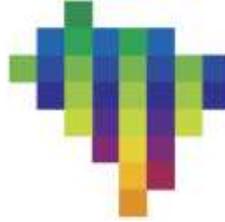


**INCT**MC2  
INCT para Mudanças  
Climáticas - Fase 2



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



Enchente atinge Pelotas, no Rio Grande do Sul

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

**Year 8 Report**

**Agosto 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 Letícia 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

A agenda científica do INCT-MC2 foi desenvolvida conforme planejado, com início em 2017 e término em 2025, sendo este o relatório final do projeto. Sete relatórios anuais tem sido preparados e submetidos a FAPESP e todos eles tem sido aprovados. Os relatórios contemplam todas as atividades desenvolvidas no projeto financiadas pelo CNPq, FAPESP e CAPES e estão disponíveis no site do projeto em formato PDF:

<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](#)

## 2. Objetivos e metas

Os objetivos do INCT MC2 não mudaram:

To implement and develop a comprehensive network of interdisciplinary research on global environmental change and sustainability:

- To develop actions aimed at assessing adaptation to environmental changes and the transformation to sustainability, to reflect the vulnerabilities and resilience trajectories and propose ways in adapting to these changes, especially in relation to decision in the political sphere.
- To merge science with education from primary to the post-graduate levels.
- To provide an overview of issues related to sustainability and environmental-social-corporate responsibility, to facilitate the participation or even the implementation of activities in different areas of management of public and private institutions and their relationships with stakeholders.
- To maintain excellence in activities in Science & Technology & Innovation as the structural axis of sustainable environmental development, with an integrator and innovative character.
- To transfer knowledge using instruments that go beyond only scientific articles, but producing audio-visual material, web tools, and other outlets that allow the development of a scientific culture in society, improving the impact of Brazilian science and enabling increased international insertion of Brazil in environmental negotiations.
- To develop a research agenda in global change to identify and understand the current impacts of climate variability on natural and human systems in Brazil;
- To enhance and expand the scope of studies on global changes and their impacts on important sectors to the economy of Brazil.
- To engage and educate society, aiming to increase the resilience of these sectors.

- To sensitize the public perception of science and technology in relation to global change and impacts on society.
- To contribute prominently in the research and development of the National Plan on Climate Change and the National Adaptation Plan to Combat Drought and Desertification, in partnership with federal, state and international research programs on global change
- To produce publications and model data that can be used to provide scientific contributions to scientific panels, The Rede Clima, special reports of the Brazilian Panel of Climate Change and the Fifth National communication of Brazil to UNFCCC.

### 3. Cordenacao

Coordenador Jose A. Marengo, Researcher, Level 1 B-CNPq classification, CEMADEN, Sao Paulo

Vice-Coordinador: Tercio Ambrizzi, Researcher, Level 1 A-CNPq tion, IAG USP, Sao Paulo

Também existe um comitê Gestor CG e um comitê científico CC. Todos os membros do CG também são coordenadores dos Laboratórios Associados. A Universidade Federal do Estado de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) também são Laboratórios Associados. Laboratórios Associados são aqueles centros cujos membros fazem parte do CG, mas não fazem parte do grupo que submete a proposta. O andamento do Projeto é monitorado por um CC, constituído pelos coordenadores dos subcomponentes (temas) e das atividades transversais. Reunimo-nos virtualmente varias vezes entre junho de 2024 a Julho 2025 para acompanhar o andamento do projeto.

A transferência de conhecimento para a sociedade deve ser desenvolvida a partir de um sistema de investigação, gestão e experimentação de informações em mudanças climáticas, por meio de:

- Fortalecimento teórico de estudos que sustentem ações que invistam na comunicação e divulgação científica.
- Geração de análises das relações entre ciências, tecnologias e sociedade.
- A criação de novas abordagens e metodologias que permitam a experimentação com mídias e linguagens sociais.
- A investigação das potencialidades dos artefatos culturais (jornais, revistas, filmes, programas de TV, obras de arte, blogs, vídeos, programas de rádio, podcasts, etc.).
- A produção e disseminação de informações e materiais de qualidade que possam servir de ferramentas para gestores públicos e organizações da sociedade civil na avaliação, formulação e implementação de políticas públicas.

Neste projeto, buscamos que a comunidade científica em relação às mudanças ambientais globais seja ouvida, não apenas para legitimar o que já foi decidido pelos governos, mas para influenciar os processos em curso na administração pública em relação às políticas ambientais e aos grandes empreendimentos que podem afetar o meio ambiente. A experiência adquirida no INCT-MC2 no período 2017-2024 pode ser avaliada a partir do grau de sinergia interdisciplinar em C&T e de seus impactos sociais de continuidade. Internamente, o INCT-MC2 valoriza essa sinergia na integração entre Subcomponentes e Eixos Transversais. Por um lado, essa sinergia é acelerada nos Subcomponentes de Segurança Alimentar, Segurança Hídrica, Segurança Energética, Saúde, Impactos nos Ecossistemas Brasileiros em Face às Mudanças no Uso da Terra e Biodiversidade, Desastres Naturais, Análise Integrada para Políticas Públicas e Tomada de Decisões.

Além disso, a sinergia é fortalecida nos Eixos Transversais de Economia e impactos em setores destacados, Comunicação, Divulgação, Educação e Modelagem do Sistema

Terrestre e Produção de Cenários Futuros. Por outro lado, no período 2020-2024, os Subcomponentes e Eixos Transversais do INCT MC2 trouxeram recomendações globais para os níveis federal, estadual e municipal no Brasil. O novo componente de integração foi criado para apoiar a integração dos resultados de todos os componentes, tanto dos temas principais quanto dos temas transversais. Essa integração está sendo realizada utilizando a metodologia NEXUS+, utilizada na Quarta Comunicação do Brasil com a UNFCCC (4CN), sempre considerando a relevância para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ODS-12 (agricultura sustentável), ODS-3 (assegurar um estilo de vida saudável), ODS-7 (Energia limpa e acessível: garantir acesso à energia barata), ODS-11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS-13 (Ação contra a mudança climática global), ODS-15 (Vida Terrestre: Proteger, Restaurar e Promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres), entre outros. Até o início de 2024, centenas de publicações foram geradas pela colaboração entre os diversos componentes do INCT MC2, além de inúmeras palestras, seminários, podcasts, entrevistas em redes sociais, revistas e jornais do Brasil e do exterior, destacando o tema das mudanças climáticas e sua característica transversal e integradora. Até o momento, relatórios semestrais já foram gerados e aprovados pela FAPESP e pelo CNPq.

A extensão do projeto até 2025 ajudou a incluir tópicos que não estavam contemplados quando a proposta foi elaborada em 2015 e que foram gradualmente incluídos no cronograma de busca atual. Por exemplo, o tema dos extremos climáticos observados no Brasil e outro contendo algumas reflexões sobre a relação entre COVID-19 e mudanças climáticas foram incluídos, embora ainda seja um tema controverso e sem consenso na comunidade científica sobre suas associações.

Poucas reuniões online também ocorreram entre os INCTs entre 2020 e 2024. Recentemente, o CNPq e algumas FAPs aprovaram 60 novos INCTs em 2023, e há conversas com o MCTI para torná-los um programa regular do CNPq. Isso foi discutido na 75ª reunião anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), realizada em Curitiba, Paraná, de 23 a 29 de julho de 2023. O principal tópico da agenda foi a situação atual e futura dos INCTs.

Uma reunião presencial dos coordenadores dos INCTs ocorreu em janeiro de 2024 na Academia Brasileira de Ciências, no Rio de Janeiro. Talvez o evento mais importante de 2025 foi a Conferência de Resultados Finais do INCT MC Fase II, que foi realizada no Campos do Jordão - SP, no período de 31 de março a 02 de abril de 2025.

O link da conferência e dos resultados e produtos da conferência é:

#### **4. Relatórios finais das componentes do INCT MC2**

##### **4.1 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.

### **As mudanças climáticas**

As mudanças climáticas certamente são uma das maiores ameaças à nossa sociedade e ao planeta [Artaxo, 2020]. Já estão tendo importantes impactos em todos os ecossistemas brasileiros. As atividades econômicas (principalmente produção de combustíveis fósseis e desmatamento de florestas tropicais) são responsáveis pela emissão anual de 62 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa anualmente. Estas emissões têm crescido nas últimas décadas a taxas anuais da ordem de 2% [IPCC 2021]. Este aumento da concentração de gases de efeito estufa é o responsável pela maior retenção de energia na atmosfera, o que eleva a temperatura planetária. Até o momento, já temos um aumento médio de temperatura de 1.6 graus Celsius ao longo dos últimos 100 anos. Este aumento de temperatura não é homogêneo, com algumas regiões como o vale do Rio São Francisco e a região Leste da Amazônia já se aquecendo em cerca de 2.3 graus Celsius. Também estamos observando fortes alterações no regime de chuvas, com redução na precipitação média da ordem de 20% no Nordeste brasileiro, e de cerca de 15% na região Leste da Amazônia [Marengo et al., 2024]. Globalmente o nível do mar já subiu 24 centímetros nos últimos 100 anos, mas com variabilidades regionais importantes, com o Nordeste brasileiro sendo uma região muito vulnerável ao aumento do nível do mar. Uma das faces mais visíveis das mudanças climáticas, é o aumento da frequência e da intensidade dos chamados eventos climáticos extremos, tais como chuvas muito fortes, ondas de calor e secas prolongadas. No início de 2023, observamos chuvas intensas atingirem o litoral do estado de São Paulo causando destruição e mortes, particularmente para a população mais vulnerável [Marengo 2024]. Em 2022 vimos também fortes cheias na Bahia e Minas Gerais. E uma seca muito forte e prolongada no Brasil Central afetou a produção agrícola e a geração de hidroeletricidade em 2021 e 2022. Uma estiagem forte no Rio Grande do Sul em 2022 também prejudicou a produção de alimentos no estado, seguida de alagamentos importantes em 2023.

A queima de combustíveis fósseis (gasolina, diesel, carvão, gás natural etc.) é responsável por 80% das emissões globais de gases de efeito estufa, enquanto o desmatamento de florestas tropicais como a Amazônia é responsável por cerca de 20% das emissões globais. A continuar as atuais emissões, a temperatura média do planeta pode aumentar em cerca de 3 graus ao longo deste século. Nas regiões continentais, como o Brasil, este aumento médio de 3 graus se converte em aumento regional de 4 a 4.5 graus centígrados. A Organização Meteorológica Mundial, o Sistema Copernicus da Comunidade Europeia e a agência atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) declararam que 2023 é o ano mais quente dos últimos 125.000 anos. Tal aumento intenso e rápido de temperatura tem forte impacto no funcionamento de todos os ecossistemas terrestres e marinhos. De acordo com cenários diferentes de emissões ao longo das próximas décadas, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) do ONU, faz previsões de aumento médio de temperatura do planeta de 2.8 a 4.3 graus Celsius. (Figura 1) [IPCC 2021]. O cenário mais favorável (SSP2-4.5) implica no atingimento das metas do Acordo de Paris por todos os países. O cenário de altas emissões (SSP5-8.5) implica a continuidade das emissões atuais., sem fortes políticas de reduções de emissões.

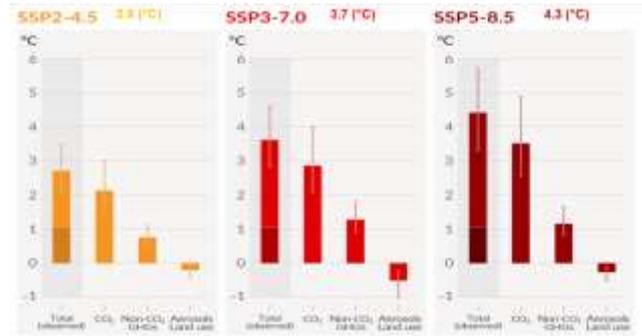


Figura 1 – Aumento médio previsto na temperatura do nosso planeta de acordo com 3 cenários de emissões de gases de efeito estufa. Fonte: Relatório IPCC WG1 AR6, 2022,

A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica do aumento de temperatura desde 1750, para um aquecimento médio de 4 graus no planeta como um todo. Observamos uma forte variabilidade espacial, com os continentes se aquecendo 1 a 1.5 graus a mais que a média global. O Brasil em particular, pode se aquecer de 5 a 5.5 graus, dependendo da região, o que trará enorme impacto no funcionamento dos ecossistemas.

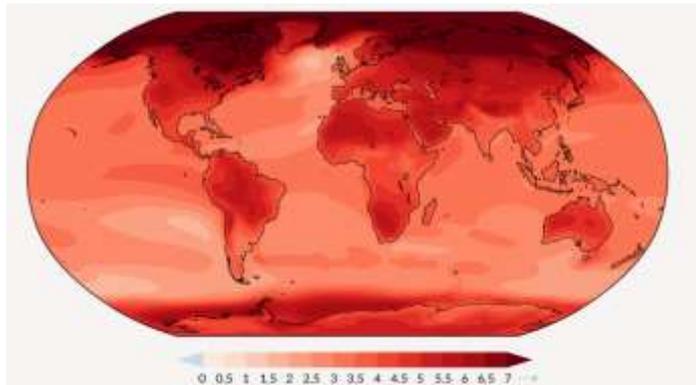


Figura 2 - Distribuição geográfica do aumento de temperatura ao longo deste século, para um aquecimento médio de 4 graus no planeta como um todo. Observamos que o Brasil pode ter um aumento de temperatura de 5.0 a 5.5 graus Celsius (Fonte: Relatório IPCC WG1 AR6, 2022,

Outra mudança importante no clima refere-se aos padrões de precipitação, onde o Brasil Central, Amazônia e Nordeste poderão ter redução importante de chuva, enquanto o Sul do Brasil e Norte da Argentina pode ter aumento de precipitação. Precipitação é chave para o funcionamento dos ecossistemas.

### **Integrando a proteção da biodiversidade à mitigação das mudanças climáticas**

As mudanças climáticas representam uma ameaça crescente e urgente para a biodiversidade global. As espécies endêmicas são particularmente vulneráveis às mudanças climáticas, enquanto espécies exóticas são indiferentes ou até se beneficiam dessas mudanças. 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].

Estamos em plena era do Antropoceno, na qual o homem é um dos principais agentes transformadores [Artaxo et al., 2014]. O crescimento da população humana mundial, que poderá alcançar cerca de 10 bilhões de habitantes em 2050, nos coloca frente a um dos maiores desafios do

século 21: manter a provisão da qualidade ambiental e possibilitar acesso justo a recursos básicos, como água, alimentos e energia, garantindo a segurança e equidade em um cenário de mudanças climáticas e desigualdades sociais. Esta questão é bem trabalhada no último relatório do IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) [IPBES 2019], que coloca o colapso dos serviços ecossistêmicos na agenda ambiental.

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 imprevistas 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 CO<sub>2</sub> 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 km<sup>2</sup>, dos quais 5,5 milhões de km<sup>2</sup> 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].

A questão do desmatamento da Amazônia, seus impactos em praticamente todo o território brasileiro e sua ligação com a expansão da agropecuária são questões centrais para o Brasil [Nobre et al., 2024]. A figura 3 apresenta as taxas anuais de desmatamento da floresta amazônica, produzidas pelo sistema de monitoramento PRODES (Programa de Desmatamento) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) no período de 1977 a 2024. Observamos a forte redução

na taxa de desmatamento de 2003 a 2011, na época de grande expansão da atividade agropecuária, mostrando que as duas questões não estão diretamente interligadas.

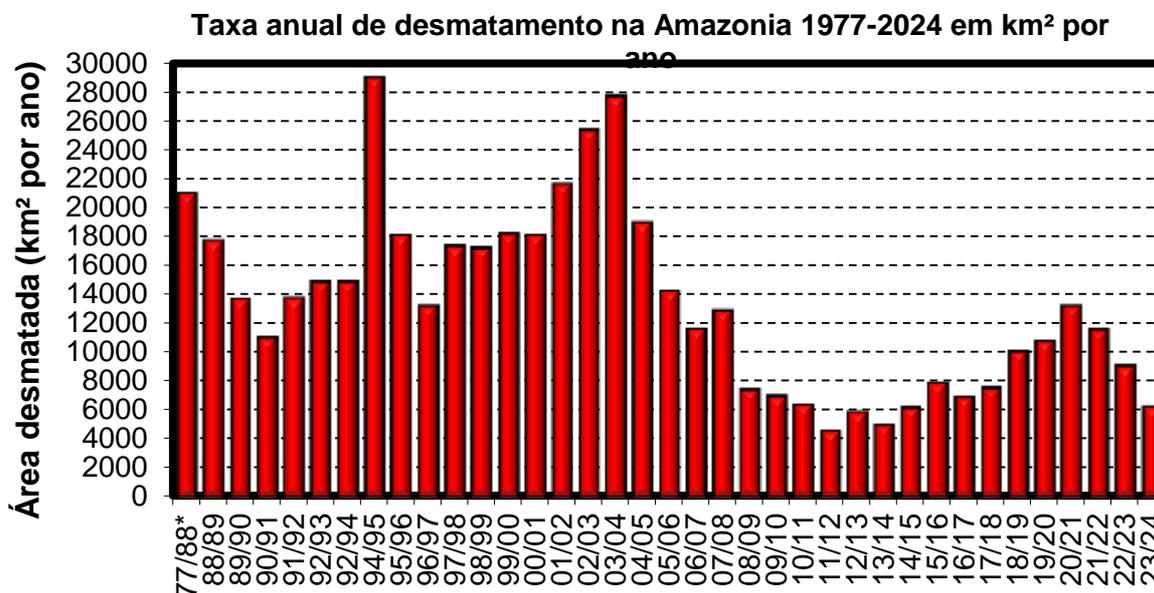


Figura 3 – Taxas anuais de desmatamento da floresta amazônica, produzidas pelo sistema de monitoramento PRODES do INPE, de 1997 a 2024. Nota-se a forte redução na taxa de desmatamento anual nos últimos 3 anos.

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 MapBiomas 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 km<sup>2</sup>, 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.

No Brasil, 65% da matriz elétrica é de fonte hídrica. O mapeamento das unidades de aproveitamento hidrelétrico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indica que as unidades presentes dentro dos limites do Cerrado e as unidades externas que se encontram em bacias fortemente influenciadas pelo bioma representam 52% de todas as unidades do país. A Bacia do Paraná, que contribui com a usina hidrelétrica da Itaipu, recebe 47% de suas águas do Cerrado.

As projeções de aumento do consumo de energia e da demanda mundial por produtos agrícolas e a manutenção do atual modelo de expansão e intensificação da agricultura em um contexto de mudanças na temperatura e na precipitação regional tendem a agravar a degradação do Cerrado e a perda de biodiversidade, comprometer o seu funcionamento ecológico e impactar ainda mais grupos sociais já vulneráveis, como povos indígenas e populações tradicionais.

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]. Dentre os impactos relacionados com as mudanças do clima, estão o aumento da temperatura e do nível do mar, a perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos, a alteração nos regimes de chuvas, e a intensificação dos desastres naturais. O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é um dos principais fatores causadores do aquecimento global, principalmente, a partir da revolução industrial, devido à queima de combustíveis fósseis e mudanças do uso e cobertura da terra. No Brasil, as emissões de GEE, principalmente de CO<sub>2</sub>, estão intimamente relacionadas ao papel que a vegetação natural tem como reservatório de carbono. 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, contribui significativamente para a 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 CO<sub>2</sub>.

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.

A posse da terra é um fator crítico nas regiões tropicais que determina as mudanças no uso da terra e as estratégias de conservação. Um componente importante das políticas para diminuir o desmatamento na região amazônica foi a designação da região como patrimônio nacional e a implementação de áreas protegidas, o que foi facilitado pelo fato de a maior parte das terras da Amazônia ser federal. Apesar de sua importância biológica, o Cerrado não é considerado patrimônio nacional, e apenas uma pequena porcentagem do Cerrado está protegida em unidades de conservação. A participação mais inclusiva e consequente das comunidades locais e tradicionais nos debates e nas decisões para a região é vital para o progresso. O papel da expansão agrícola e das práticas associadas nas profundas mudanças que estão ocorrendo na região impõe a necessidade de um forte compromisso das partes interessadas nacionais e internacionais com a conservação desse conjunto único de ecossistemas.

Da mesma forma que a Ciência nos revela os problemas, ela também é capaz de oferecer soluções que vão desde estratégias adequadas de restauração, planejamento e gestão de paisagens diversificadas e multifuncionais até o desenvolvimento de novos modelos de agricultura que preconizam a conservação e reabilitação dos sistemas alimentares e agrícolas. Alternativas existem, mas necessitam o suporte de uma visão estratégica, responsabilidade e vontade política. O enfrentamento das ameaças a esse bioma extremamente importante, porém negligenciado, exigirá a expansão das áreas protegidas e o aprimoramento da gestão das áreas já estabelecidas, sistemas de monitoramento ambiental sistemático e a restauração de áreas degradadas para cumprir as leis ambientais do país e seus compromissos com acordos internacionais relacionados a mudanças climáticas, conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável.

### **A adaptação do Brasil ao novo clima**

A localização tropical, a estrutura socioeconômica fortemente dependente do regime de chuvas, as inadequações urbanísticas e enormes desigualdades sociais fazem do Brasil um país singular, ambientalmente falando. No contexto das mudanças climáticas, esforços de adaptação podem gerar vários benefícios adicionais, como melhoria da produtividade agrícola, inovação, saúde e bem-estar, segurança alimentar, conservação da biodiversidade, bem como redução de riscos e danos. A Plataforma Adapta Brasil é fundamental na direção da construção de uma sociedade mais resiliente às mudanças climáticas [Adapta Brasil, 2025]. A plataforma integra índices e Indicadores de risco de impactos das mudanças climáticas no Brasil, integrados em uma única plataforma.

As ações de adaptação climática – compreendida como processos de ajustamentos para antecipar impactos adversos das mudanças climáticas que resultam na redução da vulnerabilidade – tendem a ser mais facilmente implementadas e organizadas quando buscam sinergias com políticas, recursos e outras medidas já existentes, incluindo ações visando à sustentabilidade, qualidade de vida e melhoria de infraestrutura.

O Brasil tem um plano de adaptação climática (PNA), lançado em 2016, que visa orientar iniciativas para gestão e redução dos riscos provenientes dos efeitos adversos das mudanças climáticas no médio e nos longos prazos, nas dimensões social, econômica e ambiental. Todavia, até o momento, um planejamento de longo prazo voltado à adaptação climática ainda não ganhou projeção no país como um todo. Entre as razões para esse atraso estão a própria complexidade envolvida na adaptação, as limitações econômicas, institucionais e políticas e, em particular nas cidades, as relações de interdependência entre mudanças do clima, dinâmicas do planejamento urbano e questões políticas. Recentemente, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e o INPE lançaram a plataforma Adapta Brasil, que sugere uma série de políticas públicas a serem implementadas.

Embora melhorias nos níveis de renda, educação, saúde e outros indicadores socioeconômicos sejam importantes para reduzir a vulnerabilidade às mudanças do clima em geral, considerando o conjunto de riscos específicos que as alterações climáticas representam em particular para as cidades (por exemplo, inundações, secas, aumento do nível do mar, ilhas de calor), há também uma necessidade urgente de considerar as capacidades específicas necessárias para superar e se

recuperar desses estressores, incluindo, por exemplo, mapeamentos de áreas de risco, sistemas de alerta precoce e planejamento de enfrentamento a desastres naturais.

A falta de dados e informações úteis e utilizáveis, que possam ser mobilizados para subsidiar gestão, planejamento e governança, é frequentemente identificada como uma das principais barreiras para o avanço da adaptação às mudanças climáticas, traduzindo-se em paralisia e inação por parte dos tomadores de decisão. Nesse contexto, tão importante quanto a capacidade de produzir informação técnico-científica que seja facilmente convertida em estratégias, políticas e ações de adaptação, é promover maior envolvimento dos usuários da informação (os atores institucionais, por exemplo) na produção e circulação do conhecimento. A produção e disponibilização desses dados, que incluam métricas robustas e possam ser atualizados periodicamente e que estejam conectados às especificidades da realidade brasileira, considerando um conjunto de variáveis que refletem na capacidade adaptativa, podem impulsionar ações e políticas públicas de adaptação.

Nesse cenário, as pesquisas também devem buscar compreender melhor as respostas sociais e individuais às mudanças climáticas, levando em conta que os governos, embora cumpram papel importante no planejamento efetivo de adaptação, não são capazes, sozinhos, de resolver a crise climática dada sua complexidade e multidimensionalidade [Artaxo, 2012,2019]. Ademais, é preciso entender que adaptação requer parcerias, alianças estratégicas e outras formas de colaboração entre diferentes setores e organizações. Pesquisas sobre as melhores estratégias de adaptação são essenciais, pois estas, em geral, envolvem soluções locais ou regionais.

### **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.

Precisamos urgentemente de políticas de adaptação ao novo clima que sejam consequentes e baseadas em Ciência. Importante sempre salientar que a população de mais baixa renda é a que mais sofre os impactos da mudança climática, seja nos eventos climáticos extremos, no aumento dos preços dos alimentos, nas dificuldades de acesso à água, e outros impactos importantes.

Importante salientar que o IPCC coloca que temos todas as tecnologias necessárias para reduzir pela metade as emissões de gases de efeito estufa. O custo da produção de energia através de energia solar e eólica é menor hoje do que queimar petróleo, gás natural ou carvão. E porque a transição energética não ocorre? Os governos dos 196 países da ONU são essencialmente controlados pela indústria de energia, do petróleo e atividades relacionadas, tais como produção de automóveis, infraestrutura industrial etc.

É importante que o Brasil aproveite suas vantagens estratégicas na questão das mudanças climáticas. Cerca de 50% de nossas emissões de gases de efeito estufa estão associados ao desmatamento da Amazônia. Nenhum outro país de nosso planeta pode reduzir suas emissões em 50% muito rapidamente e com pouquíssimo custo, além de receber com isso muitos co-benefícios ambientais e econômicos. O Brasil tem o maior programa de biocombustíveis do mundo. Temos também o maior potencial mundial de geração solar e eólica do planeta.

Mas, o Brasil também tem suas vulnerabilidades. Temos uma economia baseada no agronegócio, que é sensível à chuva e ao clima. Nossa geração de hidroeletricidade depende da chuva. O Nordeste brasileiro está em processo de desertificação, e pode vir a ser uma região onde atividades econômicas sejam difíceis daqui a algumas décadas. Também temos 8.500 Km de áreas costeiras que são vulneráveis ao aumento do nível do mar, e muitas cidades na costa que podem sofrer impactos significativos enquanto o mar avança.

As mudanças climáticas que já ocorreram são irreversíveis em escala de tempo de alguns milhares de anos, pois o tempo de permanência na atmosfera dos gases de efeito estufa pode ser medidos em séculos ou milênios. O único processo conhecido de remover dióxido de carbono da atmosfera na

escala necessária é a fotossíntese. Mas, plantar árvores na escala necessária para reverter as emissões já feitas não é algo viável ou possível.

Aumentar a resiliência socioambiental é muito importante. Para além do potencial impacto nos ecossistemas e em nossa sociedade, as mudanças climáticas podem ser vistas como uma oportunidade para transformações socioeconômicas significativas e para agilizar o desenvolvimento em diversos setores, incluindo indústria, agronegócio, sistemas de energia, transportes etc., buscando a transição para uma sociedade mais sustentável.

