com áreas de risco de desastres. Os resultados revelaram que a população exposta a áreas de riscos de desastres concentra-se nas capitais e pequenas cidades do país, as quais são densamente povoadas mesmo em pequenas cidades, sugerindo que essa é uma realidade enfrentada não apenas pelas grandes cidades, assim como as áreas de risco de desastres existem mesmo dentro de municípios com alto nível de desenvolvimento humano. Os resultados foram relevantes em contribuir para a compreensão da espacialização do risco de desastres no Brasil, um passo primordial para a redução de perdas humanas, revelando um problema atual enfrentado pelos municípios, independentemente da classificação de porte e do nível de desenvolvimento humano.

Considerando os esforços para desenvolver índices de vulnerabilidade, especialmente no contexto das mudanças climáticas, um índice populacional de vulnerabilidade (InOV) para subsidiar o monitoramento e a emissão de alertas precoces para riscos de desastres no Brasil relacionados a deslizamentos foi desenvolvido por Assis Dias et al. (2020). Neste contexto, um InOV, baseado no banco de dados gerado no âmbito da parceria IBGE e CEMADEN, foi proposto e validado, com o ulterior objetivo para ser usado em atividades operacionais no contexto de alertas antecipados, em especial para identificar áreas que concentram grande número de populações expostas a áreas de riscos de deslizamentos. O InOV, baseado em indicadores que caracterizam as condições de exposição física dos moradores, bem como a capacidade de resposta da população para se recuperar após o desastre, foi desenvolvido para 443 municípios brasileiros, o que permitiu uma análise relacional das áreas de risco dentro de cada município. Com base em um total de 6.227.740 pessoas vulneráveis em áreas de risco de deslizamentos, quase 42% foram classificadas com vulnerabilidade muito alta, 35% com alta e 23% com média. Dados referentes às vítimas e às populações afetadas por deslizamentos foram utilizados para validar o índice, o que permitiu verificar a correlação entre as incidências de perdas humanas nas áreas classificadas como classe de vulnerabilidade muito alta. Portanto, o InOV pode subsidiar a identificação de áreas prioritárias, fornecendo informações adicionais sobre populações vulneráveis, bem como para auxiliar na identificação de áreas críticas no município que estão sob risco de desastre hidrometeorológico quando os limiares críticos de precipitação são ultrapassados. Embora o InOV desenvolvido tenha se concentrado na aplicação para uso em alertas antecipados, também pode ser útil para subsidiar a proposição de medidas de adaptação em nível local.

Considerando que a maior parte da população urbana global vive em cidades com menos de um milhão de habitantes e que no Brasil estima-se que mais de 45% da população viva em cidades com até 100.000 pessoas, muitas delas propensas a riscos de desastres, estudo foi realizado para avaliar a vulnerabilidade e as capacidades de pequenos municípios brasileiros em reduzir os riscos, especialmente aqueles relacionados a deslizamentos e inundações (Ribeiro et al., 2021). Para tanto, 234 municípios localizados nas regiões Sul e Sudeste do país (113 e 121 cidades, respectivamente) foram classificados em duas classes populacionais, ou seja, municípios com 20.000 a 50.000 habitantes (Classe A4) e aqueles com 50.000 a 100.000 habitantes (Classe A5). Além disso, os municípios são caracterizados por altos níveis de desenvolvimento humano municipal e pela disponibilidade de planos diretores municipais. Uma análise estatística de um conjunto de 30 indicadores quantitativos e 40 indicadores qualitativos revelou que a vulnerabilidade das populações e as capacidades municipais estão relacionadas principalmente aos setores econômicos, às políticas públicas e ao porte das cidades, ou seja, a vulnerabilidade e a capacidade de enfrentamento estavam associadas às atividades econômicas desenvolvidas nos municípios, que se caracterizaram principalmente por: cidades dependentes do setor agrícola;

dependentes de recursos externos; aquelas caracterizadas como reservas de mão de obra; e cidades industriais. Considerando as cidades separadamente por porte populacional, a Figura 15 mostra que os municípios da Classe A apresentam maior vulnerabilidade associada às populações com menores níveis de escolaridade e renda, cujos municípios possuem economias baseadas principalmente no setor agrícola e que carecem de serviços básicos de saúde e transporte. Na Classe A5, a maior vulnerabilidade está relacionada aos locais com infraestrutura precária, resultado de rápidas taxas de crescimento populacional que não foram acompanhadas pelo desenvolvimento urbano. Portanto, os autores ressaltaram que planos diretores municipais e altos níveis de desenvolvimento humano municipal não garantem melhor infraestrutura urbana ou legislação específica para gestão de riscos. Embora instrumentos legais recomendando políticas de gestão de riscos de desastres tenham sido propostos, tais instrumentos são insuficientes para reduzir vulnerabilidades e aumentar capacidades em pequenas cidades brasileiras.