As mudanças do clima já estão causando impactos significativos em todos os cantos de nosso planeta, mas são a oportunidade de refazer a estrutura socioeconômica de nosso planeta. É claro que o atual modelo de desenvolvimento socioeconômico que temos é insustentável. As desigualdades socioeconômicas e o modelo de exploração predatória da natureza associada a nosso sistema estão levando a destruição de nossa sociedade. Vamos trabalhar para que os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) (ilustrados na figura 4) sejam o guia para a construção de uma nova sociedade, com menores desigualdades sociais e mais sustentável.

Temos como tarefa auxiliar o país a desenvolver estratégias baseadas em ciência para que o Brasil cumpra suas obrigações internacionais (as National Determined Contribution - NDC) associadas ao Acordo de Paris. O auxílio na formulação de políticas públicas baseadas em ciência em todos os níveis (municipal, estadual, nacional e global) é tarefa fundamental. Estas atividades exigirão grande esforço científico da academia em parceria com os vários setores da sociedade. A adaptação às mudanças climáticas nas diversas regiões do nosso país também irá requerer o desenvolvimento de ciência olhando para as necessidades da sociedade. Os desafios envolvidos na redução do impacto das ações humanas no ambiente, alinhados à necessidade do desenvolvimento sustentável e redução de desigualdades sociais, passam pelo desenvolvimento de sólidos resultados científicos. 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.

## Referências

Adapta Brasil 2025 - <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/> acessada em 22 de maio de 2025.

Artaxo P., Hansson H. C., Machado L.A. T., Rizzo L. V. (2022a) Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. *PLOS Climate* 1 (8): e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>, 2022.

Artaxo, P., Hansson, H-C, et al., 2022b. Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 74 (2022), 24–163. DOI: <https://doi.org/10.16993/tellusb.34>.

Artaxo, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? *Revista USP*, número 103, page. 8-12, 2014. <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/99279> .

Artaxo, P., As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, vol. 34, número 100, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo 2020. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>.

Artaxo, P., Break down boundaries in climate research. *World View Section, Nature* 481, 239, 2012.

Artaxo, P., Working together for Amazonia. *Editorial Science Magazine*, Vol. 363, Issue 6425, doi: 10.1126/science.aaw6986, 2019.

Bustamante, M., O Cerrado e as mudanças climáticas. *SBPC Ciência e Cultura* 76 (3), 01-04, 2024.

Bustamante, MMC, JS Silva, A Scariot, AB Sampaio et al., Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil -

Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Volume 24, Pages 1249-1270, 2019.

IPBES 2019 - Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – IPBES. (2019). Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES. <https://ipbes.net/>.

IPCC AR6 WGI (2021). V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

Malecha, A., e M. M. Vale, 2024). As mudanças climáticas e a biodiversidade. Revista Ciência e Cultura, SBPC <https://revistacienciaecultura.org.br/?artigos=as-mudancas-climaticas-e-a-biodiversidade>, acessada em 22 de maio de 2025.

Marengo, J. A., JC ESPINOZA, R FU, JC JIMENEZ MUÑOZ, LM ALVES, et al., Variabilidade de longo prazo, extremos e mudanças de temperatura e hidrometeorologia na Região Amazônica: Uma revisão. Acta Amazonica 54, e54es22098.

Marengo, J.A., Impactos sociais dos eventos climáticos extremos. Ciência e Cultura 76 (3), 01-08. 2024.

Nobre, P., Ismael Nobre e Carlos A. Nobre., A floresta Amazônica, sociobioeconomia e clima. Diálogos Soberania e Clima V3. Nº 3. 2024.

SPA 2021 - SPA: The Amazon We Want. Science Panel for the Amazon. Executive Summary of the Amazon Assessment Report 2021 (48 p.). The Amazon We Want. United Nations Sustainable Development Solutions Network. DOI: 10.55161/RWSX6527, ISBN 9781734808001. <https://www.theamazonwewant.org>. 2021.

## 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 (Gasparini et al., 2015; Romanello et al., 2023). Já os efeitos indiretos envolvem a influência dessas variáveis ambientais sobre componentes ecológicos e sociais, modificando os padrões de risco de doenças infecciosas, agravos respiratórios e desastres relacionados ao clima, como enchentes, secas e ondas de calor (Haines et al., 2006; Ebi et al., 2021).

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; Stoupel 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. Diante da natureza multifatorial desses processos, são necessários abordagens metodológicas que combinem diferentes dimensões temporais e escalas analíticas. Os modelos conceituais tem papel estruturante, organizando o conhecimento interdisciplinar e orientando a construção de métricas para avaliação da vulnerabilidade. Os estudos retrospectivos, especialmente os de base ecológica, são fundamentais para explorar tendências históricas e associações entre variáveis ambientais e desfechos em saúde. Já os estudos prospectivos, baseados em modelagem preditiva e integração de dados geoespaciais, permitem antecipar cenários de risco e subsidiar ações preventivas (IPCC, 2014; WHO, 2018).

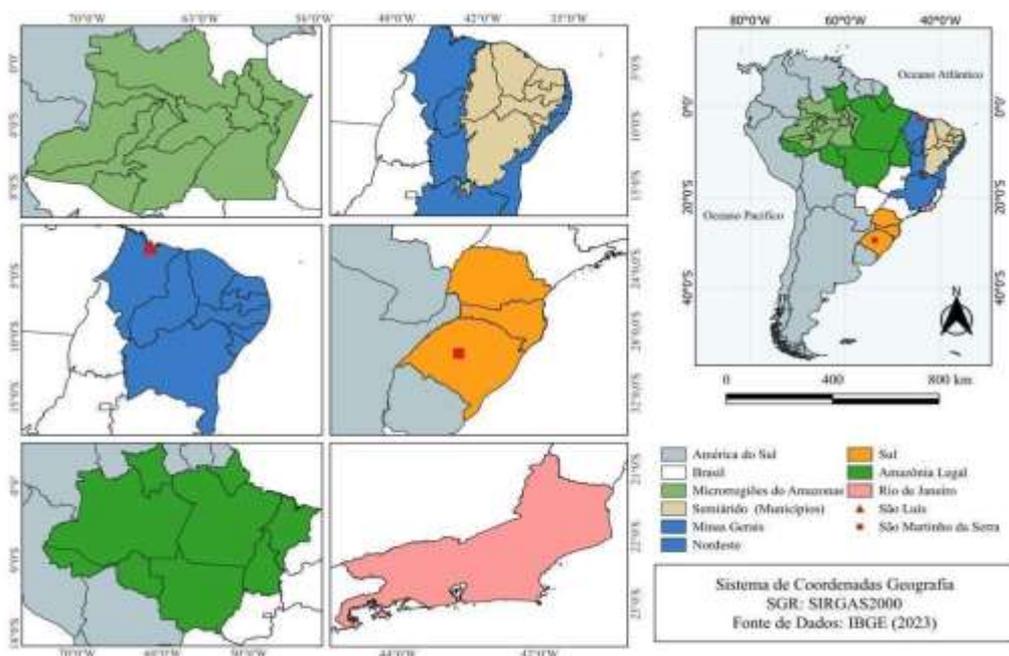
Neste estudo, três foram as abordagens principais:

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**

As análises desta pesquisa foram conduzidas em diferentes regiões do território brasileiro, selecionadas conforme os objetivos específicos de cada uma das três abordagens da Componente Saúde do INCT-MC2 (Figura 1).

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).



**Figura 1.** Localização das áreas de estudo consideradas na Componente Saúde do INCT-MC2, organizadas em três abordagens principais: (a, b) **Abordagem Conceitual** – Microrregiões do estado do Amazonas e municípios do Semiárido do Nordeste; (c, d) **Abordagem Retrospectiva** – Regiões Sul e Nordeste do Brasil; (e, f) **Abordagem Prospectiva** – Municípios selecionados do estado do Rio de Janeiro e da Amazônia Legal. O mapa geral (à direita) apresenta a distribuição geográfica das áreas de abrangência no contexto da América do Sul, com destaque para os municípios de São Luís (MA) e São Martinho da Serra (RS), utilizados como referência para dados geomagnéticos. Sistema de Coordenadas Geográficas: SIRGAS2000. Fonte dos dados: IBGE (2023).

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 grau 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.

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.

Em um aprofundamento do estudo da vulnerabilidade e saúde em situações de extremos climáticos, foi produzido um modelo evidenciando as conexões entre a seca, seus determinantes sociais e ambientais e os impactos à saúde humana. Dados secundários de fontes oficiais como internações, mortalidade infantil, pobreza e renda foram utilizados em uma análise multivariada (i.e. análise fatorial) para i) a identificação de fatores subjacentes que balizam o fenômeno socioambiental das secas, ii) a construção de um Índice de Vulnerabilidade da Saúde por método de regressão e iii) a análise da distribuição espacial do fenômeno 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.

### Frequências da Ressonância de Schumann (RS)

A segunda etapa teve como foco a análise das frequências da Ressonância de Schumann (RS), consideradas variáveis geofísicas complementares aos índices clássicos. As frequências ELF da RS foram extraídas a partir das séries horárias dos componentes do campo magnético terrestre, registradas nas estações de São Martinho da Serra (RS) e São Luís (MA), operadas pelo INPE (DENARDINI, 2018).

Para a identificação das frequências de ressonância de Schumann, utilizamos o modelo geomagnético IGRF-13, o qual incorpora variáveis geográficas como latitude, longitude, altitude e o Dip das estações magnéticas analisadas. A influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) sobre as medições exigiu o uso da Transformada Discreta de Fourier (DFT), a fim de decompor os sinais e extrair as componentes de frequência relevantes. A equação da DFT utilizada é:

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{-\frac{i2\pi nk}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad \text{Eq.2}$$

Onde  $H_n$  representa a transformada para a frequência  $n$ ,  $h_k$  são os valores da amostra temporal no ponto  $k$ , e  $N$  é o número total de amostras coletadas pelas estações SLZ e SMS. A aplicação do modelo IGRF-13 permite estimativas detalhadas das componentes do campo geomagnético terrestre, considerando sua variação espaço-temporal. Com base nesses dados, calcula-se o ângulo de inclinação magnética (Dip), o qual é detectado pelas perturbações geomagnéticas, a equação utilizada para este cálculo é:

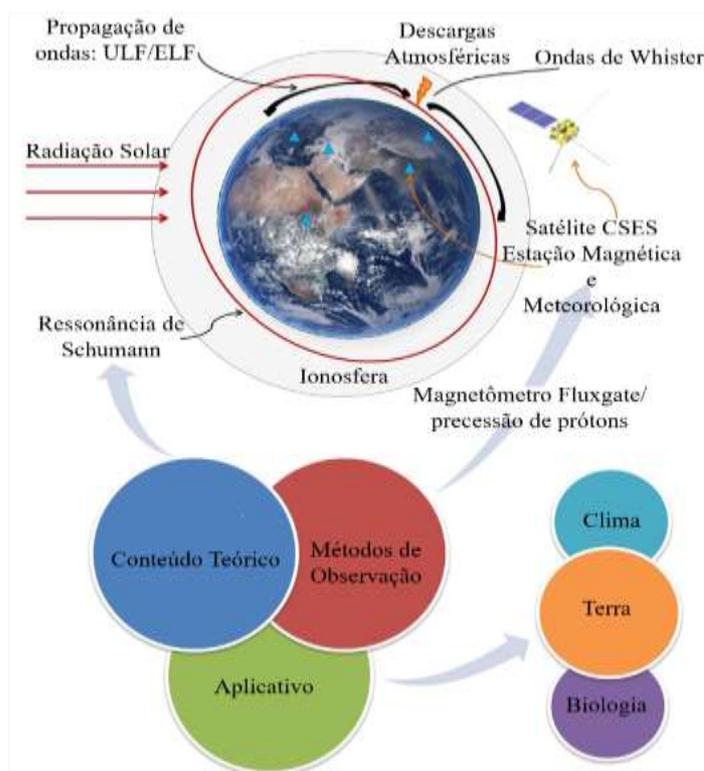
$$\theta_{dip} = \arctan\left(\frac{1}{2} \tan \tan I\right) \quad \text{Eq.3}$$

O termo  $I$  é o ângulo de inclinação magnética local da estação, medindo a inclinação do campo em relação à superfície da Terra. Com o ângulo do Dip calculado, aplica-se o método de Schumann (1952) para estimativas as frequências ressonantes da cavidade Terra-ionosfera, sobre as duas regiões, conforme a seguinte equação:

$$f_n = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)} \quad \text{Eq.4}$$

Onde,  $a$  é o raio da terra,  $c$  a velocidade da luz, e o produto dentro da raiz  $n(n+1)$ , será denominado constante de separação dos polinômios de Legendre, em que prova a forma esférica da cavidade, podendo obter a sucessão de frequências de SR, esse termo dentro da raiz será substituído pelos dados observados pelas estações.

A Figura 2 apresenta um diagrama adaptado que ilustra as interações entre a Ressonância de Schumann (RS), o campo geomagnético e os fenômenos atmosféricos, destacando o impacto dessas frequências na biometeorologia humana. Este diagrama foi utilizado nesta etapa para contextualizar a análise das frequências ELF da RS como variáveis geofísicas complementares aos índices geomagnéticos clássicos, fornecendo um panorama das conexões entre as oscilações eletromagnéticas naturais e os processos atmosféricos.



**Figura 2:** a) Diagrama representando as interações entre a ressonância Schumann, o campo geomagnético e fenômenos atmosféricos. Destaca-se o impacto dessas frequências na Biometeorologia Humana (adaptada de Liu 2023).

A extração espectral foi realizada por meio da Transformada Discreta de Fourier (DFT), conforme metodologia apresentada em Costa et al. (2024). As associações entre as frequências dominantes e os dados de mortalidade foram avaliadas por meio de correlações de Pearson (nível de significância  $p < 0,01$ ) e análise temporal.

### **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 *Migonemyia 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.

### **Aspectos éticos**

Este estudo utilizou exclusivamente dados secundários, públicos, agregados e anonimizados. Por essa razão, está isento de avaliação pelo Comitê de Ética em Pesquisa, conforme estabelece a Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

### **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. Os trabalhos mobilizaram metodologias quantitativas baseadas em indicadores socioambientais, de saúde e climáticos, permitindo a construção de índices sintéticos que expressam a exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa dos municípios, além da formulação de cenários futuros. Essa diversidade de abordagens e contextos permitiu identificar as múltiplas dimensões que modulam a vulnerabilidade em saúde nos territórios analisados e subsidiar políticas públicas mais equitativas e territorializadas. A seguir, são apresentados os principais achados desses estudos.

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.

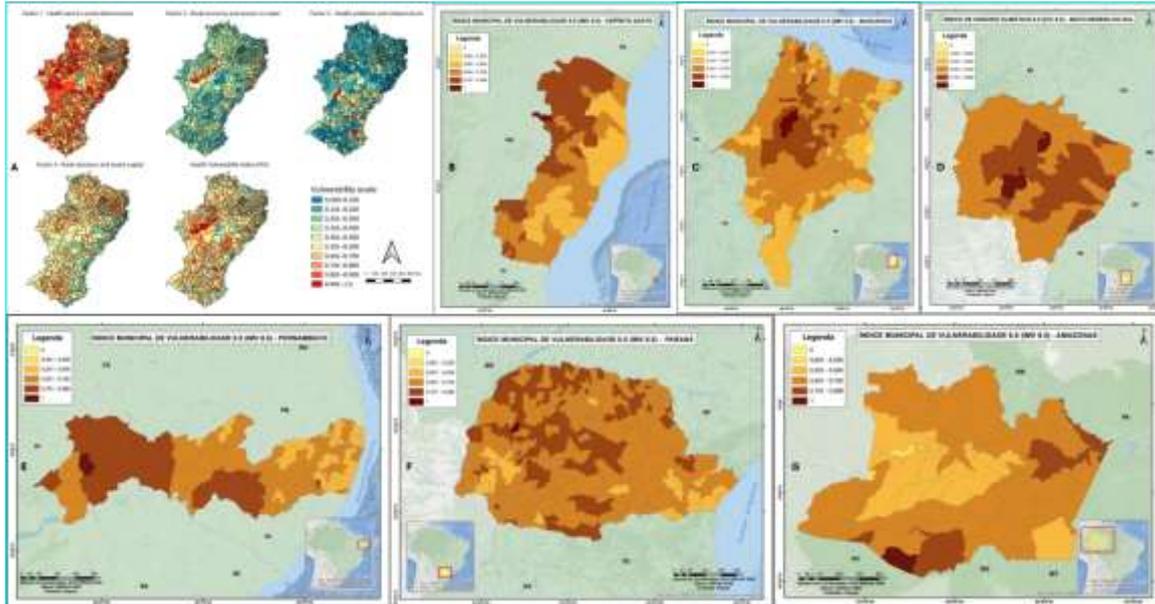
No Mato Grosso do Sul, a vulnerabilidade concentrou-se nas regiões Centro-Norte e Centro-Oeste, com projeções de agravamento para cenários climáticos futuros. Municípios com deficiências estruturais e baixa organização sociopolítica destacaram-se como os mais suscetíveis. No Espírito Santo, menos de 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.

O IVS mostrou-se uma ferramenta eficaz para orientar políticas públicas ao evidenciar as disparidades intra-regionais e destacar os fatores modificáveis que influenciam os impactos das secas no médio e longo prazo. Dessa forma, o estudo contribuiu para o planejamento de estratégias mais assertivas de mitigação e adaptação, direcionando ações para os contextos socioeconômicos e ambientais específicos das áreas mais vulneráveis.



**Figura 3:** Distribuição Espacial da Vulnerabilidade Climática e em Saúde em Estados Brasileiros (B-G) e na Região Semiárida (A)

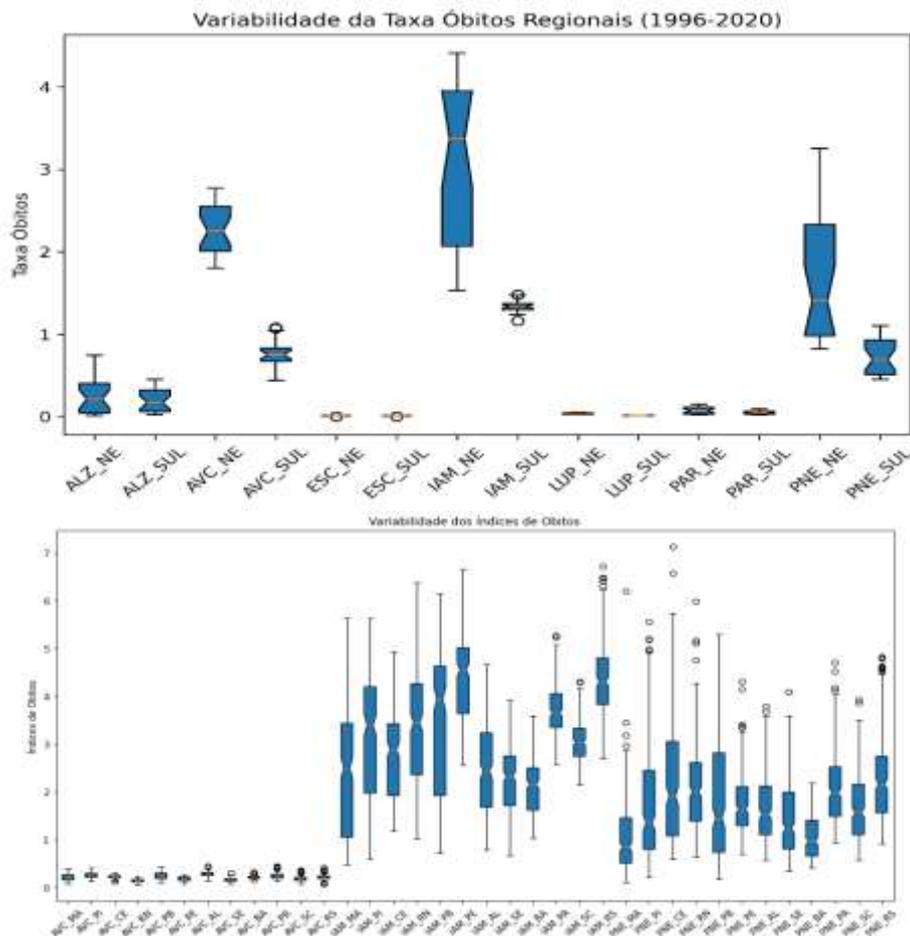
### Abordagem Retrospectiva - Impactos da variabilidade geomagnética sobre a mortalidade

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 distribuição espacial da área de estudo encontra-se representada na Figura 1 (c, d), que 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. A Figura 6 ilustra a variabilidade anual das taxas de mortalidade para IAM, Pneumonia e AVC nas duas regiões, destacando a distribuição dos dados e a presença de outliers significativos.



**Figura 4:** Boxplots representando a variabilidade anual das taxas de mortalidade nas regiões Nordeste (NE) e Sul (S) do Brasil entre 1996 e 2020. (a) Distribuição das taxas de óbitos por: Alzheimer, AVC, Esclerose Múltipla, Infarto Agudo do Miocárdio (IAM), Lúpus, Parkinson e Pneumonia. (b) Comparação sazonal das taxas de mortalidade por IAM, pneumonia e AVC, destacando as variações entre as estações de verão e inverno nas regiões NE e S.

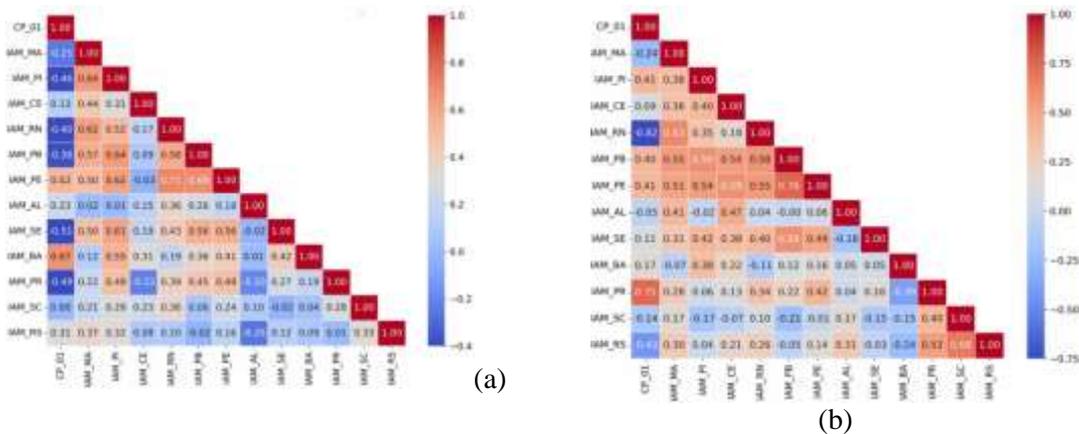
A Esclerose Múltipla e o Lúpus apresentaram as menores taxas de mortalidade, com maior variabilidade em estados do Nordeste, onde os eventos extremos de mortalidade se concentraram em períodos de elevada atividade geomagnética (índice  $A_p$ ). Por outro lado, as Causas Externas (acidentes, suicídios 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  $A_p$  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.

A Figura 5 apresenta a correlação entre os componentes principais identificados pela PCA e os índices  $A_p$  e SID, destacando o padrão de dipolo sazonal entre as regiões Sul e Nordeste. Os componentes principais foram plotados para o verão e o inverno, destacando os estados com maior variabilidade nas taxas de IAM, especialmente Bahia, Sergipe, Paraná e Rio Grande do Norte.



**Figura 5:** Correlação entre os componentes principais da PCA e os índices Ap e SID, diferenciando as associações sazonais (a) verão, (b) inverno

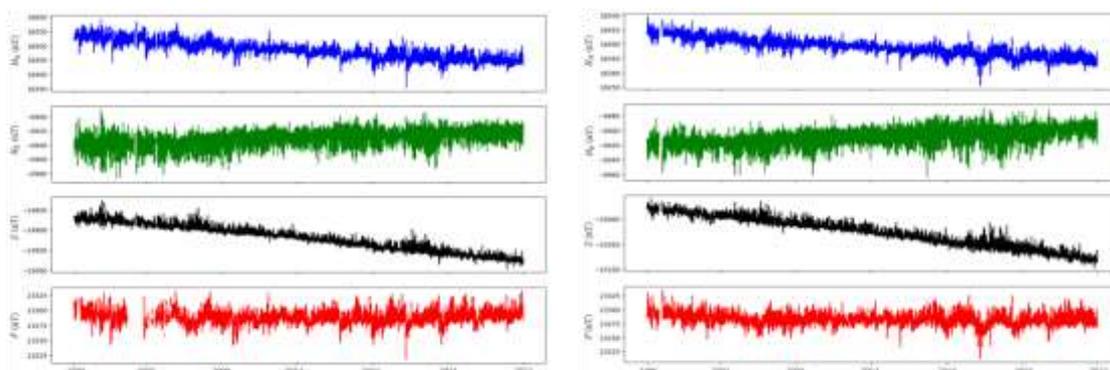
Esses resultados reforçam a importância da análise regionalizada dos dados e da consideração das características sazonais ao investigar as interações entre variáveis geofísicas e mortalidade por causas específicas no Brasil.

### Frequências da Ressonância de Schumann (RS)

A análise das variações naturais da Ressonância de Schumann (RS) permitiu identificar padrões de associação relevantes com a taxa de por causas específicas e causas externas nas regiões Sul e Nordeste do Brasil. Utilizando dados geofísicos obtidos nas estações magnéticas de São Martinho da Serra (RS) e São Luís (MA), representadas na Figura 1, busca-se compreender como as frequências extremamente baixas (ELF), características da RS, interagem com sistemas fisiológicos humanos.

Na Figura 6, são apresentadas as componentes  $H_N$ ,  $H_E$ ,  $Z$  ou  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , dois sistemas de coordenadas, usados para representar dados de campo geomagnético coletados em observatórios e estações magnéticas. Esses sistemas de coordenadas ajudam a descrever a natureza tridimensional do campo magnético da Terra, temos a representação das componentes da Estação de São Luis (SLZ) no Maranhão (Figura 6a), está localizado na latitude de  $02^{\circ}35'39''S$ , longitude de  $44^{\circ}12'35''W$ , com altitude de 032m e Dip de  $-07.26^{\circ}$ ; e da Estação de São Martinho da Serra (SMS) no Rio Grande do Sul (Figura 6b), com latitude de  $29^{\circ}26'13''S$ , longitude de  $53^{\circ}49'22''W$ , altitude de 462m e Dip  $-36.65^{\circ}$ , com base nas componentes foram realizados os calculos para obter-se as frequencias de Schumann pela Eq.4, para serem correlacionadas com os dados de taxa de mortalidade.

Conforme apresentado na Figura 6, durante os períodos de maior atividade solar, observou-se um aumento nas correlações entre as frequências da RS e os registros de óbitos por infarto agudo do miocárdio (IAM) e pneumonia, indicando possíveis padrões sazonais nessas relações.



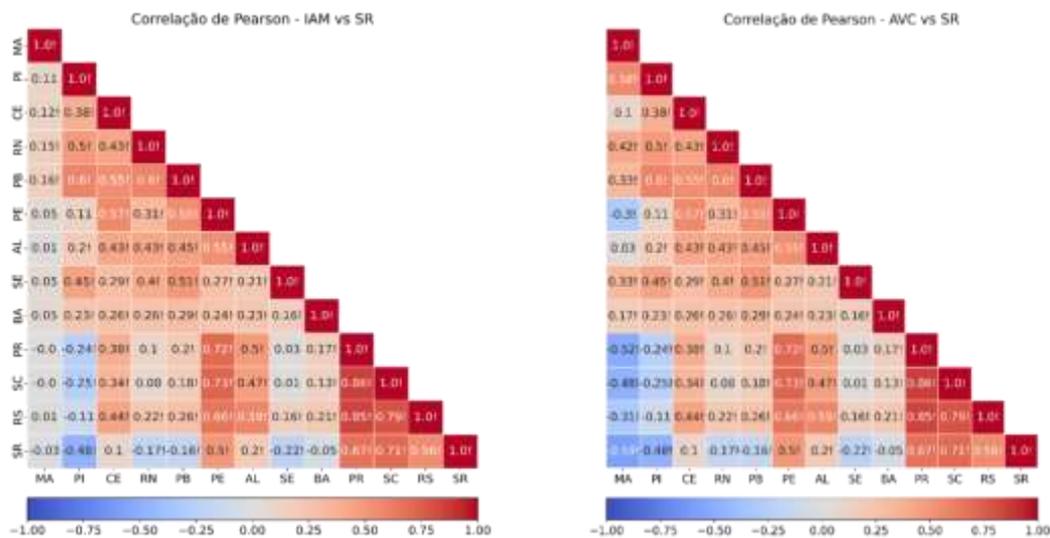
**Figura 6:** Componentes do Campo Magnético da Terra, obtidos pela estação magnética de São Martinho da Serra, onde  $H_N$ (nT) em azul é o Campo Norte Horizontal,  $H_E$  (nT) em verde

é o Campo Leste Horizontal, Z(nT) em preto é Campo Vertical e Intensidade do Campo Total F(nT) em vermelho.

O escopo da pesquisa inclui doenças de natureza neurológica, autoimune e cerebrovascular, como Alzheimer, Parkinson, lúpus, esclerose múltipla e acidente vascular cerebral (AVC). A partir da análise das séries históricas de mortalidade, identificaram-se padrões estatísticos que indicam respostas específicas desses sistemas biológicos às variações no campo eletromagnético terrestre. Os dados, especialmente os oriundos da estação do Rio Grande do Sul, revelaram maior sensibilidade dessas condições durante os períodos de intensificação das frequências da SR (PRICE, 2021; Dimitrova, 2014 )

Ao correlacionar os dados epidemiológicos, durante os picos de intensificação das frequências da Ressonância de Schumann (SR), nas faixas proximos de 7,73 Hz e 14,1 Hz, houve aumento estatisticamente significativo na taxa de mortalidade associada a doenças neurológicas e autoimunes. Em especial os dados da estação SMS indicam um aumento positivo, isso fica claro na Figura 7, para IAM e AVC, para os três estado proximos da SMS, isso coincidem com SOARES (2020) citar que as oscilação ocorrem principalmente na região F, que é a mais importante em matéria de radiopropagação, pois é nela que acontece a reflexão de ondas em diversas frequências, incluindo as mais altas até 20 MHz, causando oscilações que afetam o campo total, gerando os picos de frequencias de schuman (SCHUMANN, 1952; ZILLI VIEIRA, 2019)

No correlograma apresentado na Figura 7 os resultados da taxa de mortalidade de IAM, demonstraram uma influência significativamente em relação as frequências de ressonância Schumann na região Sul do Brasil, com significância estatística (p-valor < 0,05) nos três estados analisados. Em contraste, nos estados do Nordeste, a correlação foi inconsistente, com índices não significativos na Bahia e no Ceará, mas com uma correlação significativa observada no estado do Piauí, também ao nível de 5% de significância. Essa diferença regional pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a localização geográfica, a intensidade das variações geomagnéticas e as condições atmosféricas específicas de cada região. De maneira geral, foi observada uma significância estatística com  $p < 0,05$  para todos os estados, com exceção da Bahia e no Ceará, que não apresentaram resultados significativos.



**Figura 7:** Correlograma entre as frequências da Ressonância de Schumann (RS) e as taxas mensais de mortalidade por IAM e AVC, nos estados das regiões Nordeste e Sul do Brasil, no período de 1996 a 2022. Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para cada estado. O nível de significância está indicado por (\*\*) para  $p < 0,01$ , (\*) para  $p < 0,05$ , e ausência de símbolo para valores não significativos.

Na região Sul, essas correlações mostraram-se mais expressivas, possivelmente em função da localização em latitudes mais susceptíveis à influência de variações geomagnéticas. Esse padrão diferencial observado é justificado pela alta sensibilidade desses sistemas às variações

eletromagnéticas naturais que respondem a estímulos ambientais que interferem na atividade elétrica cerebral, podendo agravar condições como Alzheimer e Parkinson.

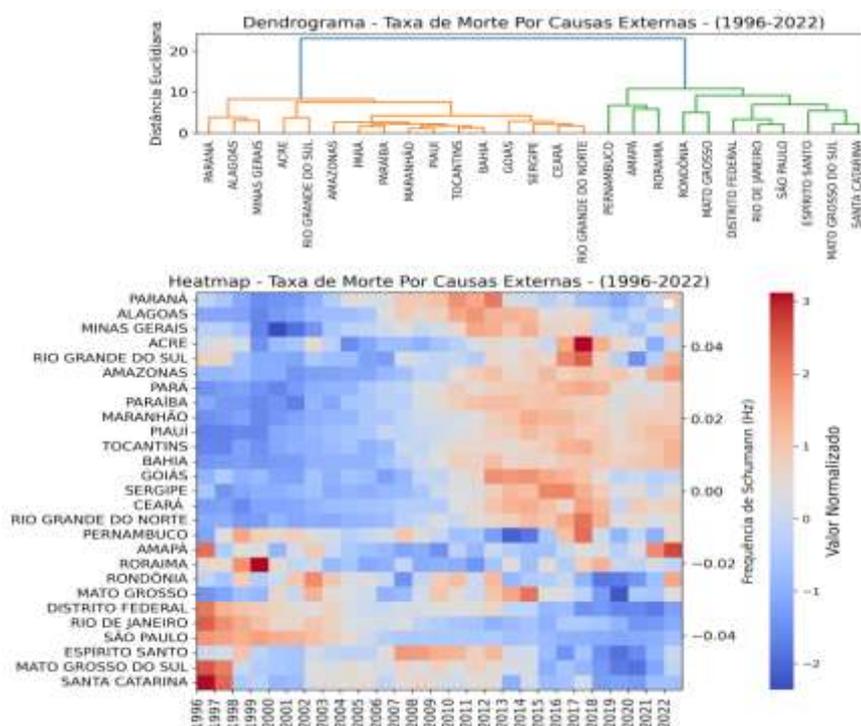
Já o sistema imunológico, por sua vez, é regulado por mecanismos que também podem ser influenciados por estresse geomagnético, o que ajuda a explicar a associação com doenças autoimunes como lúpus e esclerose múltipla. Já o sistema circulatório é diretamente afetado pela mudança das oscilações no campo geomagnético, as quais podem alterar a pressão arterial e a frequência cardíaca, contribuindo para a ocorrência de eventos como acidentes vasculares cerebrais (AVC), essas análises oferece uma base consistente para investigações futuras sobre os efeitos ambientais na saúde coletiva.

A Figura 8 apresenta a distribuição das taxas de mortalidade por causas externas (acidentes, homicídios e suicídios) nos estados brasileiros entre 1996 e 2022, combinando um dendrograma e um mapa de calor. O dendrograma evidencia a formação de agrupamentos de estados com padrões semelhantes de mortalidade, destacando três grandes clusters: um composto principalmente por estados do Nordeste, outro por estados do Centro-Oeste e Norte, e um terceiro por estados do Sul e Sudeste.

O mapa de calor revela a distribuição temporal das taxas de mortalidade por causas externas, indicando um aumento progressivo ao longo do período analisado, especialmente entre 2015 e 2022. As áreas em vermelho representam os picos de mortalidade, concentrados principalmente no Nordeste (Pernambuco, Ceará, Bahia) e em estados do Sudeste (São Paulo e Rio de Janeiro), sugerindo um padrão geográfico associado à densidade populacional e à urbanização.

A análise também explorou as oscilações mensais das frequências ELF da Ressonância de Schumann (RS), que foram incorporadas ao mapa de calor como uma camada adicional. Os picos mais acentuados nas frequências de 7,73 Hz e 14,1 Hz coincidiram com períodos de aumento nas taxas de homicídios e suicídios, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas do Nordeste. Esse padrão sugere uma possível associação entre variações geomagnéticas e comportamento humano, corroborando achados prévios que apontam para a influência do ambiente eletromagnético na regulação emocional e impulsividade (BABAYEV, 2007).

O método permitiu a combinação dos dados de mortalidade com indicadores do campo geomagnético e estimulou a investigação de fatores contextuais, como a exposição prolongada a campos eletromagnéticos de baixa frequência e os estressores sociais em contextos urbanos.



**Figura 8:** Dendrograma e mapa de calor representando a distribuição das taxas de mortalidade por causas externas (acidentes, homicídios e suicídios) nos estados brasileiros de 1996 a 2022.

Esses resultados reforçam a importância de se investigar a interação entre variáveis ambientais e saúde mental, considerando as características regionais e a vulnerabilidade social. Essa abordagem multiescalar contribui para o entendimento das dinâmicas espaço-temporais das taxas de mortalidade por causas externas e suas potenciais conexões com variações geomagnéticas e contextos urbanos específicos.

### **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 epidemiológicos mostram 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 vetoras 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.

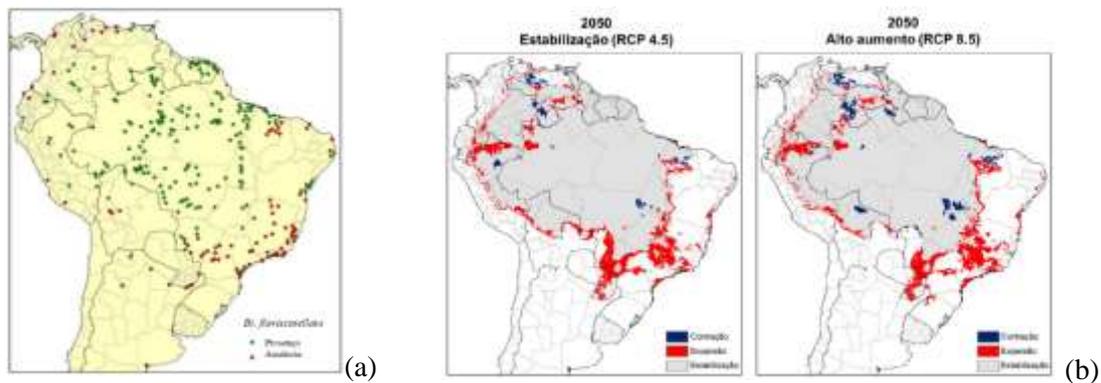
Diante desse contexto, torna-se importante para a saúde pública, o desenvolvimento de estratégias multidisciplinares que integrem os determinantes ambientais e sociais da transmissão, articulando a vigilância em saúde com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Brasil, 2018; ONU, 2015). Desta forma, 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

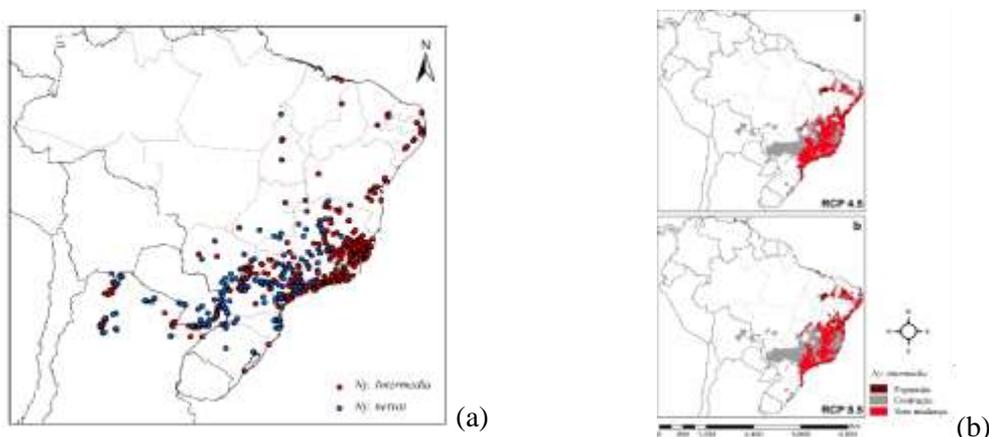
A espécie *Bi. flaviscutellata*, vetor de *Leishmania amazonensis*, apresenta atualmente uma ampla distribuição geográfica no território nacional, com registros confirmados em biomas como a Amazônia, o Cerrado e a Mata Atlântica, observa-se ainda sua presença com os países que fazem fronteira com a região norte do país (Figura 9a).



**Figura 9:** (a) Distribuição geográfica de *Bichromomyia flaviscutellata* na América do Sul. (b) Adequabilidade climática para *Bichromomyia flaviscutellata* na América do Sul em diferentes cenários de mudanças climáticas.

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 (Figura 9b) (Rangel et al, 2014).

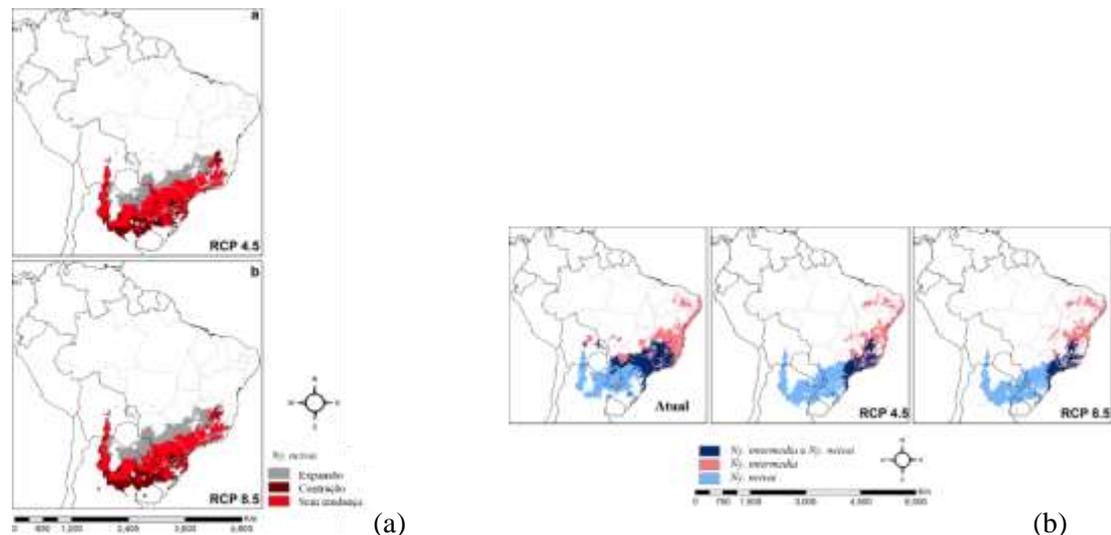
No caso de *Ny. intermedia* e *Ny. neivai*, vetores de *Leishmania braziliensis*, a distribuição está associada a áreas de Mata Atlântica, com alguns registros no bioma Cerrado, Argentina e Paraguai (Figura 10a). Os modelos de nicho ecológico, para *Ny. intermedia* sugerem uma redução em sua área de adequabilidade climática, acompanhada por um possível deslocamento em direção ao nordeste de sua distribuição atual (Figura 10b).



**Figura 10:** (a) Distribuição geográfica de *Nyssomyia intermedia* e *Nyssomyia neivai* na América do Sul. (b) Adequabilidade climática para *Nyssomyia intermedia* na América do Sul em diferentes cenários de mudanças climáticas.

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 (Figura 11a). 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 (Figura 11b) (Mcintyre et al, 2017).

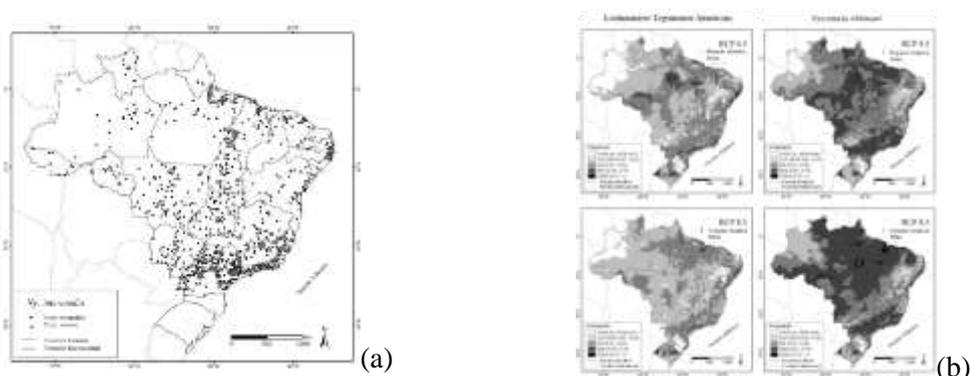


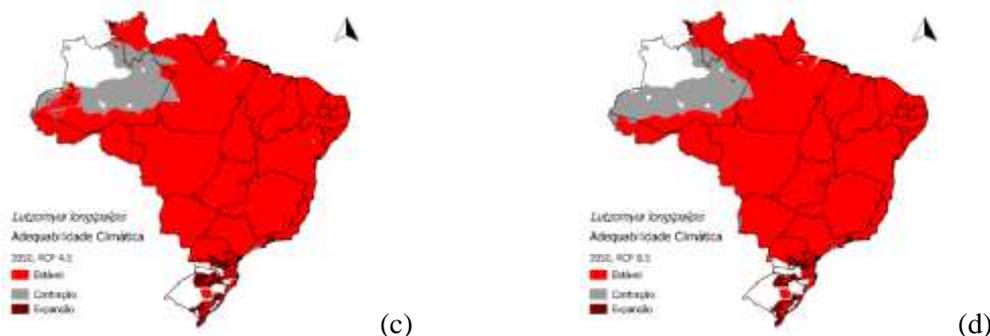
**Figura 11:** (a) Adequabilidade climática para *Nyssomyia neivai* na América do Sul em diferentes cenários de mudanças climáticas. (b) Interseção entre os modelos preditivos de *Nyssomyia intermedia* e *Nyssomyia neivai* em cenários de mudanças climáticas, evidenciando a área de simpatria predita (azul escuro).

### 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 (Figura 12) (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 (Figura 12b).

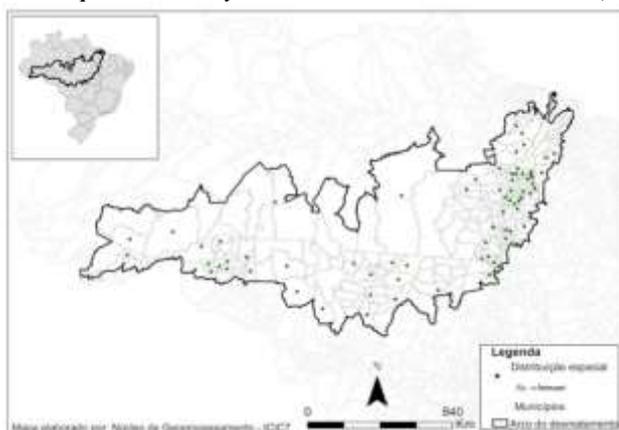




**Figura 12:** (a) Distribuição geográfica de *Nyssomyia whitmani* no Brasil. (b) Área de distribuição predita de *Nyssomyia whitmani* no Brasil em diferentes cenários de mudanças climáticas. Adequabilidade climática para *Lutzomyia longipalpis* para os cenários de mudanças climáticas (c) RCP 4.5 e (d) RCP 8.5.

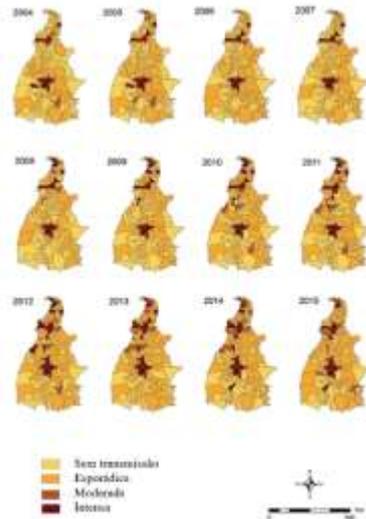
### Distribuição dos principais vetores das leishmanioses em associação ao desmatamento no Brasil

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 (Figura 13). 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).



**Figura 13:** Distribuição geográfica de *Ny. whitmani* nos estados da Amazônia Legal, no período de 2013 a 2024.

Em um estudo realizado no estado de Tocantins, relacionado com a distribuição de *Lu. longipalpis*, verificou-se sua elevada capacidade adaptativa a diferentes matrizes antrópicas e naturais. Os resultados demonstraram a ocorrência da espécie em todas as classes de uso do solo analisadas, com maior predominância em áreas sob intensa influência antrópica. Esse padrão corrobora com a presença de *Lu. longipalpis* no processo de expansão geográfica da LVA no território brasileiro. 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. (Figura 14) (Afonso et al, 2017).



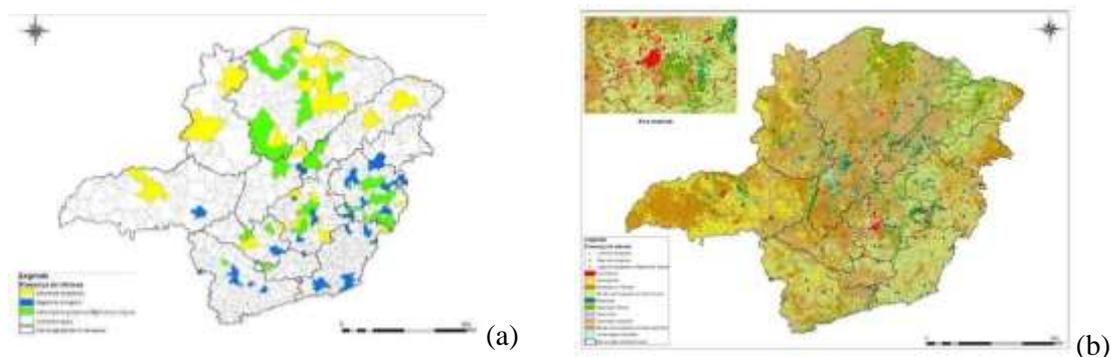
**Figura 14:** Distribuição espacial dos casos humanos de Leishmaniose Visceral Americana em associação ao incremento do desmatamento, no estado de Tocantins, Brasil, 2004-2015.

### **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.

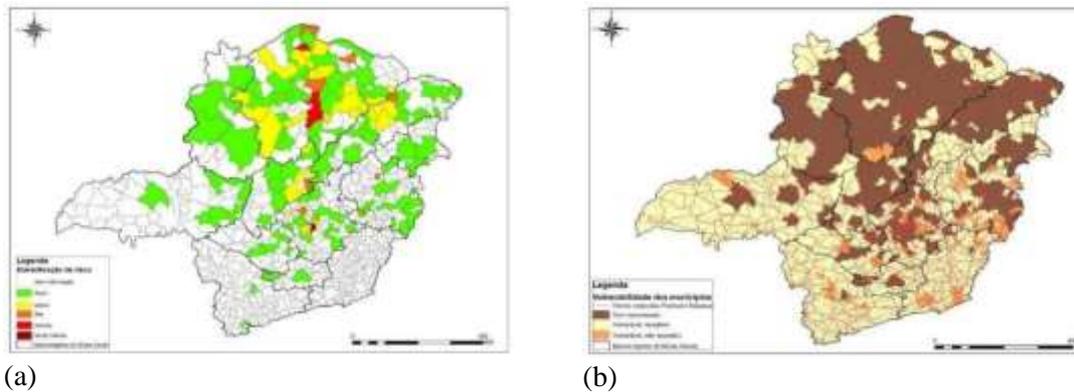
Em relação a Minas Gerais, dos 853 municípios, apenas 99 registraram a presença de vetores: *Lu. longipalpis* foi registrada em 33, *Mg. migonei* em 37, e ambas as espécies em 29 (Figura 15a) (Vieira, et al, 2024).

A análise do uso e cobertura do solo (Figura 15b) 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).



**Figura 15.** (a) Distribuição geográfica dos vetores *Lutzomyia longipalpis* e *Miconemyia migonei* no estado de Minas Gerais, Brasil. (b) Mapa de uso e cobertura da terra associado com *Lutzomyia longipalpis* e *Miconemyia migonei*, no estado de Minas Gerais, Brasil.

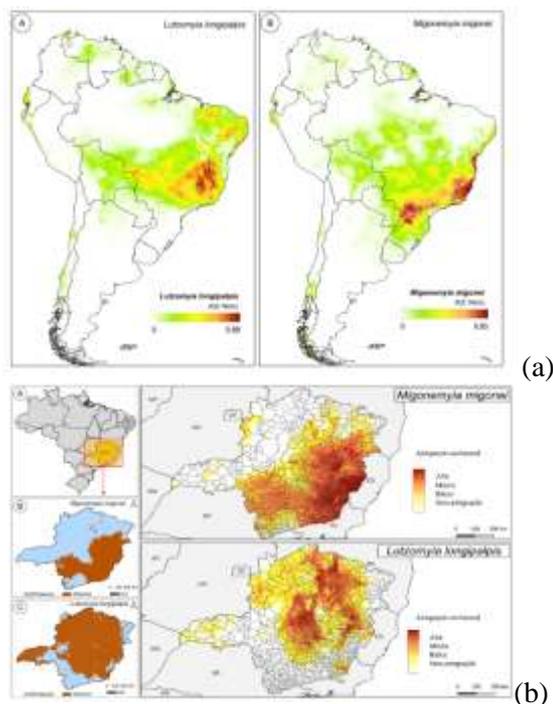
A estratificação de risco (2019–2021) (Figura 16a) classificou Belo Horizonte como área de transmissão muito intensa, enquanto Montes Claros e São João das Missões como transmissão intensa. Outros nove municípios apresentaram transmissão alta, enquanto regiões como Vale do Mucuri e Zona da Mata tiveram baixa transmissão (Vieira, et al, 2024).



(a) (b)  
**Figura 16.** (a) Mapa de estratificação de risco para Leishmaniose Visceral Americana, 2019-2021, no estado de Minas Gerais, Brasil. (b) Mapa de vulnerabilidade dos municípios do estado de Minas Gerais, Brasil, de 2018 a 2022.

A classificação epidemiológica (Figura 16b) 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) (Figura 17a). 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 (Figura 17b). 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).