VULNERABILIDADE ESCOLAR DIANTE DE AMEAÇAS HIDRO-GEO-METEOROLÓGICAS NO CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESASTRES SOCIOAMBIENTAIS NO BRASIL

Conforme já destacado, consistentemente com as projeções, múltiplas mudanças simultâneas no sistema físico e climático continuam aumentando; notavelmente, eventos extremos e mudanças nos padrões globais de processos naturais como chuvas, inundações, enxurradas, deslizamentos de terra, ondas de calor e secas têm aumentado em frequência e intensidade (IPCC 2022; UNDRR 2024). Quando ocorrem em territórios degradados por modelos insustentáveis de desenvolvimento, revelam diferentes tipos de vulnerabilidade presentes nas sociedades humanas, por exemplo, como a vulnerabilidade física, econômica, social, política, institucional, educacional, entre outras (Wilches-Chaux, 1993; Marchezini & Wisner 2015; Pismel et al., 2023), materializadas em danos, perdas e custos adicionais ao funcionamento normal das instituições e da sociedade afetadas.

Particularmente no contexto educacional, a vulnerabilidade escolar envolve fatores humanos como a fragilidade associada ao estágio de desenvolvimento físico e mental de crianças, adolescentes e jovens, a densidade de estudantes por sala de aula, a quantidade de estudantes por professor ou a fragilidade emocional da comunidade escolar diante da probabilidade, a iminência ou a ocorrência de desastres. A sensibilidade do setor da educação também envolve aspectos relacionados com a integridade da infraestrutura, assim como de equipamentos e outros materiais, que permitem o exercício da rotina sócio pedagógica nas escolas. A continuidade do processo educativo é suscetível de ser afetada quando as instalações e equipamentos escolares precisam ser reaproveitados como abrigos, perturbando os processos regulares de ensino e aprendizagem. As políticas públicas voltadas para a proteção da integridade e a segurança das escolas e da comunidade escolar representam uma dimensão importante e transversal na abordagem da vulnerabilidade escolar. Quando bem implementadas e cumpridas, essas políticas podem desempenhar um papel fundamental na redução dos riscos e na promoção de um ambiente mais seguro para todos.

Em sociedades saudáveis, o cuidado e a proteção de sua população mais jovem são supridos com celeridade para garantir o desenvolvimento e a permanência das futuras gerações. No contexto atual de mudanças climáticas e desastres socioambientais, essas ações deveriam estar presentes em processos de gestão de riscos e de gestão de desastres centrados nas necessidades do setor educativo.

Com base nessas considerações, priorizou-se pesquisa para identificar medidas de mitigação que precisam ser implementadas, assim como capacidades que precisam ser desenvolvidas, para reduzir o risco, minimizar as perdas, e fortalecer a resiliência escolar diante do aumento da intensidade e frequência de eventos hidro-geo-meteorológicos extremos no Brasil. Foram conduzidas três abordagens, isto é, avaliação retrospectiva de danos e perdas a partir de registros históricos de desastres com impacto em escolas; avaliação do grau de exposição de escolas a riscos hidrológico, geológico e geohidrológico; e avaliação de danos e perdas potenciais para escolas expostas. Adicionalmente, foi conduzida uma avaliação sobre o grau de exposição de

escolas no Rio Grande do Sul, considerando dois cenários de inundação: um cenário com recorrência igual o inferior a um ano, correspondendo a cada estação chuvosa, e o cenário extremo de inundação ocorrido entre abril e maio de 2024.