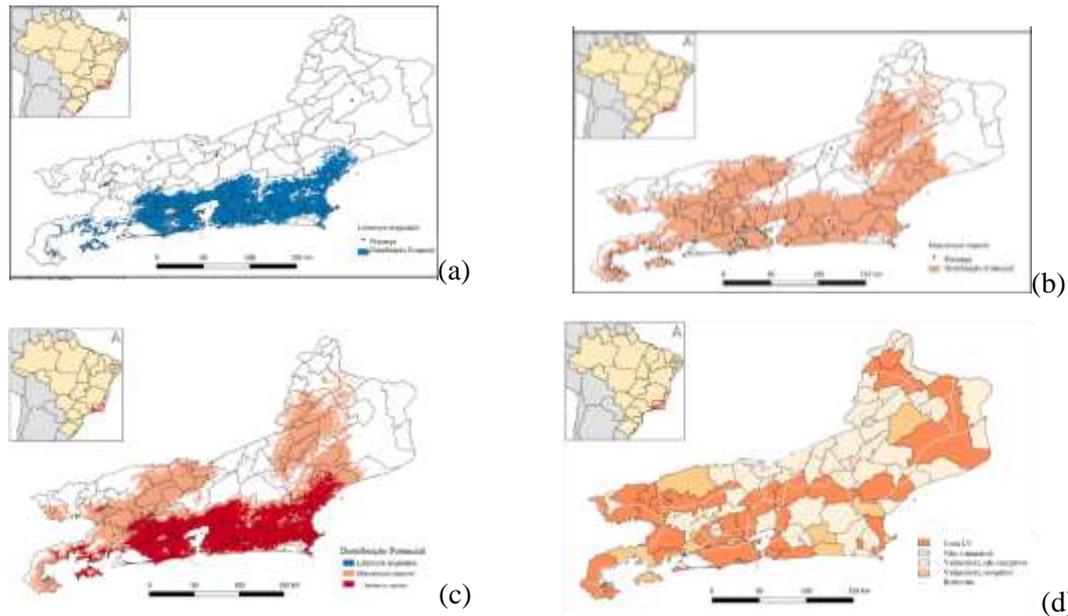


(a) (b)  
**Figura 17.** (a) Modelo 1. Mapa da América do Sul para a métrica de AUC-ROC, das espécies *Lutzomyia longipalpis* e *Mignonemyia migonei*. (b) Mapa do Brasil, com destaque para o estado de Minas Gerais (A); mapas do estado com a distribuição geográfica de *Mignonemyia migonei* (B) e *Lutzomyia longipalpis* (C) e a adequabilidade ambiental.

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 (Figuras 18 a, b, c).

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 (Figura 18d). 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.



**Figura 18:** Registros de ocorrência e distribuição potencial de (a) *Lutzomyia longipalpis*, (b) *Migonemyia migonei*. Registros de ocorrência e distribuição potencial de (c) *Lutzomyia longipalpis* e *Migonemyia migonei*, em simpatria no Estado do Rio de Janeiro, (d) Classificação dos municípios do estado do Rio de Janeiro segundo a transmissão da Leishmaniose Visceral Americana.

Embora devam ser observados os impactos das mudanças climáticas, esses resultados contribuem para o conhecimento da ecologia e distribuição dos vetores da LVA no Rio de Janeiro. Vale ressaltar que o RJ possui apenas 37% de municípios com levantamento entomológico e registros dos vetores da LVA, demonstrando a clara necessidade de estudos entomológicos; além da realização de atividades de vigilância entomológica em áreas onde o vetor ainda não tenha sido detectado.

### 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. Esse modelo permitiu identificar padrões territoriais críticos e apontou subsídios para políticas públicas adaptativas.

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 análise da Ressonância de Schumann (RS) reforçou esses achados, identificando oscilações em frequências ELF associadas ao aumento das taxas de IAM e AVC, sugerindo que variações eletromagnéticas podem intensificar eventos cardiovasculares em contextos geofisicamente suscetíveis.

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.

## Referências

Afonso MMS, Chaves SAM, Magalhães MAFM, Gracie R, Azevedo C, Carvalho BM, Rangel, EF. Ecoepidemiology of American Visceral Leishmaniasis in Tocantins State, Brazil: Factors Associated with the Occurrence and Spreading of the Vector *Lutzomyia* (*Lutzomyia*) *longipalpis* (Lutz & Neiva, 1912) (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). *The Epidemiology and Ecology of Leishmaniasis*. 6ed.: InTech, 2017, v., p. 91-115. DOI: 10.5772/65852

Aguiar GM, Vieira VR. Regional Distribution and Habitats of Brazilian Phlebotomine Species. In: Rangel, EF & Shaw, JJ (Org.). *Brazilian Sand Flies*. 1ed.: Springer International Publishing, 2018: 251-298. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75544-1>

BABAYEV, Elchin S.; ALLAHVERDIYEVA, Aysel A. Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. **Advances in Space Research**, v. 40, n. 12, p. 1941-1951, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.099>

BABAYEV, S. A.; ALLAHVERDIYEVA, A. Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. *Advances in Space Research*, v. 40, n. 12, p. 1941–1951, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707009404>. Acesso em: 07 abr. 2025.

BEGGAN, Ciarán D.; MUSUR, Malgorzata A. Is the Madden–Julian oscillation reliably detectable in Schumann resonances?. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 190, p. 108-116, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.009>

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. Agenda de Prioridades de Pesquisa do Ministério da Saúde - APPMS [recurso eletrônico] / Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília: Ministério da Saúde, 2018. [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/agenda\\_prioridades\\_pesquisa\\_ms.pdf](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/agenda_prioridades_pesquisa_ms.pdf)

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Articulação Estratégica de Vigilância em Saúde. Guia de Vigilância em Saúde [recurso

eletrônico] / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Articulação Estratégica de Vigilância em Saúde. – 5. ed. rev. e atual. – Brasília : Ministério da Saúde, 2022. 1.126 p.: il. [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia\\_vigilancia\\_saude\\_5ed\\_rev\\_atual.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_vigilancia_saude_5ed_rev_atual.pdf)

BRAZIL RP, Brazil BG. Bionomy: Biology of Neotropical Phlebotomine Sand Flies. In: Rangel, EF & Shaw, JJ (Org.). Brazilian Sand Flies. 1ed.: Springer International Publishing, 2018: 299 -318. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75544-1>

CARVALHO RM, VALENÇA HF, SILVA FJ, PITA-PEREIRA D, PEREIRA TA, BRITTO C, BRAZIL RP, BRANDÃO FILHO SP. Natural *Leishmania infantum* in *Migonemyia migonei* (França, 1920) (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae) the putative vector of visceral leishmaniasis in Pernambuco State, Brazil. *Acta Trop* 2010; 116: 108-110.

COSTA SM, CORDEIRO JLP, RANGEL EF. Environmental suitability for *Lutzomyia* (*Nyssomyia*) *whitmani* (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae) and the occurrence of American cutaneous leishmaniasis in Brazil. *Parasites & Vectors*, v. 11, p. 155, 2018.

COSTA SM, MAGALHÃES MAFM, RANGEL EF. Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA) em associação com a distribuição espacial de *Nyssomyia whitmani*, frente as alterações ambientais nos estados da Amazônia Legal, Brasil). 59º MEDTROP – Congresso da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, realizado no Centro de Convenções Rebouças, de 22 a 25 de setembro de 2024.

COSTA, R. P. da et al. Geomagnetic disturbances and cardiovascular mortality in Brazil: regional contrasts between South and Northeast. *Earth and Space Science*, 2024.

DENARDINI, C. M. et al. The embrace magnetometer network for South America: Network description and its qualification. **Radio Science**, v. 53, n. 3, p. 288-302, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017RS006477>

EBI, K. L. et al. Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, v. 398, n. 10301, p. 698–708, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34419205/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

ESCOBAR, L. E. et al. Declining prevalence of disease vectors under climate change. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 39150, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep39150>. Acesso em: 07 abr. 2025.

FREITAS, R. A. P. de et al. Variations in atmospheric electromagnetism and their impacts on mortality in Brazil: evidence from the South Atlantic Magnetic Anomaly and the Equatorial Electrojet. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2024.

GASPARRINI, A. et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, v. 386, n. 9991, p. 369–375, 2015. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(14\)62114-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(14)62114-0/fulltext). Acesso em: 07 abr. 2025.

Giorgi J, Torres I. Impactos da mudança climática na América Latina e no Caribe [livro eletrônico] /Rio de Janeiro, RJ: Maria del Carmen Villarreal Villamar, Leonardo Magalhães Firmino, 2022.

GOMES, P. C. T. **Análise de Componentes Principais (PCA): uma introdução ao tema.** DataGeeks, 9 jul. 2024. Disponível em: <https://www.datageeks.com.br/analise-de-componentes-principais/>. Acesso em: 14 maio 2025.

GUIMARÃES VCFV. Avaliação da susceptibilidade de *Lutzomyia migonei* (Diptera: Psychodidae) ao desenvolvimento de *Leishmania* (*Leishmania*) *infantum*. 2016. 84 f. Tese

(Doutorado em Biociências e Biotecnologia em Saúde) – Fundação Oswaldo Cruz, Centro de Pesquisas Aggeu Magalhães, Recife, 2016.

GUO, Y. et al. Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation. *Epidemiology*, v. 25, n. 6, p. 781–789, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25166878/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

HAINES, A. et al. Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. *Public Health*, v. 120, n. 7, p. 585–596, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16542689/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

ILSO. **Sunspot Number**. Royal Observatory of Belgium, Brussels. Disponível em: <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>. Acesso em: 14 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

LEVY, K. et al. Untangling the impacts of climate change on waterborne diseases: a systematic review of relationships between diarrheal diseases and temperature, rainfall, flooding, and drought. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 10, p. 4905–4922, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27058059/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

LIMA, D. A. S. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson**. *Leviathan* (São Paulo), n. 4, p. 1-15, 2014. Disponível em: <https://revistas.usp.br/leviathan/article/view/132346>. Acesso em: 14 maio 2025.

LIU, Jinlai et al. Recent advances and challenges in Schumann resonance observations and research. *Remote Sensing*, v. 15, n. 14, p. 3557, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15143557>

LIU-HELMERSSON, J. et al. Estimating past, present, and future trends in the global distribution and abundance of the arbovirus vector *Aedes aegypti* under climate change scenarios: a systematic review. *Frontiers in Public Health*, v. 7, p. 148, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2019.00148/full>. Acesso em: 07 abr. 2025.

MARTINS, M. E. G. Regressão Linear Simples. *Revista de Ciência Elementar*, v. 3, n. 4, p. 1-5, 2019. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2019/045/>. Acesso em: 14 maio 2025.

MCINTYRE S, RANGEL EF, READY PD, CARVALHO BM. Species-specific ecological niche modelling predicts different range contractions for *Lutzomyia intermedia* and a related vector of *Leishmania braziliensis* following climate change in South America. *Parasites & Vectors*, v. 10, p. 157, 2017. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2093-9>

MENEZES, J. A. et al. Analyzing spatial patterns of health vulnerability to drought in the Brazilian semiarid region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, p. 6262, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18126262>. Acesso em: 07 abr. 2025.

MENEZES, J. A. et al. Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: the construction of a municipal vulnerability index. *PLoS ONE*, v. 13, e0190808, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190808>. Acesso em: 07 abr. 2025.

MENEZES, J. A.; SANTOS, R. B.; VOMMARO, F.; CONFALONIERI, U.; BARATA, M. M. L.; MARGONARI, C. Extreme weather events under a changing climate: a brief context for Brazil and the role of the health sector. In: AKHTAR, R. (org.). *Extreme Weather Events and Human Health*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 293–314.

NOAA. **F10.7 cm Radio Emissions**. Space Weather Prediction Center. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>. Acesso em: 14 maio 2025.

NOAA. **Geomagnetic Indices and Data**. National Centers for Environmental Information. Disponível em: [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp\\_ap.html](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp_ap.html). Acesso em: 14 maio 2025.

NOAA. **Sudden Ionospheric Disturbance (SID)**. National Centers for Environmental Information. Disponível em: [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/ionospheric-data/sids/documentation/readme\\_sudden-ionospheric-disturbances.pdf](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/ionospheric-data/sids/documentation/readme_sudden-ionospheric-disturbances.pdf). Acesso em: 14 maio 2025.

ONU. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: Nações Unidas, 2015. Acesso em: 21/4/2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

OPAS, Organização Pan-Americana da Saúde. Leishmanioses: informe epidemiológico da Região das Américas. Nº 13, dezembro de 2024. Washington, D.C.: OPS; 2024. Disponível em: [hps://iris.paho.org/handle/10665.2/51742](https://iris.paho.org/handle/10665.2/51742).

OPAS, Organização Panamericana de Saúde. Leishmaniose. Acessado em: 21/04/2025. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/topicos/leishmaniose>

PIMENTA PFP, FREITAS VC, MONTEIRO CC, PIRES ACMA, SECUNDINO NFC. Biology of the Leishmania–Sand Fly Interaction. In: Rangel, EF & Shaw, JJ (Org.). *Brazilian Sand Flies*. 1ed.: Springer International Publishing, 2018: 319 -340. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75544-1>

PISHCHALNIKOV, Roman Y. et al. Cardiovascular response as a marker of environmental stress caused by variations in geomagnetic field and local weather. *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 51, p. 401–410, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.03.005>

RANGEL EF, COSTA SM, CARVALHO BM. Environmental Changes and the Geographic Spreading of American Cutaneous Leishmaniasis in Brazil. In: David M. Claborn. (Org.). *Leishmaniasis - Trends in Epidemiology, Diagnosis and Treatment*. 1ed.Rijeka: InTech, 2014, v. , p. 3-25.

ROMANELLO, M. et al. The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet*, v. 402, n. 10397, p. 1977–2023, 2023. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(23\)01859-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(23)01859-7/fulltext). Acesso em: 07 abr. 2025.

SANTOS, R. B. et al. Building scenarios of social and health vulnerability to climate change: a study for municipalities in the Mato Grosso do Sul. In: AKHTAR, R. (org.). *Climate Change and Human Health Scenarios*. Cham: Springer, 2023. p. 435–449.

SIMÕES, F. et al. The Schumann resonance: A tool for exploring the atmospheric environment and the subsurface of the planets and their satellites. *Icarus*, v. 194, n. 1, p. 30–41, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.09.020>

SOARES, Gabriel et al. Using principal component analysis of satellite and ground magnetic data to model the equatorial electrojet and derive its tidal composition. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 127, n. 9, p. e2022JA030691, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JA030691>

STOUPPEL, E. et al. Clinical cosmobiology—sudden cardiac death and daily/monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity—the Baku Study (2003–2005). *Sun and Geosphere*, v. 1, n. 1, p. 13–16, 2006. Disponível em: [https://file.scirp.org/pdf/6-8202044\\_31922.pdf](https://file.scirp.org/pdf/6-8202044_31922.pdf). Acesso em: 07 abr. 2025.

VIEIRA VR, AFONSO MMS, COSTA SM, MAGALHÃES MAFM, SOUZA IAA, RANGEL EF. Municipal Vulnerability of American Visceral Leishmaniasis and Prediction of Future Scenarios in the face of Climate Change in the State of Minas Gerais, Brazil. 59º MEDTROP – Congresso da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, realizado no Centro de Convenções Rebouças, de 22 a 25 de setembro de 2024.

VOMMARO, F. et al. Contributions of municipal vulnerability map of the population of the State of Maranhão (Brazil) to the Sustainable Development Goals. *Science of the Total Environment*, v. 706, p. 134629, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134629>. Acesso em: 07 abr. 2025.

WANG, Xiaobo et al. Contributions of lightning to long-term trends and inter-annual variability in global atmospheric chemistry constrained by Schumann Resonance observations. *EGUsphere*, v. 2025, p. 1-23, 2025.

WATANABE, Y. et al. Influence of electromagnetic fields on the circadian rhythm. *Journal of Clinical and Translational Research*, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10105029/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Climate change and health. Geneva: WHO, 2018. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>. Acesso em: 07 abr. 2025.

ZILLI MT, CARVALHO LMV, LIEBMANN B, DIAS MAS. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *Int. J. Climatol.* 37: 2269-2279, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.4840>

Dimitrova, S., Stoilova, I., & Cholakov, I. (2014). *Effect of local geomagnetic storms on the incidence of stroke and acute myocardial infarction*. *Environmental Research*, 134, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.07.017>.

PODOLSKÁ, K. The impact of ionospheric and geomagnetic changes on mortality from diseases of the circulatory system. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2018.

PRICE, Colin et al. Natural ELF fields in the atmosphere and in living organisms. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, p. 85-92, 2021.

RANGEL, Deborah Moreira et al. The effects of the healthcare line in a stroke unit: three years' experience of a center in the Northeast of Brazil. **Arquivos de Neuro-psiquiatria**, v. 81, n. 08, p. 707-711, 2023.

SCHUMANN, Winfried Otto. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. **Zeitschrift für Naturforschung A**, v. 7, n. 2, p. 149-154, 1952.

ZILLI VIEIRA, C. L. et al. Geomagnetic disturbances driven by solar activity enhance total and cardiovascular mortality risk in 263 U.S. cities. *Environmental Health*, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0516-0>

### 4.3 Segurança energética

A crescente dependência entre clima e energia, destaca sua centralidade nas discussões sobre sustentabilidade, segurança energética e desenvolvimento econômico. As mudanças climáticas, impulsionadas principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa do setor energético, aumentam a vulnerabilidade desse setor aos extremos climáticos, como secas prolongadas, mudanças nos padrões de vento e variações na radiação solar. A transição global em direção a fontes renováveis, como a solar, eólica, biomassa e hidráulica, demanda estratégias para mitigação de emissões e adaptação ao clima futuro de modo a

reduzir riscos. No contexto brasileiro, este capítulo discute questões científicas relacionadas à variabilidade climática, modelagem e previsão de recursos energéticos, análise da complementaridade entre fontes renováveis e os impactos esperados das mudanças climáticas sobre a geração solar e eólica. Também são exploradas estratégias de adaptação do sistema elétrico nacional e iniciativas de colaboração científica e formação de recursos humanos. Ao reunir evidências técnicas e metodológicas, o capítulo contribui para o entendimento dos efeitos do clima sobre o setor elétrico brasileiro e propõe caminhos para o planejamento de sistemas mais resilientes e sustentáveis em um cenário de transição energética.

## Introdução

Nas últimas décadas, a relação entre clima e energia tem se tornado cada vez mais central nas discussões sobre sustentabilidade, segurança energética e desenvolvimento econômico. 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).

Essa interdependência têm impulsionado uma transformação estrutural no setor energético mundial, com a crescente incorporação de fontes renováveis, como biomassa, eólica, solar fotovoltaica e solar térmica (IRENA, 2023). 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.

A componente *Segurança Energética* concentrou esforços em investigar questões científicas relevantes para dar suporte ao planejamento e a operação de sistemas

energéticos com elevada participação de fontes renováveis, considerando a variabilidade climática e os cenários de mudanças futuras. Entre 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. O objetivo principal foi produzir bases de dados e produtos cientificamente embasados para gerar subsídios técnicos que contribuam para o fortalecimento da segurança energética nacional em um contexto de transição para uma economia de baixo carbono.

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. Espera-se que os temas aqui apresentados contribuam para ampliar o entendimento do leitor sobre os desafios e oportunidades, promovendo uma reflexão crítica e informada sobre os caminhos possíveis para um futuro energético mais resiliente e de baixo carbono. A compreensão da evolução do setor energético, da variabilidade dos recursos renováveis, da análise de sua complementaridade, da previsão de sua disponibilidade e a avaliação dos impactos das mudanças climáticas são elementos fundamentais para orientar decisões estratégicas em um mundo em transição energética estão apresentadas na sequência deste capítulo.

## **Evolução do setor energético brasileiro**

Nas últimas duas décadas, o setor energético brasileiro passou por transformações significativas, impulsionadas por avanços tecnológicos, mudanças regulatórias e, sobretudo, pela crescente preocupação com a sustentabilidade e a segurança energética (ANEEL, 2025). O aumento expressivo da participação de fontes renováveis na matriz energética nacional (EPE, 2024) e a regulamentação da geração distribuída pela Lei 14300, publicada em janeiro de 2022, são marcos importantes desse período.

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 evolução das matrizes energética e elétrica evidencia o protagonismo do Brasil na transição energética global, especialmente pela inserção de novas fontes renováveis, que vêm ganhando espaço ao lado da tradicional geração hidrelétrica.

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 atuação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e do Governo Federal para regulamentação da geração distribuída também contribuiu para a inserção e rápido crescimento da participação da geração fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. Os dados disponibilizados pela ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) mostram que a capacidade instalada de geração fotovoltaica saltou de aproximadamente 2500 MW em 2018 para mais de 55000 MW em 2025, sendo que a geração distribuída é responsável por cerca de 70% dessa capacidade atual (ABSOLAR, 2025).

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.

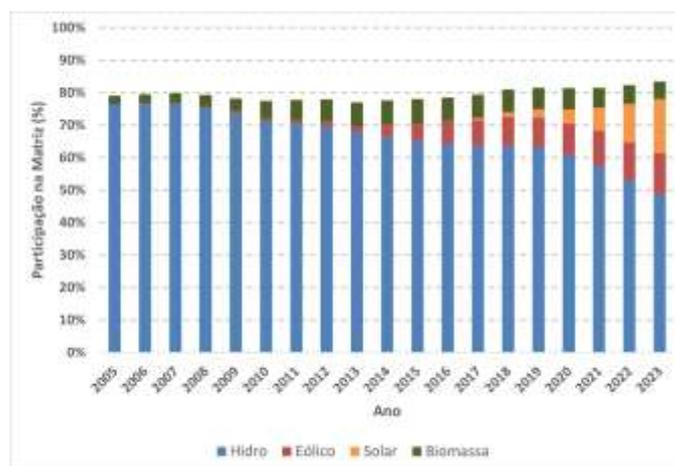


Figura 1. Evolução da participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira entre os anos de 2005 a 2023. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024).

## **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. A previsão de irradiância solar em curto prazo é fundamental para aplicações em energia solar, previsão de carga térmica e operação de microrredes. 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. Esta seção também aborda os avanços e aprimoramentos realizados no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR utilizado no mapeamento do recurso solar no território brasileiro.

### **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 óptico (optical flow) aplicada a imagens sequenciais observadas pelo GOES-16 permite estimar vetores de deslocamento de nuvens (CMVs). Assumindo que o movimento das nuvens permanecerá inalterado por um período curto de tempo, estes vetores podem ser utilizados para estimar a posição futura das nuvens e, então possibilitar uma previsão da cobertura de nuvens em cada ponto geográfico da imagem. Na sequência, a previsão da irradiância solar incidente na superfície adota um modelo de transferência radiativa alimentado pela previsão de nebulosidade. A Figura 2 ilustra o procedimento desenvolvido na pesquisa.

Os resultados alcançados, com esta abordagem na componente de Segurança Energética, mostram que o uso de CMVs em imagens de satélites é efetivo para horizontes de previsão acima de 30-40 minutos, reduzindo incerteza em  $\sim 30\text{--}50 \text{ W/m}^2$  na previsão de GHI com base na previsão por persistência da nebulosidade (cobertura de nuvens no horizonte futuro

é igual a observada no momento da realização da previsão). Para horizontes mais próximos (até 40 min), a previsão por persistência de nebulosidade apresentou maior confiabilidade nas avaliações realizadas para localidades com estações solarimétricas da rede SONDA operadas por pesquisadores do INPE integrantes da componente Segurança Energética. A principal limitação da técnica de fluxo óptico reside no fato de sua incapacidade de identificar processos de formação/desintegração de nuvens. Outro aspecto importante é que a previsão da geração de uma usina requer ainda a conversão da irradiância solar incidente na superfície com base em parâmetros operacionais e técnicos das usinas de interesse.

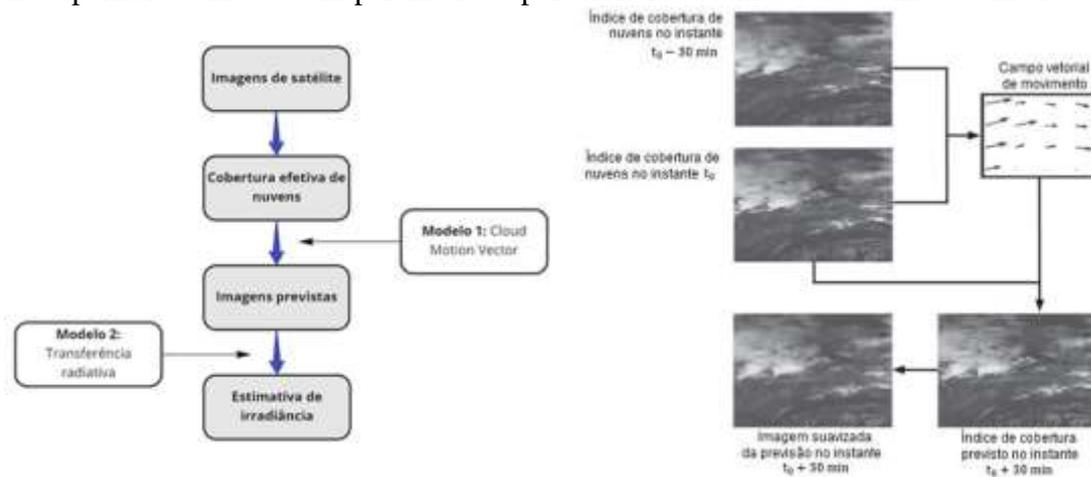


Figura 2. Diagrama esquemático utilizado na previsão de irradiância solar incidente na superfície com base na aplicação de modelagem de fluxo óptico para estimativa de movimento de nebulosidade. Fonte Xavier (2022).

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. A técnica de *Grid Search* foi utilizada para identificar o conjunto de hiperparâmetros (número de camadas, número de neurônios em cada camada, taxa de aprendizado, entre outros). O desempenho desta segunda abordagem foi avaliado tomando como referência os desvios apresentados por um modelo de persistência inteligente no qual assume-se que a condição de nebulosidade média sobre a usina fotovoltaica se mantém nas próximas horas. Detalhes sobre preditores adotados, configuração das arquiteturas de rede selecionadas, e descrição do modelo de persistência podem ser encontradas em Arruda (2024).

Quando aplicado à usina operando na Cidade Universitária da USP em São Paulo, capital do estado, o modelo desenvolvido apresentou um desempenho 49% superior ao modelo de persistência para horizonte de 1h, i. e. a raiz do desvio quadrático médio apresentado pelo modelo de aprendizado profundo proposta foi 51% do valor correspondente obtido com o modelo de Persistência. Para horizontes mais longos de 2h e 3h, o modelo proposto apresentou, respectivamente, desempenho 33% e 15% melhor que o modelo de persistência.

Uma limitação importante para a adoção de metodologias de aprendizado de máquina é a necessidade de uma base de dados extensa temporalmente para que a etapas de treinamento e avaliação da rede seja capaz de representar um amplo conjunto de condições de operação da usina fotovoltaica considerando os aspectos e parâmetros operacionais e atmosféricos que influenciam a geração de eletricidade. O estudo realizado na usina fotovoltaica localizada na Cidade Universitária, fez uso de dados registrados no sistema SCADA da usina e de dados meteorológicos coletados na estação meteorológica em operação próxima à usina para o período de 2017 a 2023, como mostra a Figura 3. Assim, para plantas com início de operação recente, a aplicação de métodos de aprendizado profundo requer a utilização de técnicas que permitam a aplicação do aprendizado adquirido em plantas operando por períodos mais longos.



Figura 3. Localização do gerador fotovoltaico (destaque no canto inferior esquerdo) e da estação meteorológica (destaque no canto superior direito). Fonte: Arruda (2024)

Partindo do modelo de previsão desenvolvido para a usina na Cidade Universitária, o estudo realizado aplicou ainda a técnica de transferência de aprendizado (transfer learning) para desenvolvimento de modelos de mesma arquitetura para plantas localizadas no litoral do Nordeste Brasileiro, na região semi-árida e na costa da região Sul. O estudo demonstrou que com uma série temporal de apenas 3 meses de operação, a metodologia já apresentou desempenho superior aos modelos de persistência local. Mostrou também que o desempenho obtido com uma série temporal curta de observações locais (3 a 6 meses), modelos desenvolvidos a partir da transferência de conhecimento produzem previsões com desempenho equivalente aos modelos treinados com séries temporais de observações locais com 1 a 2 anos de extensão.

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).

Assim como a metodologia anterior, este estudo demonstrou o potencial da integração entre dados de superfície e modelos baseados em aprendizado de máquina para a previsão de irradiância em ambientes tropicais complexos. O uso de múltiplos atrasos e a inclusão da fração de nuvens extraída de imagens hemisféricas mostraram-se estratégias eficazes para capturar padrões de variação da irradiância solar incidente na superfície. Além disso, a abordagem de seleção de dados e de ensemble contribuiu para maior estabilidade e confiabilidade da previsão aliada à rapidez de processamento mesmo em computadores mais simples. Futuras investigações podem explorar a aplicação da metodologia em outros locais e frequências mais altas de dados.

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**

A irradiância solar incidente na superfície da Terra é um parâmetro crítico para a compreensão do balanço de energia do sistema terrestre e para o projeto de sistemas de energia solar, especialmente instalações fotovoltaicas. Em países tropicais como o Brasil, a alta variabilidade espaço-temporal das nuvens representa desafios para a avaliação precisa dos recursos solares. Dada a densidade limitada de estações radiométricas em superfície, modelos de transferência radiativa na atmosfera baseados em dados satelitais — particularmente modelos que utilizam coeficientes de cobertura efetiva de nuvens — são amplamente empregados. Esses modelos são favorecidos por sua baixa demanda computacionais e ampla cobertura. No entanto, sua precisão depende fortemente de vários parâmetros-chave: refletância das nuvens, resolução espacial das imagens de satélite e geometria solar.

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.

Os resultados mostram que a reflectância das nuvens ( $\rho_{nuv}$  na Eq. (1)) é o fator mais sensível para a confiabilidade das estimativas do modelo BRASIL-SR. O estudo apontou que valores de reflectância das nuvens próximos a 0,8 produzem estimativas de irradiância solar na superfície com desvios sistemáticos próximos a zero em todo o território brasileiro.

$$C_{eff} = \frac{\rho - \rho_{sup}}{\rho_{nuv} - \rho_{sup}} \quad (1)$$

onde  $C_{eff}$  é o coeficiente de cobertura efetiva de nuvens,  $\rho$  e  $\rho_{sup}$  são a reflectância observada pelo satélite para um pixel da imagem e a reflectância da superfície observada pelo satélite.

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.

O segundo estudo, desenvolvido por Casagrande et al. (2021), propôs ajustes e avaliou a parametrização de aerossóis do modelo BRASIL-SR sobre a Amazônia e o Cerrado brasileiros, com foco em áreas afetadas pela queima de biomassa (Figura 4). Essas regiões possuem elevado potencial de recurso solar. No entanto, eventos de queimadas injetam uma carga elevada de material particulado, os quais atenuam significativamente a radiação solar incidente na superfície, principalmente a componente direta da irradiância solar. Essa atenuação da radiação solar tem impacto em diversos setores das atividades humanas, inclusive na viabilidade técnica e econômica de projetos de aproveitamento do recurso de energia solar. A escassez de dados observacionais de irradiância direta torna os modelos numéricos ferramentas essenciais para o planejamento energético.

Casagrande et al. (2021) compararam os resultados das estimativas de irradiância solar na superfície em condição de céu sem nuvens produzidas pelo modelo BRASIL-SR com medições em superfície com uso de piranômetros radiômetros espectrais em locais influenciados por fumaça durante a estação seca de 2019 (Figura 4). Os aprimoramentos de modelagem de aerossóis atmosféricos foram avaliados em comparação com dados de radiômetros espectrais e piranômetros observados em dias de céu sem nebulosidade, uma vez que a contribuição deles para a transmitância atmosférica é de segunda ordem e a presença de nuvens inviabiliza sua quantificação de forma inequívoca.

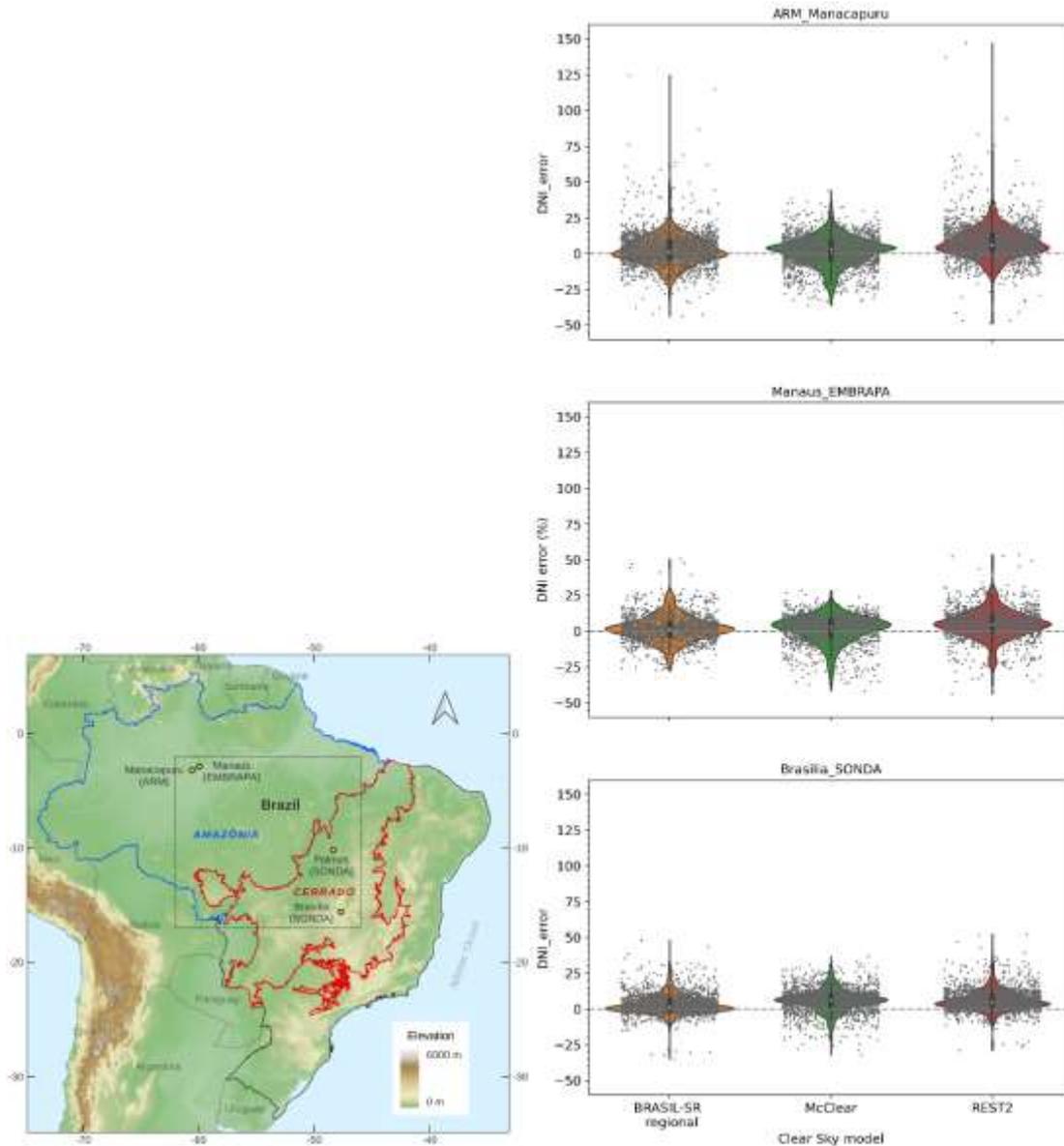


Figura 4. (a) Área de estudo destacando as estações de coletas de dados na Amazônia e no Cerrado; (b) Comparação dos desvios nas estimativas da irradiância direta produzidas pelos modelos BRASIL-SR, McClear e Rest2. Fonte: Casagrande et al. (2021).

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 (Figura 4).

Em condições de céu sem nuvens, a estimativa da irradiância solar na superfície do BRASIL-SR apresenta raiz do desvio quadrático médio inferior a 3% na área de estudo. Durante eventos de queima intensa de biomassa, os aerossóis emitidos causaram reduções de até 50% na irradiância solar na superfície. O modelo BRASIL-SR capturou esse impacto e produziu estimativas com um viés médio inferior a  $-10 \text{ W m}^{-2}$  em relação à observações de piranômetros em operação nos sítios do experimento. Além disso, o

modelo reproduziu as flutuações diárias da irradiância solar conforme a intensidade do fogo mudava, demonstrando sua capacidade de capturar efeitos episódicos deste material particulado.

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 Figura 05 ilustra as possíveis interfaces entre as fontes renováveis, assim como as escalas temporais em que sua complementaridade pode ser avaliada.



Figura 05. Diagrama com as interfaces e escalas temporais para estudos de complementaridade entre os recursos renováveis de energia: eólico (W), solar (S) e hidráulico (H).

Nesta seção são apresentados alguns estudos de complementaridade local para usinas híbridas (ou associadas) no Brasil. Sobre os sistemas híbridos hidro-solar (HS) investigou-se de que forma a geração fotovoltaica flutuante (FFV) poderia auxiliar na preservação dos níveis do reservatório de sobradinho, contribuindo para a segurança energética, hídrica e alimentar através dos usos consuntivos da água para irrigação e abastecimento humano.

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 km<sup>2</sup>, 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 substituiu 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 (Figura 06), 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 m<sup>3</sup>/s, prevenindo intrusão salina e garantindo a operação de sistemas de captação de água.

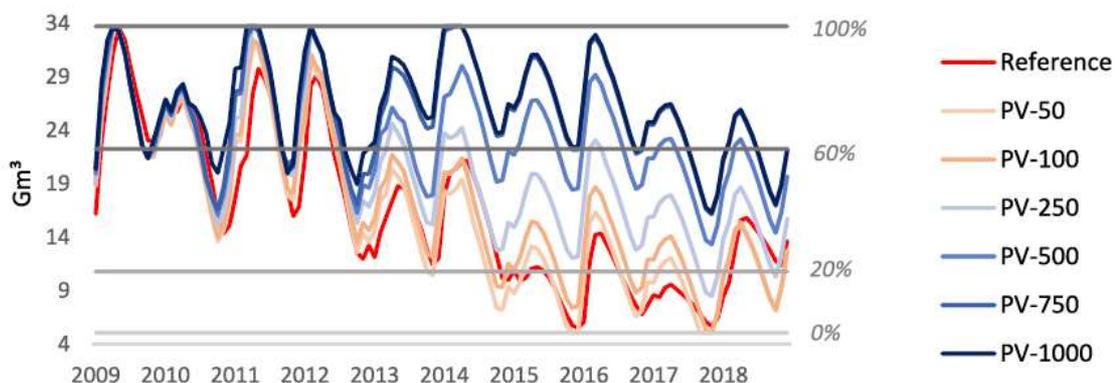


Figura 06. Resultados das simulações de armazenamento de água para o reservatório de Sobradinho, com a inserção de fotovoltaica flutuante variando de 50 a 1000 MW. Os cenários com armazenamento acima de 20% são mostrados na linha azul, enquanto os descartados são mostrados em laranja. Em vermelho está o cenário referência. Fonte: Campos et al. (2021).

Em termos da geração por fonte solar, observou-se que ela variou de 404 GWh (PV-250) a 1615 GWh (PV-1000). Em meses críticos, a geração solar superou a geração hidrelétrica de Sobradinho, mostrando-se estável mesmo sob variabilidade interanual, devido à alta irradiância solar verificada no semiárido ( $>1750$  kWh/kWp.ano). Já a geração por fonte hidroelétrica teve uma leve redução nos cinco aproveitamentos em cenários com maior PV, devido ao menor volume de água turbinada (de 33,0 TWh - observado - para 30,1 TWh - com PV-1000). A geração da UHE Sobradinho manteve-se estável ou levemente superior, por melhor gestão do armazenamento. O fator de capacidade da usina híbrida aumentou progressivamente, passando de 29% (referência) para 47% (no caso da PV-1000), aumentando a eficiência do sistema.

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 é ilustrado na Figura 07. 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.

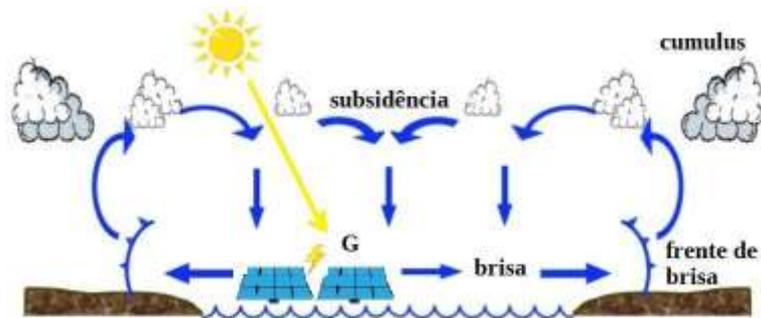


Figura 07. Diagrama ilustrando o mecanismo de circulação de brisa lacustre e consequente inibição da formação de nuvens sobre a área alagada. Fonte: Gonçalves *et al.*, (2020)

Uma análise inicial foi realizada sobre o reservatório da UHE Serra da Mesa (GO), no Cerrado, que cobre cerca de 1.784 km<sup>2</sup> e atinge profundidade de até 150 m. Combinou-se diversas fontes de dados como medições *in situ*, nas bordas e dentro do lago (com uma estação meteorológica flutuante); imagens de satélite (GOES-16 e ISCCP/GridSat-B1) de longa duração (1984–2009). Foram analisados os padrões de vento e estimados os índices de cobertura efetiva de nuvens (Ceff), o índice de clareza do céu (Kc), para avaliação das distribuições temporais e espaciais da nebulosidade. Os resultados mostraram que a direção predominante do vento muda ao longo do dia, indicando a presença de uma circulação típica de brisa lacustre. Ventos calmos (< 3 m/s) favorecem esse tipo de circulação. O gradiente térmico entre a terra e a água promove circulação secundária, com ar mais fresco vindo do lago em direção às bordas durante a tarde.

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, como pode ser observado na Figura 08.

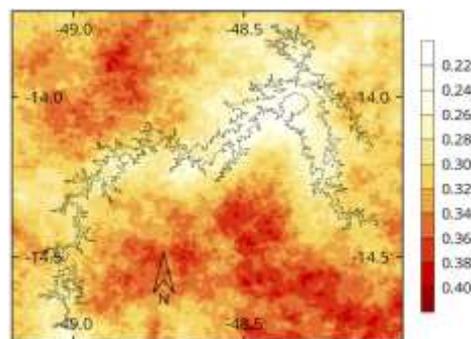


Figura 08. Mapa do coeficiente de cobertura de nuvens médio para a primavera (SON) no período da tarde sobre o reservatório da UHE Serra da Mesa. Fonte: Gonçalves *et al.*, (2020)

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 conforme ilustra a Figura 09.

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.



Figura 09. Mapa com localização dos reservatórios e biomas que compõem as análises de irradiação solar.

A irradiação solar foi modelada com base na relação linear entre o índice de clareza do céu (Kt) 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 irradiação 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 irradiação 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 Figura 10 mostra que 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.

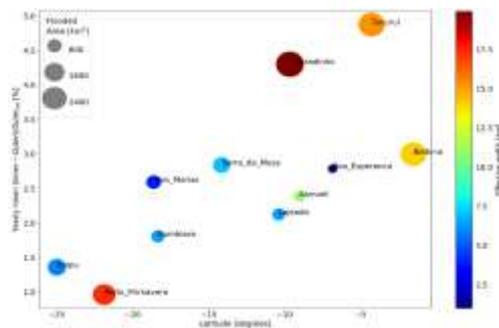


Figura 10. Análise paramétrica entre incremento de irradiância nos reservatórios (eixo vertical), latitude (eixo horizontal), área alagada (diâmetro dos círculos) e largura efetiva (cores), definida como a razão entre a área e a extensão máxima do reservatório.

A redução da cobertura de nuvens sobre lagos artificiais tropicais implica em maior irradiação solar disponível, sugerindo que usinas fotovoltaicas flutuantes (FFV) podem se beneficiar dessas condições. Isto implica não apenas no aumento da geração de eletricidade, como também aumenta a estabilidade do recurso solar, um fator essencial para o planejamento energético. Isso reduz o impacto da variabilidade de curto prazo da geração solar, tanto para sistemas fotovoltaicos quanto para usinas heliotérmicas (CSP). Essas vantagens tornam a proposta especialmente interessante para países tropicais que dispõe de grandes reservatórios hidrelétricos como o Brasil.

### 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.

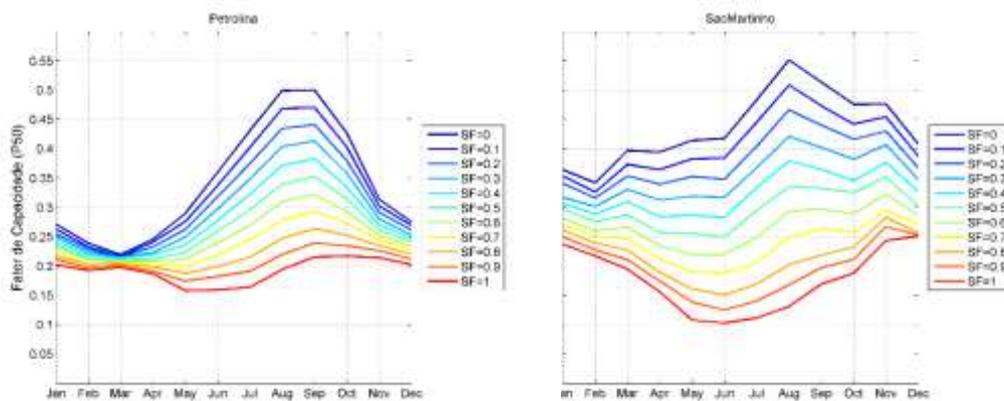
Foram utilizadas medições de irradiância solar ( $G$ ) e velocidade do vento a 50 m ( $V_{50}$ ), medidos por estações da Rede SONDA operadas pelo INPE. Petrolina (PTR) apresenta clima semiárido com alta irradiação solar ( $6,4 \text{ kWh/m}^2$ ) e boa estabilidade dos ventos

alísios, enquanto São Martinho da Serra (SMS) possui clima subtropical úmido com irradiação menor (4,5 kWh/m<sup>2</sup>) e maior irregularidade de ventos devido aos sistemas meteorológicos transientes nestas latitudes. Essa escolha permite comparar o desempenho de usinas híbridas em condições climáticas contrastantes. Os dados foram tratados e convertidos em fatores de capacidade (FC) para possibilitar a comparação entre solar e eólica. A geração solar foi simulada com sistema fixo, enquanto a geração eólica utilizou a curva de potência de um aerogerador comercial. Os dados foram amostrados e sincronizados para permitir a análise conjunta.

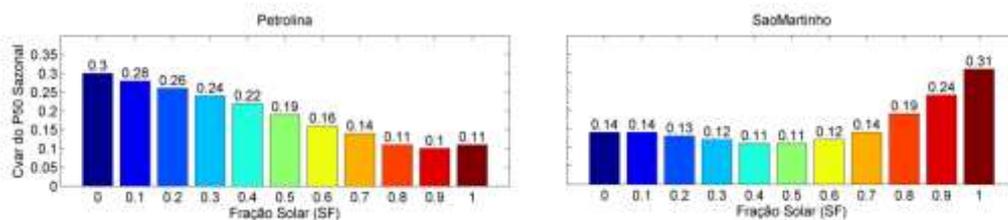
Diversas métricas estatísticas foram empregadas para avaliar a complementaridade como a correlação de Pearson, desvio-padrão (SD), coeficiente de variação (Cvar) e indicadores de extremos como percentil 5 (P5) e eventos de geração muito baixa por mais de 7 horas (N7h). A hibridização foi testada com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

A análise dos Fatores de Capacidade (FC) combinados mostrou que em escala horária há boa complementaridade para o interior do Nordeste (correlação abaixo de -0,7), uma vez que os ventos mais intensos ocorrem à noite, quando não há geração solar. A geração eólica em SMS é mais dispersa, embora os picos também sejam noturnos. Na escala horária, a geração solar é mais variável, com Cvar superior a 120%, enquanto a eólica gira em torno de 50%, o que levou a frações solares ótimas entre 0,3 e 0,4.

Já a complementaridade sazonal é mais pronunciada em SMS, com defasagem de até quatro meses entre os picos das fontes. A fração solar ideal para estabilização sazonal é de 0,9 em PTR e 0,5 em SMS, como se observa na Figura 11. Por fim, na escala intrasazonal, a variabilidade da solar é inferior, invertendo a lógica, onde frações solares mais altas (0,8–0,9) foram as mais estáveis.



(a): PTR (b): SMS



(c): PTR (d): SMS

Figura 11. Ciclo sazonal do fator de capacidade da geração híbrida e respectivo coeficiente de variação (Cvar) em função da fração solar (SF).

A hibridização também foi capaz de reduzir a frequência de eventos extremos, pois frações solares entre 0,2 e 0,6 reduziram a ocorrência de períodos de > 7 horas de baixa potência (N7h). Resultado similar foi encontrado para os limiares de corte (*curtailment*) por excesso de geração. As análises também mostraram a importância de se utilizar medições horárias e de longo prazo (>2 anos) para reduzir a incerteza dos resultados, principalmente para a análise de extremos.

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 (vide Figura 12). 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 (Figura 13), 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.

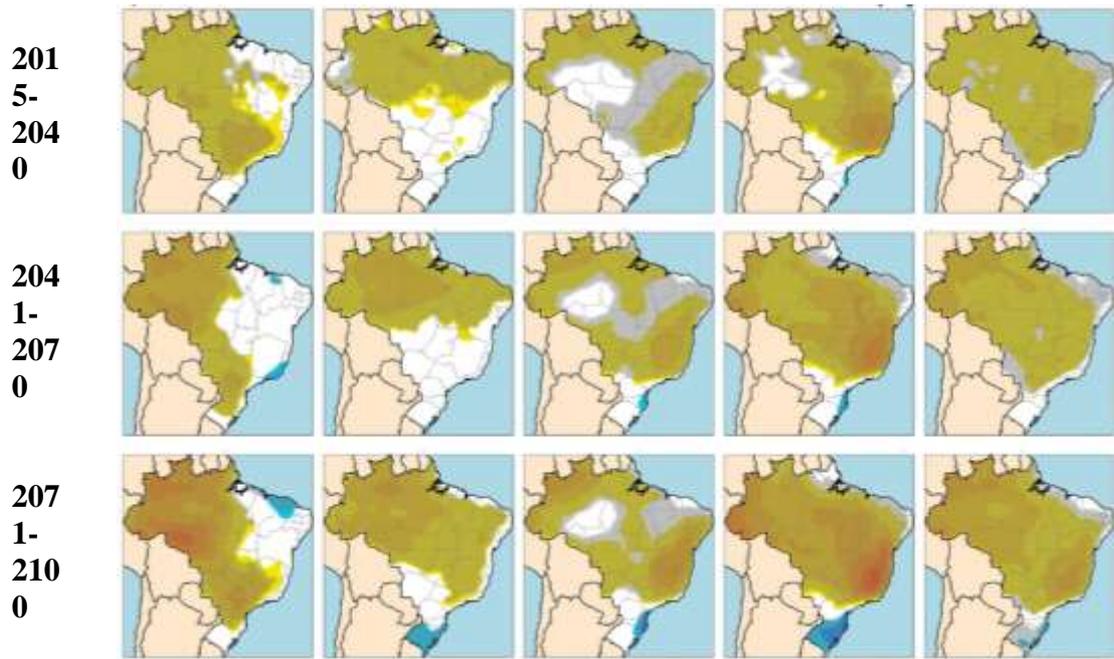
O estudo demonstra que, ao selecionar cuidadosamente modelos climáticos de alto desempenho, é possível reduzir significativamente a incerteza nas projeções futuras de irradiância solar incidente na superfície. Os resultados oferecem evidências robustas de potenciais aumentos da irradiância solar na superfície 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.

Este conjunto de informações possibilitam um suporte crucial para planejadores de energia, formuladores de políticas e investidores que buscam expandir a infraestrutura fotovoltaica, garantindo a confiabilidade e a sustentabilidade do sistema. Pesquisas futuras devem investigar mudanças na frequência e intensidade de extremos de RSS, bem como integrar projeções de recursos eólicos e hídricos para uma visão holística da resiliência das energias renováveis.

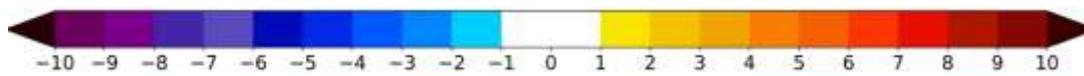
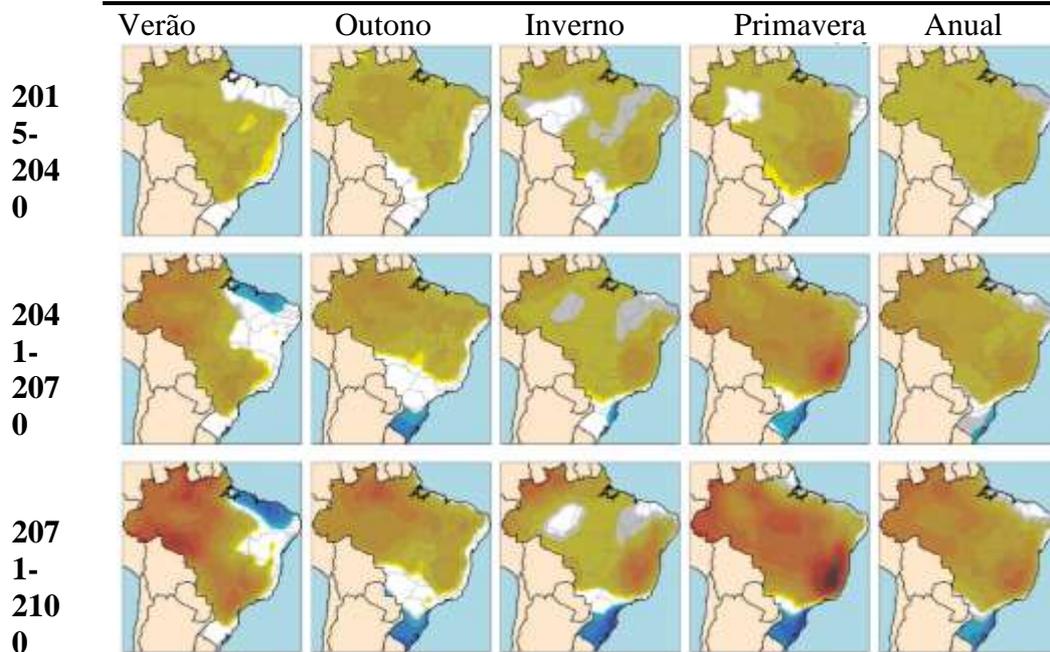
#### **SSP2-4.5**

---

Verão                      Outono                      Inverno                      Primavera                      Anual



**SSP5-8.5**



Fator de mudança (em %) da irradiância solar incidente na superfície

Figura 12. – Predições sazonais para o fator de mudança da irradiância solar para os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Fonte: Lima et al. (2024).