Neste contexto, entende-se que a “exposição” é uma componente da vulnerabilidade; o termo se refere à condição na qual indivíduos, infraestrutura, residências, processos de produção, e outros ativos tangíveis estão localizados em áreas suscetíveis a ameaças como inundações ou movimentos de massa (UNGA 2016; P.13). Segundo a *Comisión Económica para América Latina y el Caribe* (CEPAL) das Nações Unidas, os **danos** são o conjunto de efeitos negativos que sofrem as pessoas em termos de sua saúde ou integridade física, tais como ferimentos, deslocamentos, óbitos, evacuações etc. (**Danos Humanos: DH**). Os danos são também afetações sobre os ativos imobilizados, destruídos parcial ou totalmente, sobre bens finais ou em processo, assim como sobre matérias primas, materiais ou peças de reposição (**Danos Materiais: DM**). As “**Perdas**” são os bens que deixam de ser produzidos ou serviços que deixam de ser prestados por um tempo após o desastre, possivelmente durante a emergência, a reabilitação e a reconstrução. Os “**Custos**” são os recursos financeiros adicionais requeridos para a produção de bens e a prestação de serviços por causa do desastre; um terceiro setor se beneficia por este gasto adicional. Por fim, os “**Impactos**” são o efeito global, positivo ou negativo, direto ou indireto, de um desastre (CEPAL, 2014). Em outras palavras, os impactos são a somatória de danos, perdas e custos, diretos ou indiretos, produzidos num desastre.

A partir de dados do Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres, S2iD, efetuou-se uma avaliação retrospectiva de danos e prejuízos, dos quais foram extraídos unicamente os correspondentes a danos materiais e prejuízos públicos do setor de educação. Nessa base de dados os valores econômicos se referem a danos materiais (prédios destruídos ou danificados) e prejuízos públicos (gastos para reabilitação e/ou reconstrução). Todos esses dados referem-se a valores correntes com correção monetária a dezembro de 2024. No Quadro 1 sintetizam-se os danos e prejuízos para o setor no período disponível de dados. Os valores totais incluem todas as tipologias de ameaças existentes na Codificação Brasileira de Desastres, COBRADE.

No que tange à avaliação de danos e prejuízos às escolas expostas, dados ainda estão sendo processados. Numa primeira análise, foram realizadas estimativas de danos à infraestrutura (prédio escolar) e de valores de reposição de equipamentos, aplicando-se a metodologia da CEPAL. As estimativas foram realizadas considerando-se dados de 87 escolas que sofreram danos pelas inundações de 2024 no Rio grande do Sul, as quais estão localizadas em 24 municípios e cujos resultados estão sumarizados nos Quadros 2 e 3, com destaque para os dez municípios que mostram os valores mais altos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em decorrência dos conhecimentos gerados no escopo do projeto INCT-MC Fase 2, um sistema de alerta precoce para deslizamentos de terra, multiescala, e que integra vários produtos meteorológicos foi proposto e implementado operacionalmente no CEMADEN, sob liderança de integrante do Projeto, este denominado Geo-Risk. Portanto, o Geo-Risk, sistema que prevê previsões de riscos para diferentes regiões do Brasil, utiliza diferentes modelos meteorológicos, dados ambientais e históricos de desastres, gerando previsões com até 72 horas de antecedência. Tais previsões são relevantes para as Defesas Cívicas, especialmente para apoiar decisões estratégicas direcionadas em fortalecer a preparação e o enfrentamento de desastres. Adicionalmente, está em andamento o projeto Sistema de alerta antecipado multiescalar para deslizamentos de terra integrando produtos meteorológicos de alta resolução, características geotécnicas e populacionais, este financiado pelo CNPq e também liderado por integrante do INCT-MC Fase 2. Este projeto que tem como objetivo principal desenvolver um sistema de alertas antecipados para deslizamentos de terra, que contempla análises nas escalas regionais, municipais e locais, integrando produtos meteorológicos de alta resolução em curto e curtíssimo prazo, e considerando características geotécnicas e das populações residentes vulneráveis.