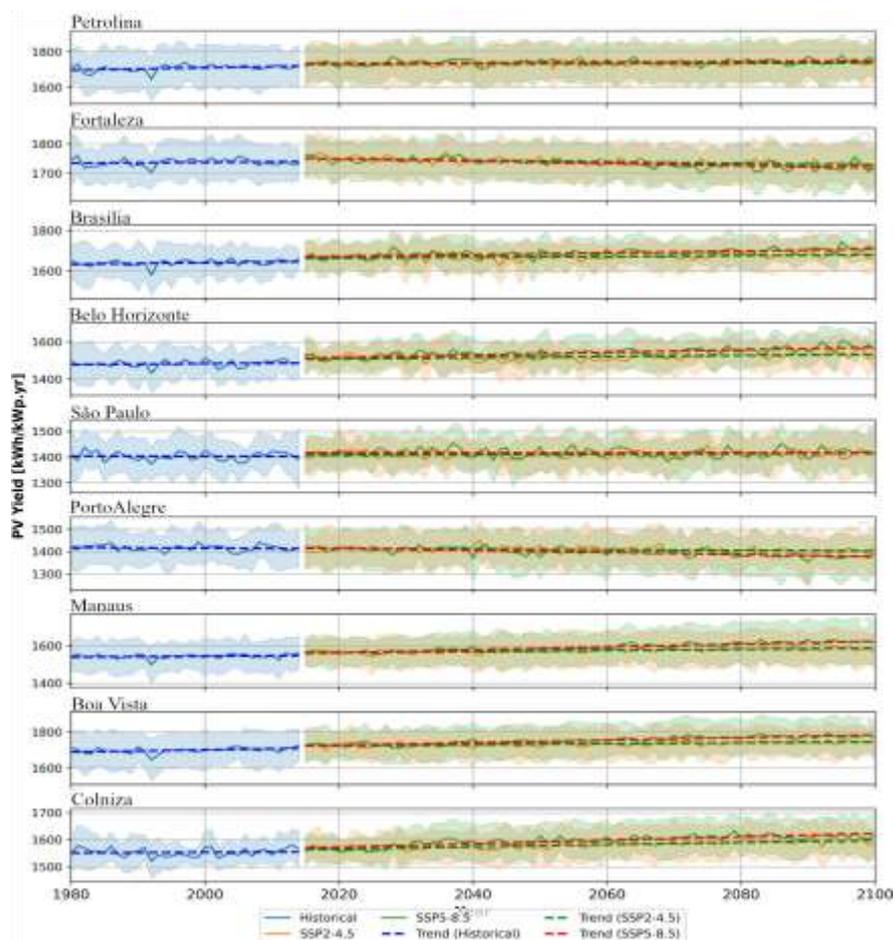


Figura 13. – Tendência da produtividade fotovoltaica (PV Yield) para nove centros urbanos com base nas previsões do *ensemble* SME nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Fonte: Lima et al. (2024).

### 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.

A Figura 14 mostra mapas de previsões 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.

A Figura 15 mostra as linhas de tendência para localidades representativas de áreas de elevado potencial eólico. Caetité, João Câmara e Araripe (semiárido do Nordeste) apresentam aumentos estatisticamente significativos na WPD em ambos os cenários de clima futuro. A Bacia de Campos (sudeste offshore) surge como uma área-chave para a energia eólica offshore, com aumentos de até 0,49 Wh/m<sup>2</sup>/ano. Algumas regiões (por exemplo, Amazônia Ocidental) apresentam tendências neutras ou ligeiramente negativas, exigindo avaliações específicas para cada região.

Por outro lado, localidades como Osório e Rio Grande (sul do Brasil) apresentam DEE estável, sugerindo forte resiliência aos impactos do clima futuro. No entanto, estudos estão sendo realizados para compreender como a frequência de eventos extremos de seca eólica (persistência de baixas velocidades de vento por períodos longos como três dias) irão a disponibilidade do recurso eólico nos cenários futuros de clima.

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 previsões 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.

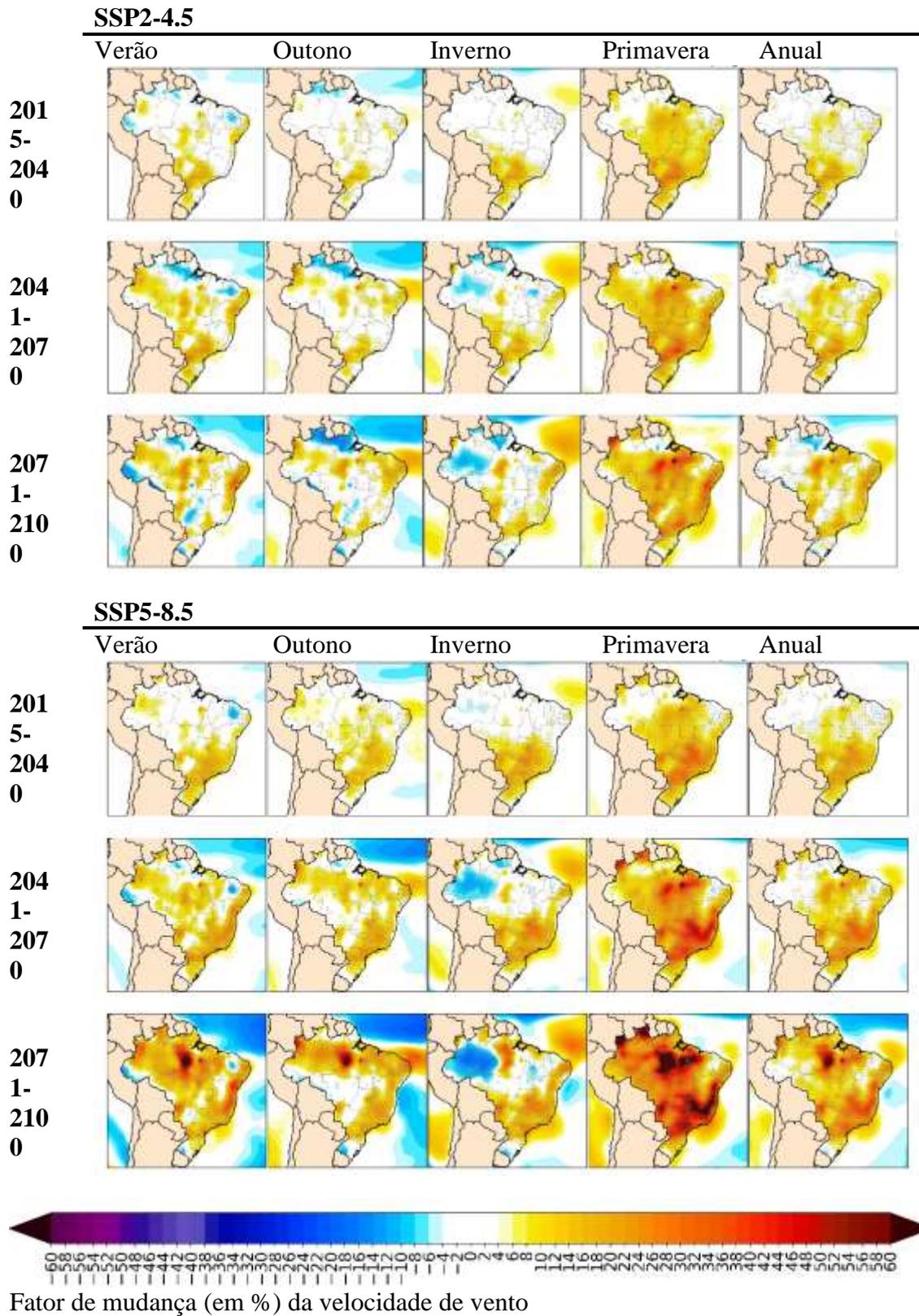


Figura 14. Predições sazonais para o fator de mudança da irradiância solar para os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Fonte: Lima et al. (2025).

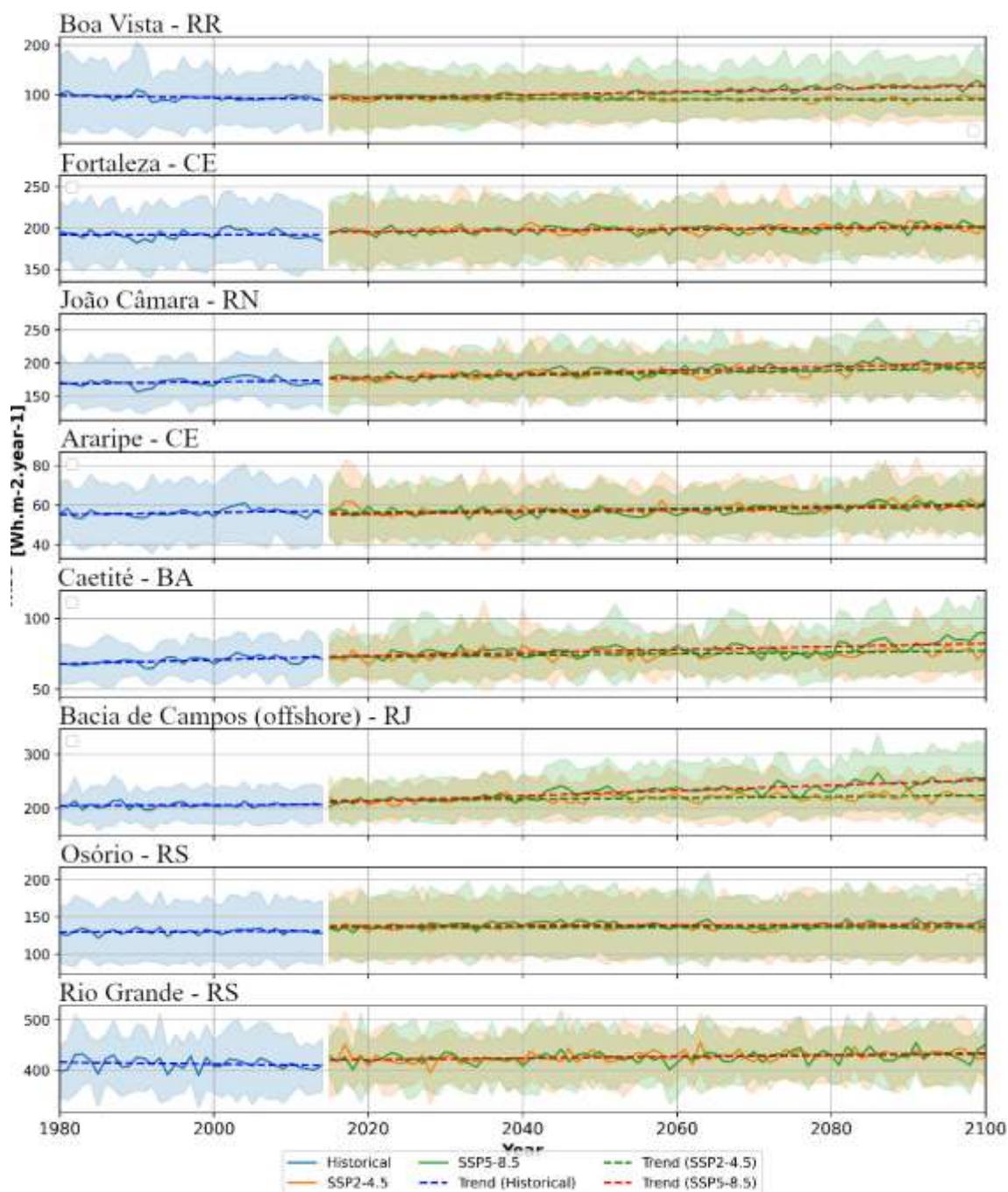


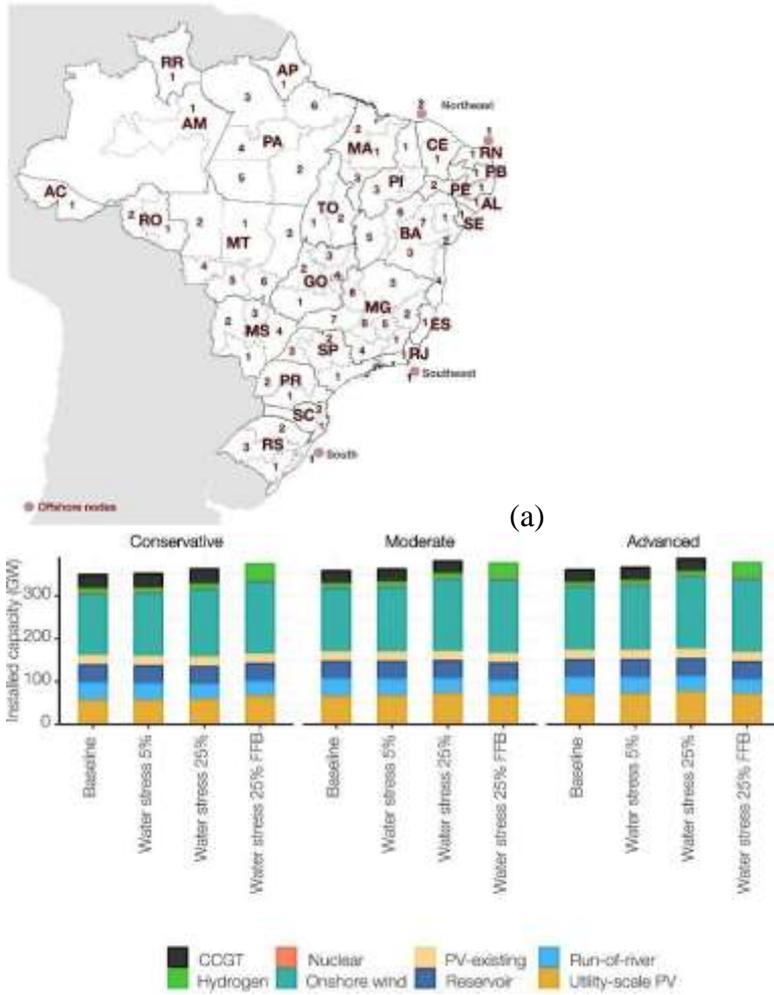
Figura 15. Tendência da densidade de energia eólica (DEE) para oito localidades com base nas previsões do *ensemble* SME nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Fonte: Lima et al. (2025).

### 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. A Figura 16(a) apresenta a configuração espacial do modelo Brasil-Calliope com 76 agrupamentos regionais para simulação do intercâmbio de energia no Sistema Interconectado Nacional.



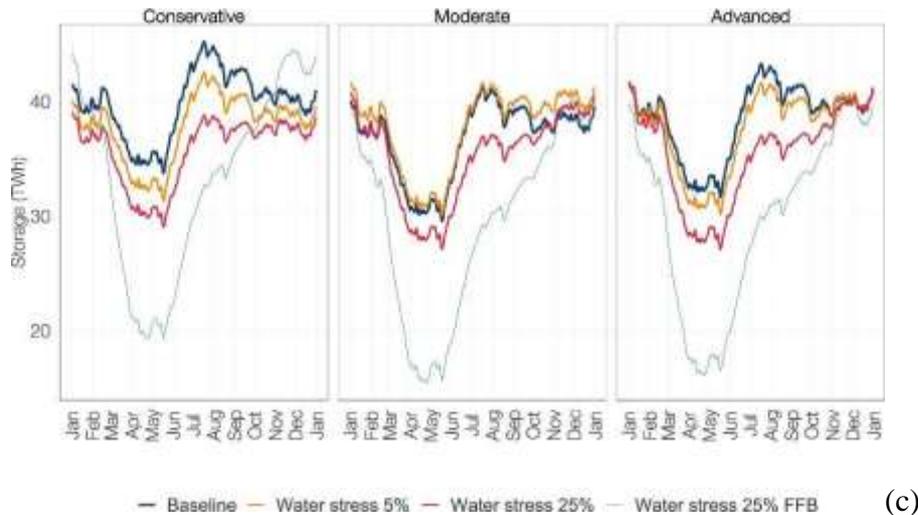


Figura 16. (a) Configuração espacial do modelo Brasil-Calliope para simulação de intercâmbio de energia no SIN; (b) Estimativa da capacidade instalada necessária para atender a demanda energética prevista para 2050; (c) níveis de armazenamento de energia hidrelétrica para 2017 considerando os cenários de estresse hídricos em 5% e 25% e com restrição de uso de combustível fóssil na geração (FFB) e as trajetórias de custo. Fonte: Borba et al. (2025).

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 MtCO<sub>2</sub>eq/ano), atingindo um mínimo de 25,7 MtCO<sub>2</sub>eq/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.

Em conclusão, o estudo demonstra que, com escolhas tecnológicas e estratégias de planejamento adequadas, o sistema energético brasileiro pode permanecer resiliente mesmo sob severas restrições hidrológicas mantendo a participação elevada de fontes renováveis de energia com boa relação custo-benefício se comparados a expansão dos combustíveis fósseis no setor elétrico. A energia eólica é fundamental para substituir a capacidade hidrelétrica perdida, com o hidrogênio oferecendo caminhos de armazenamento e descarbonização. Os principais desafios incluem conflitos de uso do solo, necessidades de infraestrutura para hidrogênio e a exigência de planejamento espacial integrado e coerência política com os compromissos ambientais assumidos pelo país perante a comunidade internacional.

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.

### **Colaboração interinstitucional e formação de recursos humanos**

Um dos objetivos do INCT, além de impulsionar a pesquisa científica e tecnológica de ponta em setores críticos do conhecimento, é formar e capacitar recursos humanos altamente qualificados, visando o desenvolvimento sustentável do país. Nesse sentido a componente de Segurança Energética fomentou a colaboração interinstitucional com várias ICT's do país. Essa estratégia alavancou a produção científica pela inclusão de competências qualificadas multidisciplinares atuando no subprojeto ao mesmo tempo em

que possibilitou a formação de recursos humanos direta ou indiretamente vinculadas a componente.

As informações cientificamente embasadas apresentadas neste capítulo, foram produzidas com envolvimento de um grupo de pesquisadores principais e associados vinculados à Universidades e Institutos de Pesquisa listados na Tabela 1.

A equipe de pesquisadores da componente Segurança Energética contou também com pesquisadores financiados por auxílios de bolsa de pesquisa de cota deste INCT ou indiretamente vinculados por submissão extra com apoio de coordenação. A Tabela 2 lista todos os pesquisadores bolsistas, em ordem alfabética, que atuaram nesta Fase II do INCT - Mudanças Climáticas. Essa lista inclui somente os bolsistas vinculados diretamente a componente do projeto através de bolsas de pesquisa ou de formação acadêmica.

Tabela 1. Pesquisadores principais envolvidos no desenvolvimento das atividades de pesquisa da componente de Segurança Energéticas.

<b>Pesquisador</b>	<b>Instituição</b>
Alexandre Szklo	COPPE / UFRJ
André Lucena	COPPE / UFRJ
André Rodrigues Gonçalves	INPE
Arcilan T. Assireu	Unifei
Enio Bueno Pereira	INPE
Fernando Ramos Martins	Unifesp
Roberto Schaeffer	COPPE / UFRJ
Rodrigo Santos Costa	INPE

Tabela 2. Bolsistas envolvidos no desenvolvimento das atividades de pesquisa da componente de Segurança Energéticas.

<b>Pesquisador</b>	<b>Instituição</b>	<b>Auxílio recebido</b>
Eduardo Weide Luiz	Unifesp	Bolsa PD / FAPESP (quota)
Fabio Amendola Diuana	UFRJ	Bolsa Doutorado / CAPES (quota)
Fábio T. Ferreira da Silva	UFRJ	Bolsa Doutorado / CAPES (quota)
Fernando Vasconde de Arruda	Unifesp	Bolsa de Mestrado / FAPESP (vinculada)
Francisco José Lopes de Lima	INPE	Bolsa TT-4 / FAPESP (quota)
Giovanna Bonafé Maurício	Unifesp	Bolsa IC / FAPESP (vinculada)
Guilherme B. M. Machado	INPE	Bolsa DTI (quota)
Madeleine S. G. Casagrande	Unifesp	Bolsa PD / FAPESP (vinculada)

Marcelo Pizzuti Pes	INPE	Bolsa DTI (quota)
Paula Conde Santos Borba	Unifesp	Bolsa PD / FAPESP (vinculada)
Paula Conde Santos Borba	Unifesp	Bolsa PD / CNPQ (quota)
<b>Rodrigo Souza Xavier</b>	<b>Unifesp</b>	<b>Bolsa Mestrado / CNPQ (vinculada)</b>

## Referências Bibliográficas

- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. A transição energética no Brasil. Brasília: ANEEL, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/transicao-energetica/a-transicao-energetica-no-brasil>. Acesso em: 20 maio 2025.
- ARRUDA, F. V.. Aplicação do modelo encoder decoder LSTM para previsão de geração fotovoltaica. 2024. 182 f. Dissertação (Mestrado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar) - Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar, Santos, 2024.
- BORBA, P. C. S.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; CUMPLIDO, M. A.; MARTINS, F. R. Integrating renewable energy for power security under water stress scenarios due to climate change: strategies and opportunities. *Energy*, [S.l.], v. 326, art. 136169, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136169>. Acesso em: 23 maio 2025.
- CAMPOS, E. F., PEREIRA, E. B., VAN OEL, P., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., & COSTA, R. S. (2021). Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. *Journal of Environmental Management*, 294(April), 112989. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112989>
- CASAGRANDE, M. S. G.; MARTINS, F. R.; ROSÁRIO, N. M. E.; LIMA, F. J. L.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; ZARZUR, A. M.; PES, M. P.; PEREIRA, E. B. Numerical assessment of downward incoming solar irradiance in smoke influenced regions – A case study in Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote Sensing*, v. 13, n. 22, p. 4527–4556, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4527>.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023 – Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN\\_Síntese\\_2024\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_Síntese_2024_PT.pdf). Acesso em: 20 maio 2025.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 20 maio 2025.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas*. Rio de Janeiro: EPE, 2021. (Nota Técnica EPE/DEE/011/2021-R1). Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/Dados%20de%20entrada%20para%20modelos\\_.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/Dados%20de%20entrada%20para%20modelos_.pdf). Acesso em: 20 maio 2025.
- GONÇALVES, A. R., ASSIREU, A. T., MARTINS, F. R., CASAGRANDE, M. S. G., MATTOS, E. V., COSTA, R. S., PASSOS, R. B., PEREIRA, S. V., PES, M. P., LIMA, F. J. L., & PEREIRA, E. B. (2020). Enhancement of cloudless skies frequency over a large tropical reservoir in Brazil. *Remote Sensing*, 12(17), 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs12172793>

GRAMMELIS, P. (Ed.). *Energy, Transportation and Global Warming*. Cham: Springer, 2016. (Green Energy and Technology). Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-30127-3>. Acesso em: 14 maio 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Managing Seasonal and Interannual Variability of Renewables*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/managing-seasonal-and-interannual-variability-of-renewables>. Acesso em: 20 maio 2025.

IPCC. Chapter 6: Cities, settlements and key infrastructure. In: *Sixth Assessment Report – Working Group II – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-6/>. Acesso em: 20 maio 2025.

IPCC. *Mudança do Clima 2023: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima*. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 14 maio 2025.

IRENA. *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. Acesso em: 14 maio 2025.

LIMA, F. J. L. de; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; et al. Reducing uncertainties of climate projections on solar energy resources in Brazil. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 14, n. 23586, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73769-y>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-73769-y>.

LIMA, F. J. L. de; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; et al. *Climate change impacts on wind power density in Brazil using CMIP6 climate models*. SSRN, 2025. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=5225803>. Acesso em: 26 maio 2025

LLOPART, M.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. da. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Climate Dynamics*, [S.l.], v. 54, p. 99–116, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>. Acesso em: 23 maio 2025.

MARENGO, J. A. et al. Climate variability and change in tropical South America. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; KIKUCHI, R. K. P. de; FILHO, M. C. de A.; SCHWAMBORN, R.; VITAL, H. (org.). *Tropical marine environments of Brazil*. Cham: Springer, 2023. (The Latin American Studies Book Series). p. 19–49. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21329-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21329-8_2). Acesso em: 23 maio 2025.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Disponível em: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html). Acesso em: 20 maio 2025.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: INPE, 2006. 188 p.

PES, M. P.; PEREIRA, E. B.; MARENGO, J. A.; et al. Climate trends on the extreme winds in Brazil. *Renewable Energy*, v. 109, p. 110-120, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.101>.

POKHREL, Y. et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, v. 11, p. 226–233, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>. Acesso em: 20 maio 2025.

SIQUEIRA, R. A.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; MARTINS, F. R. Sensitivity analysis of solar irradiance estimates over a tropical region by cloud index models. *Solar Energy*, v. 287, p. 113176, fev. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2024.113176>.

STECHEER, B. et al. Assessing the impact of climate variability on wind energy potential in decarbonization scenarios in energy systems models. In: *Aligning the Energy Transition with the Sustainable Development Goals*. Lecture Notes in Energy, v. 101, Springer, 2024. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-58897-6\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-58897-6_6). Acesso em: 20 maio 2025

TRÖNDLE, T.; LILLIESTAM, J.; MARELLI, S.; PFENNINGER, S. Trade-offs between geographic scale, cost, and infrastructure requirements for fully renewable electricity in Europe. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.25932/publishup-53961>. Acesso em: 20 maio 2025.

XAVIER, R. S.. Aplicação de fluxo ótico na previsão de Cloud Motion Vectors para estimativa de irradiância na superfície. 2022. 167 f. Dissertação (Mestrado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar) - Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2022.

ZULUAGA, C. F.; AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F. J.; MARTINS, F. R.; et al The climate change perspective of photovoltaic power potential in Brazil. *Renewable Energy*, v. 193, p. 1019–1031, jun. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812200670X>.

#### **4.4 Modelagem do sistema terrestre**

##### **Introdução**

Nos encontramos num momento peculiar da história na Terra. É um momento no qual o aumento da temperatura média global do planeta dá indícios de estar deixando o modo linear para entrar num modo exponencial de crescimento. As decorrências de tal mudança, se confirmadas, são desastrosas para a estabilidade climática e da sociedade humana na Terra.

Vamos abordar neste capítulo 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 CO<sub>2</sub> atmosférico de 420 ppmv (Figura 1a), 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 (Figura 1b). 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).

Desta forma, a pergunta que nos cabe é quais são os métodos de modelagem que foram válidos e funcionaram neste período da parte inferior da Figura 1b, em que a cada ano ocorriam pequenos incrementos da temperatura média global do planeta, com uma tendência gradual de aquecimento? Permaneceriam apropriados nossos métodos e parametrizações desenvolvidas em condições atmosféricas pretéritas, para contemplar um

crescimento de meio grau na temperatura média do planeta em um ano? Os resultados apresentados nas figuras abaixo nos dizem que sim, em parte, que o sinal das mudanças climáticas previstas pelos modelos está correto, não obstante as observações revelam estarem ocorrendo numa velocidade muito maior do que previstas.

No meio científico, meio grau de aumento de temperatura média do planeta representa um motivo para soar o alarme de perigo. Mas para a população em geral, meio grau é um pequeno valor. Quanto representa meio grau, quando comparado com a variação diurna de temperatura experimentada por uma pessoa a cada dia? Nisto pontuamos a questão, de como comunicar urgência em algo que é percebido pelas pessoas como não urgente!

Quando a temperatura do planeta passa a crescer mais aceleradamente, os grandes sumidouros de CO<sub>2</sub> atmosféricos, i.e. as florestas tropicais e os oceanos polares podem passar a diminuir suas taxas de remoção de CO<sub>2</sub> atmosférico, ou mesmo se tornarem potentes fontes de CO<sub>2</sub>, 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 mostrado na Figura 1a é fruto da combinação dos ciclos naturais de carbono no sistema terrestre, acrescidos das fontes antrópicas, que ocasionam o aumento. Porém, tal acúmulo de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> atmosférico, do um terço que habitualmente absorvem por suas atividades fotossintéticas. Tal redução na absorção de CO<sub>2</sub> 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. Então, nós temos uma condição muito crítica.

Isso não é algo para veicular na grande mídia, porque as pessoas, de um modo geral, não têm governança sobre este tipo de situação. Não sabem e não têm o que fazer com essa informação. E isto compõe com a questão do trauma ou a ansiedade climática. Em dizermos que o mundo está acabando e que sinto muito. Não é por esse caminho que eu imagino que nós devemos caminhar; se é que queremos ter uma pista de pouso seguro no futuro, para pousar esse avião da sociedade global, no qual estamos todos.

Nos últimos quatro anos, o número de desastres ambientais cresceu 250% no Brasil. Quem em sua consciência imaginaria que, em 2020 um dia poderia atravessar o Rio Negro a pé? Ou atravessar o médio Solimões a pé? Era uma coisa assim, fora do sonho mais maluco.

Possivelmente, nem os “cavaleiros do apocalipse” imaginaram um dia atravessar o Rio Negro a pé. Quer dizer, eles estavam com a imaginação fraca. 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.

Então, integramos o modelo global numa escala, por exemplo, de 200 quilômetros de grade, e em seguida aninhamos, o modelo Eta, numa grade de 20 quilômetros; geramos simulações e projeções para o futuro distante. E essa é a metodologia que contamos hoje no limite do que as equações de Navier-Stokes nos permitem. Que há uma limitação intrínseca, hoje não trataremos aqui, que são as não linearidades advindas do produto de perturbações.

O crescimento exponencial de uma perturbação, contudo, está justamente contido na parte não linear de produtos de perturbações. Então os nossos modelos são inerentemente incapazes de prever o crescimento exponencial de uma perturbação. Necessitamos, portanto, de outra tecnologia. Nós sempre ficamos satisfeitos que o nosso modelo faça bem isso e aquilo, que explica muitos processos. Mas como podemos prever um comportamento futuro da atmosfera e dos oceanos que passam a mostrar o crescimento de processos de crescimento exponencial?

### **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. A Figura 2 ilustra esquematicamente a sequência de integrações dos modelos BESM e Eta na geração de cenários globais/regionais de mudanças climáticas. A Figura 3 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? A Figura 4 mostra 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 Figura 5b mostra 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, da comparação das figuras 5a e 5b 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 (Figura 6). 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, como mostrado na Figura 7a. A Figura 7b 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.

Na próxima Figura 8 estão mostradas as previsões de anomalias anuais de precipitação para as Regiões Norte, Nordeste e Centroeste do Brasil: à direita as previsões do BESM e à esquerda a observação 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. Da apreciação da Figura 8, 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. Na Figura 8, 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 CO<sub>2</sub> atmosférico atuais, e o tracejado é como seria com a condição futura de concentração de CO<sub>2</sub> 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. A Figura 8b mostra o equivalente para o WBGT em ambiente externo, ao sol, em que o mesmo processo se observa. A soma do número de pessoas afetadas pelo aumento previsto de temperatura associadas ao cenário RCP 8.5 que chegariam a

experimentar o WBGT maior que 34 °C é de 11 milhões de pessoas, computadas as cidades onde o WBGT maior do que 34 °C é previsto. Sendo entre 5 e 6 milhões de pessoas em condições de vulnerabilidade. A Figura 8 mostra, para o WBGT externo, que existe uma projeção de impacto mensurável na saúde, na capacidade das pessoas viverem em estresse ou morrerem de estresse térmico.

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 CO<sub>2</sub> atmosférico constante aos níveis pré-industriais (i.e. 240 ppmv) (CTRL) e, numa integração em paralelo, quadruplicamos a quantidade de CO<sub>2</sub> instantaneamente (Abrupt4xCO<sub>2</sub>) e fizemos outra rodada de mil anos. A diferença entre as integrações Abrupt4xCO<sub>2</sub> e CTRL mostrou na Figura 9 esse decaimento porcentual em relação à integração CTRL.

Na integração Abrupt4xCO<sub>2</sub>, 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 10<sup>6</sup> 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.

A Figura 10 mostra animações de diagramas Temperatura/Salinidade, em vários lugares do globo. Os pontos nos quais os diagramas foram calculados estão graficados na Figura 10i embaixo à direita. A Figura 10a, à esquerda, no topo, 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.

A Figura 11, do artigo Bottino et al (2024) é 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 porcentual 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. Na Figura 11, os tons entre vermelho e abóbora, correspondem a reduções dos totais pluviométricos anuais entre 90% e 50%. 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 (Figura 12). 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 (Figura 13). 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. O projeto SIPEC - Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos faz parte do Programa Brasileiro de Inteligência Artificial, PBIA, proposto pelo INPE, e realizado por uma rede de instituições de inteligência artificial e modelagem climática. O INPE oferece os cenários e previsões climáticas, globais e regionais, os dados de satélites. Estamos projetando uma nova constelação de satélites de órbita polar e geoestacionário, em colaboração com a China. Será uma revolução para a meteorologia nacional. Assim como a federação de dados, que equaciona de que forma repartimos dados entre as instituições federadas, sem ter que transferi-los para um mesmo data center.

Este capítulo 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.

## **Desenvolvimentos do *Regional Earth System Model* baseado no Modelo Eta**

### **Introdução**

A modelagem climática global proporciona um panorama abrangente das alterações climáticas planetárias e do balanço radiativo da Terra. Em contrapartida, a modelagem regional permite o refinamento dessas informações em escalas espaciais menores, oferecendo um "zoom" em determinadas regiões, possibilitando a avaliação mais detalhada de impactos locais e regionais.

## **O Modelo Eta**

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.

Apresenta-se, a seguir, uma linha do tempo com os principais marcos evolutivos do modelo Eta no Brasil desde 1996. Destacam-se os desenvolvimentos de trabalhos de teses e mais recentes vinculados ao INCT, como o Global Eta Framework (Latinovic, 2018; Figueiredo, 2020), a versão Eta Lightning com simulações de raios e prognóstico de NO<sub>x</sub> (Moura, 2020), e melhorias como o aumento do topo do GEF para 1 hPa com função de "restart" (Figueiredo, 2020). Além disso, merecem destaque a implementação do esquema radiativo RRTMG e a inclusão do impacto radiativo de nuvens profundas (Campos, 2021).

Foram também 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)

## **Atualização da Cobertura Vegetal e FCover**

O Dr. André Lyra realizou 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.

As simulações comparativas com dados antigos e atualizados evidenciaram maior aproximação da FCover atual aos dados do ERA5, tanto em temperatura quanto nos volumes de precipitação.

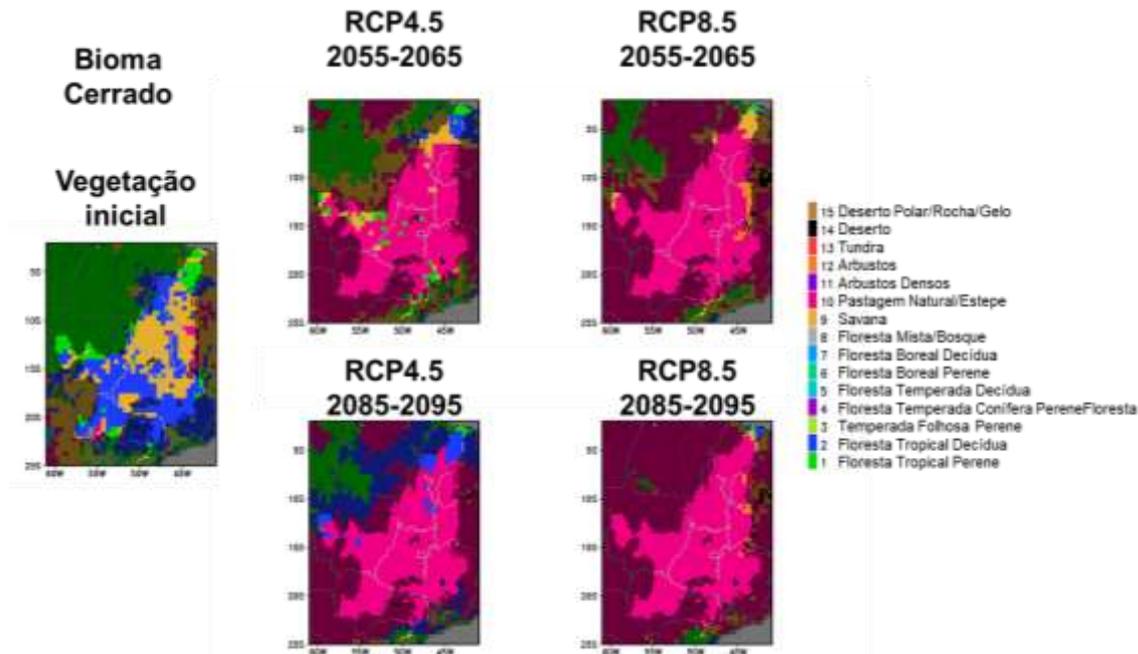
## **Impactos do Desmatamento na Amazônia simulados em 1 km de resolução**

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 CO<sub>2</sub> 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 (Figura 1). Considerando ambos os cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, em praticamente toda a área, os tipos de vegetação iniciais, como Savana e Floresta Decídua, são substituídos pelo tipo de vegetação Pastagem Natural (Chou et al. 2024).



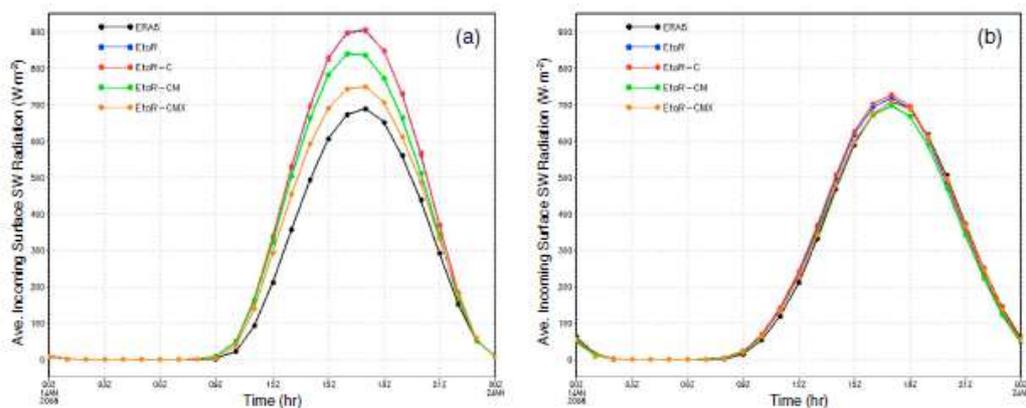
**Figura 1** - Tipos de vegetação inicial (coluna da esquerda) e mudanças na cobertura vegetal a partir das projeções do modelo de vegetação dinâmica INLAND, que por sua vez utilizou as projeções do Modelo Eta forçado pelo modelo climático HadGEM2-ES, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, no meio (linha superior) e no final (linha inferior) do século XXI na região do bioma Cerrado. A área em destaque delimita o bioma Cerrado. Adaptado de Chou et al. (2024)

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 CO<sub>2</sub> 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.

### Esquema de radiação RRTMG com efeito das nuvens convectivas profundas

O pacote de radiação do modelo Eta foi atualizado para um código mais recente, RRTMG, Modelo de Transferência Rápida de Radiação para GCM. O esquema foi implementado na versão 1.4.2 do Eta e testado em céu nublado, e um desenvolvimento adicional foi a inclusão da nuvem convectiva profunda no esquema RRTMG (Campos et al., 2024). Isso produziu uma redução adicional no viés positivo do fluxo radiativo de ondas curtas incidente na superfície, melhoria na cobertura de nuvens, no ciclo diurno da radiação líquida na superfície e na temperatura a 2 metros sobre terra e mar. No entanto, a precipitação total foi reduzida. Em uma simulação de 10 anos, o modelo com as novas modificações pode reproduzir a variabilidade sazonal dos fluxos de radiação durante o verão e o inverno em comparação com dados de reanálise. Vários testes foram realizados modificando os parâmetros convectivos e microfísicos a fim de melhorar o balanço de radiação no modelo e obter uma versão mais adequada para simulações de mudanças climáticas. O novo esquema RRTMG no modelo Eta melhorou os fluxos radiativos médios e a temperatura média de 2 m sobre o continente e sobre o oceano (Figura 2).



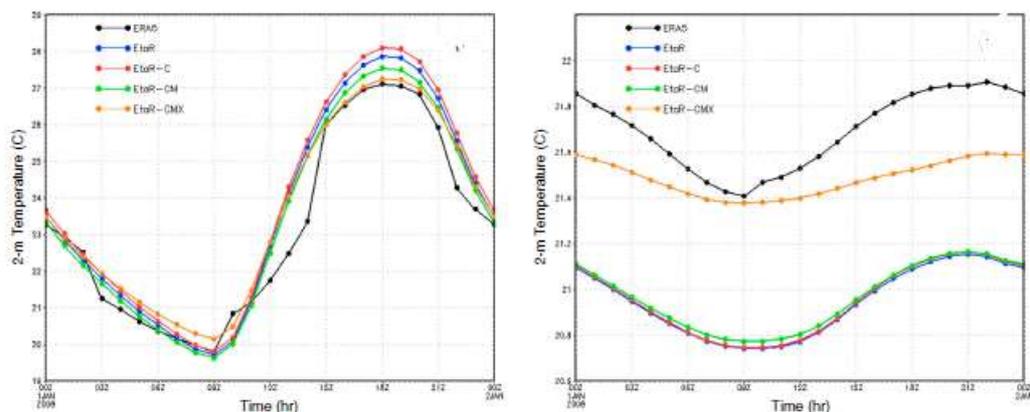


Figura 2 - Ciclo diurno médio de radiação solar incidente na superfície sobre a) terra e b) mar e temperatura a 2 m sobre c) terra e d) mar, para diferentes experimentos numéricos e reanálise ERA5.

### Implementação da Climatologia de Aerossóis do MERRA-2

Foi implementada uma climatologia mensal de profundidade óptica de aerossóis (AOD – Aerosol Optical Depth) dos dados de reanálise MERRA-2 (2011–2021), visando incorporar os efeitos radiativos diretos no modelo via esquema RRTMG. O período de setembro a novembro foi especialmente analisado devido aos elevados valores de AOD.

Comparando simulações controle e com aerossóis, observou-se significativa redução no fluxo de radiação de onda curta à superfície, com consequente redução do viés quente nas temperaturas a 2 m. Foram analisadas três regiões (Centro-Oeste, Norte e Sudeste), onde os resultados indicaram melhor desempenho da simulação com aerossóis, inclusive sobre o oceano. Artigo deste trabalho está em preparação

### Avaliação do Modelo Oceânico MOM6

Como etapa do desenvolvimento do acoplamento do modelo oceânico Regional MOM6 ao modelo Eta, (Laurenti, 2023) configurou MOM6 regional em diferentes resoluções espaciais, 7 km a 1 km, e rodou forçado com reanálise ERA5 e com Eta, no período de 9 a 19 de novembro de 2024. As análises da temperatura da superfície do mar TSM simulada pelo MOM6 mostraram menores erros nas regiões costeiras e evidenciaram ressurgências mais intensas com forçante do Eta. A série temporal comparativa com observações e reanálise indica potencial para redução de viés com o acoplamento pleno.

### Modelagem de Lagos com o Eta

Como etapa do desenvolvimento do acoplamento do modelo unidimensional de lago FLake ao modelo Eta, Afonso e Chou (2024) realizaram estudo e validação do FLake com aplicação ao lago de Sobradinho (BA). Foram geradas simulações ponto-a-ponto em diferentes estações do ano e comparadas aos dados do INMET e do lago. Os resultados mostraram boa representação do ciclo diurno da temperatura da superfície do lago, demonstrando a viabilidade do acoplamento futuro do modelo Eta a sistemas hidrológicos lacustres.

### Código do Modelo modernizado

O código do modelo Eta foi modificado, removendo todos os comandos COMMON BLOCKS e substituído por chamadas de MODULE. Esta nova versão do modelo (Gomes et

al., 2023) permite um acoplamento mais fácil de novos processos físicos, a funcionalidade de reinicialização do modelo foi revisitada para operar com o acoplador FMS; o acoplamento com o modelo oceânico MOM6; e a substituição do esquema de superfície terrestre NOAH pelo esquema NOAH-MP. Junto a modernização, o modelo foi também modificado para produzir “restart” ideal em integrações longas.

## Referências:

Alves de Oliveira, B. F., M. J. Bottino, P. Nobre, and C. A. Nobre, 2021: Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. *Commun. Earth Environ.*, **2**, 207, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>.

Bottino, M. J., and Coauthors, 2024: Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil. *Sci. Rep.*, **14**, 5131, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5>.

Nobre, P., M. Malagutti, D. F. Urbano, R. A. F. de Almeida, and E. Giarolla, 2009: Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *J. Clim.*, **22**, 5686–5697, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>.

———, and Coauthors, 2023: AMOC decline and recovery in a warmer climate. *Sci. Rep.*, **13**, 15928, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43143-5>.

Afonso, E.O.; Chou, S.C. Modeling the Effects of Local Atmospheric Conditions on the Thermodynamics of Sobradinho Lake, Northeast Brazil. *Climate* 2023, **11**, 208. <https://doi.org/10.3390/cli11100208>

Campos, D.A., Chou, S.C., Bottino, M.J., Gomes, J.L. & Lyra, A. (2024) Inclusion of the radiative effect of deep convective clouds in the Eta model simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–12. Available from: <https://doi.org/10.1002/qj.4673>

Campos, D.A. Inclusão do Efeito Radiativo de Nuvens Convectivas profundas em Simulações do Modelo Eta. 2021. Tese (Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

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

Chou, S. C., Lyra, A. A., Rodrigues, D. C., Pilotto, I., Gomes, J. L., Regoto, P., Tavares, P. S. Mudanças Climáticas no Cerrado. In: RODRIGUES, L. N. (ed.). Agricultura irrigada no cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2024. ODS 2 e ODS 6. cap. 12. p. 361-397. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1165613>. ISBN 978-65-89957-83-6

Farfán, H. H., Tcheou, M. P., Lovisoló, L., Chou, S. C., Gomes, J. L., & Nobre, P. (2024). Correção de viés em previsão climática global da temperatura da superfície do mar por meio de filtros adaptativos no domínio da frequência. *Revista Brasileira De Climatologia*, 34(20), 620–642. <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17005>

Ferreira, N. C. R., Tavares, P. S., Medeiros, G. S., Ferreira, L. N., Borges, P., Chou, S. C., & Rodrigues, M. L. (2023). Projeções de tempo severo e impactos em torres de linhas de

transmissão em Santa Catarina, Brasil, sob cenários futuros de mudanças climáticas globais. Derbyana, 44. <https://doi.org/10.14295/derb.v44.808>

Figueiredo, JBA. Influência da Resolução Vertical e da Precipitação convectiva no Desempenho das Simulações do Modelo Global Eta Framework (GEF). 2020. Dissertação (Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Gomes, J.L.; Chou, S.C.; Mesinger, F.; Lyra, A.A. Rodrigues, D.C., Rodriguez, D.A., Campos, D.A., Chagas, D.J., Pilotto, I., Tavares, P.S., Lucci, L.T., Veljovic, K., Laureanti, N.C., Mantovani Jr, J.A., Lamosa, D., Dourado, M.S.C., 2023: Manual Modelo Eta - versão 1.4.2. INPE. São José dos Campos, SP. 138pp. <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48G6PU5>. ISBN 978-65-89159-08-7

Latinovic, D. Global Eta Framework simulations at seasonal and medium-range scales . 2018. Tese (Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Laureanti, N.C. Simulations of SACZ characteristics using high-resolution coupled ocean-atmosphere model. 2023. Tese (Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Moura, J.D.O. Parametrização de Descargas Elétricas e Seus efeitos na Produção de Chuva do Modelo Eta. 2020. Tese (Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

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

Tavares, Priscila da Silva; Pilotto, Isabel Lopes; Chou, Sin Chan; Souza, Saulo Aires; Fonseca, Leila Maria Garcia, 2023, "Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta com correção de viés", <https://doi.org/10.57810/lattesdata/WAVGSL>, LattesData, V1

Tavares, P., Pilotto, I. L., Chou, S. C., Souza, S. A., Fonseca, L. M. G., & Chagas, D. J. (2024). Um conjunto de dados de projeções de mudanças climáticas de alta resolução para a América do Sul com correção de viés. Derbyana, 45. <https://doi.org/10.69469/derb.v45.821>

Tavares, P.S, Rodrigues, D.C., Chou, S.C., Laureanti, N.C., Medeiros G.S., Gomes, J.L., Vergasta, L.A., Correia, F.W.S, 2025: Dynamical-statistical downscaling of seasonal hindcasts of temperature and precipitation over South America. *Brazilian Journal of Water Resources*. RBRH, Porto Alegre, v. 30, e7, 2025. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240073>

Sondermann, M.; Chou, S.C.; Tavares, P.; Lyra, A.; Marengo, J.A.; Souza, C.R.d.G. Projections of Changes in Atmospheric Conditions Leading to Storm Surges along the Coast of Santos, Brazil. *Climate* 2023, 11, 176. <https://doi.org/10.3390/cli11090176>

## 4.5 Comunicação

O time responsável pelo desenvolvimento das ações dentro do tema transversal “Comunicação, disseminação do conhecimento, educação para a sustentabilidade” do INCT-MC fase 2 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. O grupo é formado por historiadores, antropólogos, educadores, comunicadores, filósofos e pesquisadores das ciências naturais que atuam em interface com as artes e humanidades. Além de pesquisas e publicações acadêmicas, as atividades do grupo utilizaram diferentes linguagens, como cinema, desenho, escultura, e trabalharam com a comunicação em suas múltiplas vertentes – na forma de revistas, livros e na produção de objetos com

materialidades variáveis. Nos textos acadêmicos e na produção desses outros materiais, o objetivo principal foi fomentar reflexões sobre o tempo presente, marcado pelas mudanças climáticas, suas causas e consequências, e como esses elementos mobilizam novas narrativas, novos modos de existir, novos conceitos e ideias, constituindo relações com variados graus de eficácia.

Neste capítulo, apresentamos uma reflexão sobre as linhas condutoras que guiaram os trabalhos da equipe do tema transversal ao longo dos anos de vigência do INCT-MC fase 2<sup>1</sup>. Buscamos, 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**

Vivemos um momento em que a crise ambiental deixou de ser uma abstração científica ou um alerta distante para se tornar um componente cotidiano da experiência social. 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; Cangí, 2023). Os pesquisadores da equipe do tema transversal desenvolveram trabalhos orientados a ampliar as reflexões e desdobramentos em torno do conceito de Antropoceno, a partir de problematizações advindas das humanidades, das artes e das ciências sociais (Cangí, 2023; Dias, 2023; Dias et al., 2023; Sales, Dalmaso e Rigue, 2023).

---

<sup>1</sup> Não será apresentada, aqui, lista exaustiva das produções do período; tais informações encontram-se nos relatórios anuais do projeto.



Imagem 1: A carne de Gaia. Beá Meira. Capa da ClimaCom Dossiê "Desastres", ano 10, no. 25, 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).

As pesquisas produzidas pela equipe do tema transversal mostram que, nas atividades educativas e comunicativas, o que está em jogo não é apenas a circulação da informação, mas os processos sociais e culturais que moldam as formas de sentir, compreender e agir no mundo (Oliveira, 2017; Queiroz Filho, 2024; Ribeiro et al., 2024). Essa constatação remete diretamente ao que Guzzo et al. (2024) entendem como a crise da imaginação que caracteriza as sociedades modernas. Segundo os autores, a emergência climática não é apenas uma crise ecológica ou científica, mas também uma crise de formas de percepção, estética e sensível. As formas modernas de percepção, estruturadas em dicotomias como natureza/cultura e sujeito/objeto, são incapazes de apreender a complexidade dos fenômenos e relações que definem o Antropoceno. Assim, a comunicação não deve se limitar à produção e disseminação de dados, mas precisa engendrar regimes de sensibilidade que transformem modos de percepção e mobilizem afetos, compromissos e responsabilidades compartilhadas (Cotaimich, 2022; Vidal et al., 2023; Murriello, 2022; Dias, Guzzo, Fonseca, 2022).

### **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.

Dentro da produção acadêmica dos pesquisadores da equipe de tema transversal, destacam-se esforços de análise e exploração do papel das práticas e experimentos artísticos no contexto das mudanças climáticas e seus desafios existenciais associados. 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. As práticas artísticas não abordam todos os aspectos do problema, mas abordam uma questão fundamental, que diz respeito a como percebemos as questões e quais formas de sensibilidade são fomentadas ou desarticuladas nos processos da vida cotidiana.



Imagem 2: Inundação. Mesa de trabalho com as plantas companheiras. Coordenação: Susana Dias e Mariana Vilela.

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 de 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).



Imagem 3: Entrefios: o tecido, a modelagem e o tempo. Coletivo multiTÃO. Coordenação: Susana Dias e Fernanda Pestana.

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. Trata-se de gerar colaborações ativas e mútuas e lidar com todos os problemas que envolvem encontros como exercícios políticos ativos, e que às vezes são difíceis. 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.



Imagem 4: Residência artística "Perceber-fazer floresta II". Coordenação: Susana Dias e Emanuely Miranda. Campinas, 2024

A principal plataforma na qual os resultados destas ações e reflexões foram publicizados é a revista *ClimaCom Cultura Científica – pesquisa, jornalismo e arte*<sup>2</sup>. 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. Além da produção textual, a publicação apresenta obras de artistas brasileiros e latino-americanos. Conta ainda com uma seção de notícias e divulgação científica, além de incluir materiais educativos. 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 outros<sup>3</sup>.

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

<sup>2</sup> Ver <https://climacom.mudancasclimaticas.net.br>

<sup>3</sup> 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 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.

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. A premissa de “falta de informação” desconsidera que todos os indivíduos possuem ideias relativamente complexas sobre o funcionamento do mundo e, portanto, do meio ambiente e dos ecossistemas. Em alguns contextos, há grande investimento coletivo no desenvolvimento e na circulação dessas ideias, como no caso da periodicidade das chuvas no semiárido nordestino e sua relação com o conhecimento popular e tradicional sobre o meio ambiente (Taddei, 2017). Naturalmente, essas questões também se tornam parte dos discursos políticos e das relações de poder. Quando a informação científica chega, ela não ocupa espaços vazios, mas interage com essas ideias existentes. Ela é sugada para o turbilhão da vida cultural, social e política em diferentes escalas (Miguel, Taddei e Monteiro, 2023). Por isso, a literatura acadêmica sobre comunicação científica mostra que ela é mais eficaz quando o público pode participar da construção dos significados atribuídos às mensagens. Essa participação permite que a informação seja contextualizada, tornando-a compreensível.

Pensar a arte como campo de produção de futuros — e não apenas como forma de denúncia — é uma aposta que ressoa o debate contemporâneo em torno do cuidado e das relações que o engendram. Imaginar exige tempo, atenção e compromisso ético com aquilo que ainda não é. Em um mundo marcado pelo esgotamento dos horizontes utópicos modernos, a arte cria respiros, frestas, possibilidades — não como fuga, mas como recusa ativa da inevitabilidade do colapso.

### **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.

Esse movimento, por sua vez, ocorre em vinculação profunda com campos emergentes da própria ciência. O conceito de holobionte, por exemplo, mobilizado pela ecologia e pela microbiologia (Guilbert, 2017; Haraway, 2017), aprofunda esse entendimento. Se nós, humanos, somos organismos compostos por múltiplas formas de vida em simbiose, como propõe o conceito de holobionte, então não há uma separação rígida entre o humano e o não humano. Essa constatação científica tem implicações políticas, pois desfaz os pressupostos individualistas e dualistas que estruturaram ideias como sujeito, corpo, saúde e ambiente na modernidade. A saúde, por exemplo, passa a ser vista como expressão da qualidade das relações — e não como atributo de um corpo isolado.