Considerando-se que o conhecimento sobre a população exposta em áreas de risco e suas características socioeconômicas é essencial para subsidiar ações de preparação e resposta a

emergências, bem como contribui diretamente para a definição de diretrizes para redução do risco através da ampliação das capacidades, assim como de medidas de mitigação e medidas de adaptação às mudanças climáticas, esforços tem sido dispendidos para a proposição e atualização de diferentes índices de vulnerabilidades. O índice InOV, concebido com base em dados censitários de 2010, é uma excelente contribuição do INCT-MC Fase 2 nesse escopo. Esse índice está sendo atualizado considerando-se os dados censitários de 2022, a partir da nova base de dados de população residente em áreas de risco. Além disso, com a atualização da base de dados, será importante verificar se entre 2010 e 2022 houve alteração da população exposta e se houve um incremento ou diminuição da população vulnerável, bem como conhecer as atuais condições de vida dessas pessoas, a fim de propor novas medidas de mitigação. As informações atualizadas permitirão conhecer o perfil da população exposta na iminência de um alerta de risco de desastre, e, com base na vulnerabilidade da população, definir áreas prioritárias para as ações de resposta da defesa civil.

Conforme previamente ressaltado, em avaliação de impactos de secas em vários setores, como na agricultura e no setor hidroenergético, torna-se crucial integrar indicadores e múltiplas variáveis, como armazenamento de água terrestre em diferentes camadas do solo, águas subterrâneas e níveis de reservatórios, com vistas a obter uma compreensão abrangente da dinâmica da seca, isto é, evolução, duração e recuperação dos eventos de seca. Portanto, faz-se primordial considerar o uso de várias variáveis hidrometeorológicas e ambientais para o desenvolvimento e estimativa de índices para a caracterização de secas. A literatura científica destaca que usar índices baseados em uma única variável, como o SPI e o SSFI não é suficiente para uma caracterização adequada dos eventos de secas. Neste escopo, avanços foram gerados no escopo do INCT-MC Fase 2 e o CEMADEN fez avanços no desenvolvimento e implementação de índices que consideram 2 (TSI) e 3 (IIS) variáveis, que atualmente são usados para o monitoramento das secas agrícolas e hidrológicas. Atualmente, pesquisas estão em curso para o desenvolvimento de metodologia robusta que permita avançar na previsão de secas para um horizonte futuro de 3 meses (escala sazonal), inclusive avançando no uso de Inteligência artificial, nas técnicas de aprendizado de máquina (Machine Learning) como as Redes Neurais.

Considerando também o aumento de eventos extremos que tem impactado as diferentes regiões do Brasil, ressalta-se que as pesquisas e a geração de novos desenvolvimentos tecnológicos deverão levar em conta a lista atualizada de municípios mais suscetíveis às ocorrências de deslizamentos, enxurradas e inundações, cuja atualização dos critérios e indicadores foi coordenada pela Casa Civil da Presidência da República com vistas à identificação dos municípios para serem priorizados nas ações da União em gestão de risco e de desastres (publicadas nas Notas Técnicas nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR e nº 1/2025/SADJ-VI/SEPAC/CC/PR).

Referencias mencionadas por cada componente aparecem no Relatório do Ano 8, que está no web site do projeto: <https://inctmc2.cemaden.gov.br/>

5 Resumo INCT MC2 1917-2025

Formacao recursos humanos	Número 2017-19	Número 2020-23	Número 2024-25	Número 2017-25
Mestrados (em andamento e concluídos)	19	118	13	150
Doutorados (em andamento e concluídos)	8	116	8	132
Pós doutorados (em andamento e concluídos)	9	48	15	72
Iniciação científica (em andamento e concluídos)	8	45	4	57
Bolsas Nível Técnico (TT, DTI)	35	28	8	71

Final Report 2017-2025, Thematic Project: INCT MC Phase 2 (National Institute of Science and Technology for Climate Change-Phase 2)

(em andamento e concluídos)				
Pesquisador Visitante (PV) (em andamento e concluídos)	1	3	0	4
Publicacoes	Numero	Numero	Numero	Numero
Artigos científicos em revistas internacionais	223	301	69	593
Artigos científicos em revistas nacionais	65	73	17	155
Capitulos em livros	24	54	38	116
Livros	8	10	6	24
Produtos técnicos (Relatórios, web sites, bases de dados)	8	78	43	129
Atividades de extensao	Numero	Numero	Numero	Numero
Cursos de curta duracao	29	30	13	72
Eventos (workshops, seminarios)	51	103	103	257
Reportagens, entrevistas	23	140	157	320