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.



Imagem 5: Experiências de arvorecer. Coletivo Arvorecer de Casa em Casa. Coordenação - Susana Dias. Capa da ClimaCom Dossiê "Coexistências e Cocriações", ano 9, no. 20, 2021.

### **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 outros futuros. A experiência do tema transversal do INCT Mudanças Climáticas 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.

O desafio do Antropoceno não é apenas técnico ou científico: é simbólico, ético e político. Exige que passemos da lógica da gestão à lógica da regeneração; da pedagogia da instrução à pedagogia do vínculo; da ciência da previsão à ciência da convivência. Trata-se de aprender a viver com o problema, como propõe Haraway (2017), e de tecer redes de cuidado em meio às ruínas do presente (Tsing, 2019).

Essa travessia não se fará apenas com dados e diagnósticos. Exigirá coragem poética, experimentação estética, sensibilidade política e compromisso coletivo. Se, como diz Ailton Krenak (2021), é preciso ativas ideias para adiar o fim do mundo, que esse adiamento seja também um convite à invenção de outros mundos possíveis — mundos em que possamos, enfim, aprender a cuidar.

## Referências

- ARANHA, N.; DIAS, S.O. Seguir os sapos: encontros entre artes e ciências diante dos tempos de catástrofes. *PORTO ARTE: Revista de Artes Visuais*, v. 28, p. 1-36, 2024.
- ASAYAMA, S.; DE PRYCK, K.; BECK, S.; COINTE, B.; EDWARDS, P. N.; GUILLEMOT, H.; GUSTAFSSON, K. M.; HARTZ, F.; HUGHES, H.; LAHN, B.; LECLERC, O.; LIDSKOG, R.; LIVINGSTON, J. E.; LORENZONI, I.; MACDONALD, J. P.; MAHONY, M.; MIGUEL, J.C.H.; MONTEIRO, M.; O'REILLY, J.; PEARCE, W.; PETERSEN, A.; SIEBENHUNER, B.; SKODVIN, T.; STANDRING, A.; SUNDQVIST, G.; TADDEI, R.; VAN BAVEL, B.; VARDY, M.; YAMINEVA, Y; HULME, M. Three institutional pathways to envision the future of the IPCC. *Nature Climate Change*, v. 13, p. 01, 2023.
- BRAVO, M.; SILVERMAN, E. National Parks in Prospect. *Art Journal*, 83(4), 7–15 (2024).
- BROAD, K.; AGRAWALA, S. The Ethiopia–ENSO case: Use of climate information for famine early warning. *Climate Change*, 45(1), 61–73 (2000).
- BROAD, K.; PFAFF, A.; GLANTZ, M. Effective and equitable dissemination of seasonal-to-interannual climate forecasts: Policy implications from the Peruvian fishery during El Niño 1997–98. *Climatic Change*, 54, 415–438 (2002)
- BUCCHI, M. Of deficits, deviations and dialogues: Theories of public communication of science. In: BUCCHI, M.; TRENCH, B. (Eds.), *Handbook of Public Communication of Science and Technology*. Nova York: Routledge, 2008, p. 57–76
- CANGI, A. Retóricas y políticas del arrastre: por una estética de lo inestable en la era del Antropoceno. *Cartografías del Sur, Revista Multidisciplinaria en Ciencias, Arte y Tecnología*. Secretaría de Investigación y Vinculación Tecnológica e Institucional de la Universidad Nacional de Avellaneda. 17, Cds, Nº 17, 2023.
- CANGI, A; GONÇALVES, M. Fazer Sentir. Testemunho de uma Transformação da Sensação. (Modos de Interrogar nossas Práticas Educativas e Pedagógicas). *Revista Científica e-Curriculum do Programa de revistas*. PUC-SP. V.21, pp.1-28, 2023.
- CASH, D.W.; CLARK, W.C.; ALCOCK, F.; DICKSON, N.M.; ECKLEY, N.; GUSTON, D.H.; JÄGER, J.; MITCHELL, R.B. Knowledge systems for sustainable development. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 100 (14) 8086-8091, (2003).
- COTAIMICH, V. (Des) montaje transdisciplinar, bioperformance y autoficción (singular y colectiva) – para el cuidado de la vida humana y más que humana. *ClimaCom – Políticas vegetais [online]*, Campinas, ano 9, dez. 2022.
- DANOWSKI, D.; VIVEIROS DE CASTRO, E. Há mundo por vir? Ensaio sobre os medos e os fins. Florianópolis: Cultura e Barbárie, 2014.
- DIAS, S. O. Modos de atención a la Tierra: materiales y prácticas artísticas frente al Antropoceno. *Revista digital FILHA*, v. 27, p. 1-20, 2022
- DIAS, S. O.; GUZZO, M.; FONSECA, F. (Orgs.). Dossiê 'Políticas vegetais'. *ClimaCom*, número 23. Campinas: Labjor-Unicamp, 2022.
- DIAS, S. O; CANGI, A.; GONÇALVES, M; AMORIM, A. 1o. Seminário do Ciclo “Ecopoéticas: educação, arte e Antropoceno - uma homenagem a Bruno Latour” | com Michele Gonçalves, Susana Dias, Adrián Cangi e Carolina Cantarino. YouTube da ClimaCom. 03/03/2023. Sobre os temas: “Sobre a instabilidade (da noção de) natureza” e “Como não (des)animar a natureza”
- DIAS, S.O. Antropoceno: quando a humanidade é assunto da geologia. Podcast Oxigênio, episódio 166, 19 de maio de 2023.
- DIAS, S.O.; MIRANDA, E.; BELLINI, L.S.; LEITÃO, M.V.; BARBOSA, R.; PINTO, P.L.; ALVES, M.B.; ARANHA, N.; SALLES, J.P. Plantas companheiras de escrita: desbordando o Antropoceno. *Climacom Cultura Científica - Pesquisa, Jornalismo e Arte*, número 23, 2022.

ESCADA, P.; COELHO, C.A.S.; TADDEI, R.; DESSAI, S.; CAVALCANTI, I.F.A.; DONATO, R.; KAYANO, M.; MARTINS, E.S.P.R.; MIGUEL, J.C.H.; MONTEIRO, M.; MOSCATI, M.C.L. Climate services in Brazil: Past, present and future perspectives. *Climate Services*, v. 24, p. 100276, 2021.

FERDINAND, M. Uma ecologia decolonial: pensar a partir do mundo caribenho. São Paulo: Ubu, 2022.

FLEURY, L.C.; MIGUEL, J.C.H.; TADDEI, R. Climate Change, Science and Society. *Sociologias*, Porto Alegre, v. 21, n. 51, p. 18-42, Aug. 2019

FONSECA, F. 'No lugar do outro', uma carta para Claudia Andujar. *Climacom Cultura Científica - Pesquisa, Jornalismo e Arte*, v. 22, p. 1, 2022.

FONSECA, F.; AMORIM, A.C.R. Residências artísticas e currículo-experimentação: como podem nos ajudar a adiar o fim do mundo? *SÉRIE-ESTUDOS*, v. 26, p. 11-31, 2022.

FONSECA, F.; KROEF, A.B.G. Moscas transgênicas: quando o laboratório de genética torna-se ateliê de criação artística. *Revista Digital do LAV*, v. 16, n. 1, p. e3/1-26, 2023.

GARCIA, G.C. Divulgação científica e proliferação de vida: breve relato sobre atmosferas e oxigenação. In: RIBEIRO, A.; MIRANDA, E.; PESTANA, F.; MAUS, L.; MARINS, S.; SALES, T.A.; DIAS, S.O. *Morada Floresta*. Campinas: BCCL Unicamp, 2024

GILBERT, S.F. Holobiont by Birth: Multilineage Individuals as the Concretion of Cooperative Processes. In: TSING, A.; SWANSON, H.; GAN, E.; BUBANDT, N. (eds.) *Arts of Living on a Damaged Planet: Ghosts and Monsters of the Anthropocene*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2017, p. m73

GLANTZ, M.H. *Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

GREGORY, J.; MILLER, S. *Science in public: Communication, culture, and credibility*. Nova York: Perseus, 2000.

GUZZO, M.S.L.; DIAS, S. O.; MORAES, A.; FAGUNDES, G. M.; RIBEIRO, W.; ALVES, K. R.; TADDEI, R. Artistic Practices in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 49, p. 223-247, 2024.

GUZZO, M.S.L.; TADDEI, R. Experiência Estética e Antropoceno: Políticas do Comum Para os Fins de Mundo. *Desigualdade & Diversidade (PUCRJ)*, v. 17, p. 72-88, 2019.

HARAWAY, D. "Anthropocene, Capitalocene, Plantatiocene, Chthulucene: Making Kin," *Environmental Humanities* 6 (2015): 160.

HARAWAY, D. *Ficar com o problema: fazer parentes no chthluceno*. São Paulo: N-1 Edições, 2023.

HARAWAY, D. Symbiogenesis, Symptoiesis, and Art Science Activisms for Staying with the Trouble. In: TSING, A.; SWANSON, H.; GAN, E.; BUBANDT, N. (eds.) *Arts of Living on a Damaged Planet: Ghosts and Monsters of the Anthropocene*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2017, p. m25.

IRWIN, A., & WYNNE, B. (Eds.). *Misunderstanding science? The public reconstruction of science and technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

JASANOFF, S. *Designs on nature: Science and democracy in Europe and the United States*. Princeton: Princeton University Press, 2005

KIRCHHOFF, C. J.; LEMOS, M. C.; DESSAI, S. Actionable knowledge for environmental decision making: Broadening the usability of climate science. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 393-414 (2013).

KOPENAWA, D.; ALBERT, B. *A Queda do Céu: palavras de um xamã yanomami*. São Paulo: Companhia das Letras, 2015.

KOPENAWA, D.; ALBERT, B. *O espírito da floresta*. São Paulo: Companhia das Letras, 2023.

KRENAK, A. *Futuro ancestral*. São Paulo: Companhia das Letras, 2022.

KRENAK, A. *Ideias para adiar o fim do mundo*. São Paulo: Companhia das Letras, 2021.

LEMOS, M.C.; DILLING, L. Creating usable science: Opportunities and constraints for climate knowledge use and their implications for science policy. *Global Environmental Change*, 17(1), 57–74 (2007)

MARENGO, J. Clima: extremos e desastres. *Revista ClimaCom, Manifesto das águas*, coluna assinada, ano 12, nº 28, 2025. Disponível em <https://climacom.mudancasclimaticas.net.br/wp-content/uploads/2025/02/Clima-extremos-e-desastres.pdf#page=19.89>; acessado em 7 de junho de 2025.

MARRAS, S.; TADDEI, R. O Antropoceno: sobre modos de compor mundos. Belo Horizonte: Fino Traço, 2022.

MIGUEL, J. C. H., TADDEI, R.; MONTEIRO, M. Civic Epistemologies. In: PRYCK, K.; HULME, M. (orgs.), *A critical assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY: Cambridge University Press, 2023, pp. 217-224

MIRANDA, E.; BELLINI, L.; DIAS, S.O. Escrever (com) os pássaros: artes, ciências e divulgações em tempos de catástrofes. In: *Decolonizar para viver - cultura e ciência em perspectiva*. Campinas. EDICC 11, 2024. v. 1. p. 12-13.

MURRAY, D.C. National Identity, Ideology, and the American Landscape. *Art Journal*, 83(4), 5–6 (2024)

MURRIELLO, S. Muestra de arte-ciencia de Tres a la deriva y sesión *The challenge of public communication of science in limnology and paleolimnology*. En: Congreso IAL-IPA. Lakes as memories of the territories. Memórias IAL-IPA, 2022, p. 81-90

MURRIELLO, S.; BENGTTSSON, A. Do we need Science and Technology museums? Public Communication of Science and Technology Conference (PCSTconference 2023), Rotterdam, 2023

OLIVEIRA, R.S.M.O. Percepção e política na divulgação científica: em busca de um público-alvo. *Climacom Cultura Científica - Pesquisa, Jornalismo e Arte*, Campinas, ano. 4, n. 9, Ago. 2017

PELLEJERO, E. Fazer de outras maneiras: cuidado e coabitação em tempos de crise. In: RIBEIRO, A.; MIRANDA, E.; PESTANA, F.; MAUS, L.; MARINS, S.; SALES, T.A.; DIAS, S.O. *Morada Floresta*. Campinas: BCCL Unicamp, 2024, pp. 267-272

POVINELLI, E.A. *Catástrofe ancestral: e existências no liberalismo tardio*. São Paulo: Ubu, 2024.

QUEIROZ FILHO, A.C. *Do lúdico e do afetivo: corpo, sala de aula, cidade*. Vitória: Editora Rasuras, 2024

REIS, V. “Comecem a produzir floresta como subjetividade, como uma poética de vida”, diz Ailton Krenak. Instituto Humanitas Unisinos, 10 de dezembro de 2021. Disponível em <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/615157-comecem-a-produzir-floresta-como-subjetividade-como-uma-poetica-de-vida-diz-ailton-krenak>; acessado em 8 de junho de 2025.

RIBEIRO, A.; MIRANDA, E.; PESTANA, F.; MAUS, L.; MARINS, S.; SALES, T.A.; DIAS, S.O. *Morada Floresta*. Campinas: BCCL Unicamp, 2024

SALES, T.A.; DALMASO, A.C.; RIGUE, F.M. (orgs). *Dossiê Ciência.Vida.Educação*. ClimaCom Cultura Científica - Pesquisa, Jornalismo e Arte, número 23. Campinas: Labjor-Unicamp, 2023.

SANTOS, A.B. *A terra dá, a terra quer*. São Paulo: Unu, 2023.

SEABRA, O.C.L. *Os meandros dos rios nos meandros do poder: Tietê e Pinheiros - valorização dos rios e das várzeas na cidade de São Paulo*. 1987. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

STURGIS, P.; ALLUM, N. Science in society: Re-evaluating the deficit model of public attitudes. *Public Understanding of Science*, 13(1), 2004, 55–74.

- TADDEI, R. A comunicação social de informações sobre tempo e clima: o ponto de vista do usuário. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia (BSBMET)*, Ago-Dez., 2008, pp. 76-86
- TADDEI, R. Meteorologistas e profetas da chuva. Conhecimentos, práticas e políticas da atmosfera. São Paulo: Terceiro Nome, 2017.
- TADDEI, R. Intervention of Another Nature: Resources for Thinking in (and out of) the Anthropocene. In V. Grossman, C. Malterre-Barthes, and C. Miguel (eds.), *Everyday Matters: Contemporary Approaches to Architecture*. Berlin: Ruby Press, 2022, p. 125-141.
- TADDEI, R. O Antropoceno exige pensar o cuidado de novas formas. In: Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria-Executiva. Superintendência Estadual do Rio de Janeiro. (Org.). *Encontros de cultura e saúde: como a antropologia pode ajudar a pensar o SUS hoje*. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde, 2024, p. 79-91.
- TADDEI, R.; SHIRATORI, K; BULAMAH, R. Decolonizing the Anthropocene (wbiea2519). *The International Encyclopedia of Anthropology*, John Wiley & Sons, 2022.
- TSING, AL. Viver nas ruínas: paisagens multiespécies no Antropoceno. Thiago Mota Cardoso e Rafael Victorino Devos (orgs.). Brasília: IEB Mil Folhas, 2019.
- VERON, V.; KAYAPO, E.; FLORES, B.; VILHARVA, K. N.; WUNDER, A.; TADDEI, R.; DIAS, S.O. (orgs.). *Dossiê Territórios e Povos Indígenas*. Climacom Cultura Científica - Pesquisa, Jornalismo e Arte, número 26, 2024.
- VIDAL, E.; LOYOLA, M.I.; VIADA, M.M.; MINERVINI, M.A. Experiencias situadas en la enseñanza de la comunicación: el foco en el ambiente. *ClimaCom – Ciência.Vida.Educação*. [Online], Campinas, ano 10, n. 24, mai. 2023.
- WUNDER, A.; BANIWA, L.; TUKANO, N.; GUARANI, L. S.; MOURA, V.; WAURA, M. *Livros Vivos: palavras, imagens, plantas e gentes em criação*. CLIMACOM CULTURA CIENTÍFICA - PESQUISA, JORNALISMO E ARTE, v. 23, p. 1-16, 2022.
- WYNNE, B. Misunderstood misunderstanding: Social identities and public uptake of science. *Public Understanding of Science*, 1(3), 1992, 281–304.

## 4.6 Economia

### Introdução

Ao longo dos sete anos da Fase 2 do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (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. Sob a coordenação dos professores Eduardo A. Haddad, José G. Féres e Sergio Margulis, o grupo desenvolveu um conjunto robusto de ferramentas analíticas voltadas à avaliação dos impactos econômicos das mudanças climáticas.

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 capítulo 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.

Esses métodos possibilitaram análises robustas a partir de dados observados em contextos reais, permitindo a quantificação dos efeitos concretos de choques ambientais e políticas públicas. Ao identificar relações de causa e efeito com precisão, os estudos fornecem

subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas mais eficazes, especialmente em contextos marcados por incertezas e desigualdades regionais.

**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, entre essas iniciativas, incluindo internacionais, destacam-se diversos estudos -:

(i) **Marrocos:** (Haddad; El-Hattab; Ali, 2017) descrevem a construção de uma Matriz Inter-regional de Insumo-Produto (IIM-MOR) para o Marrocos, com o objetivo de calibrar um modelo de Equilíbrio Geral Computável Inter-regional (ICGE). Diante da escassez de dados regionais, foram empregadas técnicas como o método Chenery-Moses e o procedimento RAS, adaptadas da experiência brasileira. A análise revelou forte concentração da atividade econômica em regiões como Grand Casablanca-Settat e Rabat-Salé-Kénitra, destacando desigualdades estruturais e interdependências econômicas entre regiões. Os multiplicadores de produção e a decomposição da demanda final indicaram que algumas regiões são relativamente autossuficientes, enquanto outras dependem fortemente de demanda externa — seja de outras regiões do país, seja do comércio internacional.

(ii) **Angola:** (Haddad et al., 2020a) analisam a estrutura econômica inter-regional de Angola por meio de uma matriz Insumo-Produto inter-regional construída especificamente para esse fim. Os resultados mostram que a economia angolana é altamente dependente das exportações de petróleo e apresenta padrões de integração desigual. Províncias como

Cabinda, Zaire e Luanda estão fortemente conectadas ao comércio externo, enquanto outras áreas enfrentam sérias limitações de infraestrutura e baixa integração com o restante do país. O estudo revela que o valor adicionado nas exportações internacionais é mais que o dobro daquele gerado pelas trocas inter-regionais, evidenciando a urgência de políticas redistributivas e investimentos em infraestrutura para fortalecer a coesão econômica nacional.

(iii) **Brasil:** (Haddad; Gonçalves Júnior; Nascimento, 2017) apresentam a construção de uma matriz inter-regional de Insumo-Produto para os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, empregando o método IIOAS (*Interregional Input-Output Adjustment System*), desenvolvido em contextos de informação limitada. O estudo mostra que São Paulo e Rio de Janeiro são os estados mais autossuficientes, enquanto Roraima e Tocantins estão entre os menos integrados. Além disso, estados como Amazonas, Espírito Santo e Mato Grosso revelam elevada dependência da demanda proveniente de outras regiões ou do exterior. A análise dos multiplicadores de produção expõe padrões distintos de interdependência regional, reforçando a importância de considerar as relações interestaduais na formulação de políticas regionais e na promoção do desenvolvimento equilibrado do território nacional.

(iv) **México:** Em (Haddad et al., 2020b), os autores apresentam a primeira matriz Insumo-Produto interestadual do México, cobrindo 32 estados e 37 setores econômicos para o ano de 2013. Utilizando também o método IIOAS, a construção contornou limitações de dados por meio de uma abordagem híbrida, combinando dados oficiais do Instituto Nacional de Estatística e Geografia (INEGI) do México com métodos indiretos de estimação. A análise revelou heterogeneidades estruturais relevantes entre os estados mexicanos e diferentes graus de autossuficiência econômica. Os multiplicadores de produção mostraram que regiões como Nuevo León, Jalisco e Guanajuato possuem efeitos internos elevados, enquanto estados como Campeche e Zacatecas apresentam forte dependência inter-regional. Adicionalmente, a demanda final da Cidade do México, de Nuevo León e do exterior mostrou-se fundamental na geração de valor agregado nacional, com destaque para a contribuição do comércio internacional, que representou cerca de 27,55% da produção agregada.

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.

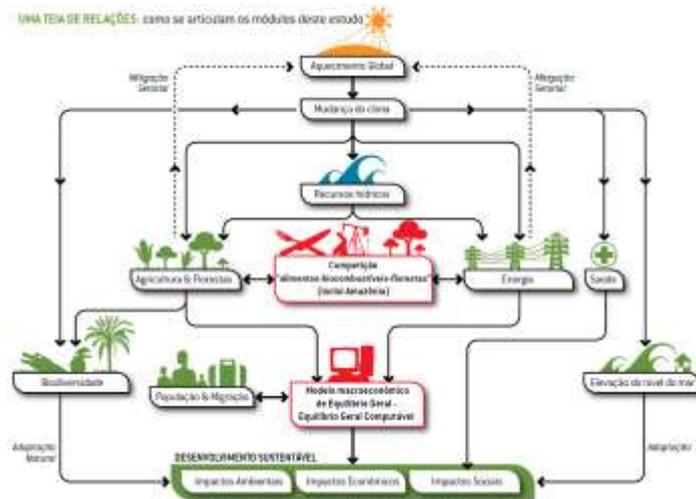


Figura 1: Teia de relações. Fonte: (Margulis; Schmidt; Marcovitch, 2010, p. 15).

A figura 1 esquematiza 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 em andamento**, 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.

Por fim, a pesquisadora Jaqueline C. Visentin realiza estágio de pós-doutorado (2024–2025) voltado à modelagem econômica de mecanismos de adaptação a anomalias hidrológicas, integrando modelos hidrológicos e econômicos com estratégias de seguros multianuais aplicadas às regiões hidrográficas brasileiras, em colaboração com

pesquisadores da economia e da contabilidade atuarial. 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 Azul<sup>4</sup> 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 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.

Essas iniciativas reforçam o caráter interdisciplinar e formador do componente de economia, ao mesmo tempo em que fortalecem sua capacidade de inovação metodológica e de resposta a temas emergentes na agenda climática nacional.

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:

(i) **23/06525-0 – Avaliação de impacto de eventos extremos: uma abordagem integrada com modelos de EGC e análise de risco:** Projeto de pós-doutorado que combinou modelos inter-regionais de Insumo-Produto com modelos de EGC, incorporando dados regionais e setoriais sobre destruição de infraestrutura e frequência de eventos extremos. A principal inovação foi a incorporação de incertezas associadas à análise de risco no modelo de EGC, permitindo simulações mais realistas e aplicáveis a políticas públicas.

(ii) **19/00057-9 – Sustentabilidade agrícola e agroindustrial no Chile: modelando os impactos de mudanças climáticas e de desastres naturais:** Focado na relação entre clima, agricultura e economia, este projeto implementou modelos econômicos integrados, envolvendo a construção de matrizes inter-regionais de Insumo-Produto, a calibração de modelos de EGC e a estimativa de modelos econométricos. A coleta e organização de dados exigiu conhecimento em programação, estatística e manipulação de grandes bases de dados.

(iii) **18/08833-5 – Urbanização e mudanças climáticas na Região Metropolitana de São Paulo:** Este projeto avaliou os impactos das mudanças climáticas em áreas urbanas, especialmente na Região Metropolitana de São Paulo. Combinando componentes econômicos e hidrológicos, os modelos identificaram setores e grupos vulneráveis, subsidiando propostas para políticas de adaptação e gestão urbana sustentável.

(iv) **18/16312-5 – Acessibilidade à água e produção agropecuária no semiárido brasileiro:** A pesquisa analisou os efeitos da escassez hídrica sobre a produtividade agrícola no semiárido, propondo um Índice de Acessibilidade à Água e aplicando

---

<sup>4</sup> Água doce disponível em corpos hídricos superficiais e subterrâneos (Hoekstra et al., 2011).

modelagem espacial com base em dados oficiais, com foco na superação de vulnerabilidades regionais.

(v) **17/16866-8 – *The economics of low carbon markets***: Projeto internacional dedicado à análise de mercados de baixo carbono e políticas de mitigação. A iniciativa fortaleceu parcerias com pesquisadores do Chile, contribuindo para a construção de uma rede regional voltada à sustentabilidade agroindustrial.

(vi) **18/08337-8 – Sustentabilidade agrícola e agroindustrial no Chile**: Complementar ao projeto anterior, este estudo adaptou metodologias desenvolvidas no Brasil para o contexto chileno, analisando os impactos climáticos sobre a agricultura, a segurança alimentar e a sustentabilidade de cadeias produtivas estratégicas.

Por sua vez, esses projetos ampliaram significativamente o escopo analítico do componente de economia, fortalecendo sua capacidade de resposta a temas emergentes e promovendo a formação de novos pesquisadores. Além disso, contribuíram para consolidar uma rede internacional de excelência científica voltada à economia das mudanças climáticas, com forte interface entre teoria, dados e políticas públicas.

### **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* (B MARIA-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-UFGM, 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.

Esses exemplos ilustram a diversidade de aplicações e a profundidade analítica alcançada pelo componente de economia do INCT-MC2, reafirmando seu papel como plataforma de excelência científica, inovação metodológica e contribuição efetiva à formulação de políticas públicas frente aos desafios climáticos contemporâneos.

## 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-RCP8.5<sup>5</sup>), 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.

---

<sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup> até 2100 e concentração de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub> equivalente) chegando a aproximadamente 1370 ppm, pressupondo crescimento contínuo das emissões e poucos esforços para reduzi-las (Haddad et al., 2025).

Essas experiências destacam não apenas a capacidade de mensuração dos impactos econômicos de desastres, mas também os limites atuais para viabilizar respostas financeiras eficazes. Como observado nos estudos, embora os impactos econômicos sejam calculáveis, a engenharia financeira necessária para o financiamento climático ainda é incipiente. Viabilizar esse tipo de resposta requer esforços adicionais em pesquisa e colaboração com especialistas em finanças públicas, bancos multilaterais e mecanismos internacionais de apoio à resiliência.

## **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.

(iii) **Produtividade urbana e choques climáticos: efeitos das ondas de calor sobre o trabalho urbano:** O estudo de (Oliveira; Palialol; 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-Christofoletti; 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.

## Referências bibliográficas

ARAÚJO, Cláudio; FÉRES, José Gustavo. Passando a boiada: efeitos da suspensão da inspeção de exportações de produtos de madeira nativa. Radar: tecnologia, produção e comércio exterior: n. 75.: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 29 abr. 2024.

ELSHAHAWANY, Dina N.; HADDAD, Eduardo A.; LAHR, Michael L. Accessibility, transportation cost and regional growth: a case study for Egypt. Giza, Egypt: 2016. Disponível em: <[www.erf.org.eg](http://www.erf.org.eg)>.

HADDAD, Eduardo A. Trade and Interdependence in Lebanon: An Interregional Input-Output Perspective. *Journal of Development and Economic Policies*, v. 16, n. 1, p. 5–45, 2014.

HADDAD, Eduardo A. et al. The economic impacts of flooding in Egyptian port cities. 2025.

HADDAD, Eduardo A. et al. Assessing the economic impacts of Al-Haouz earthquake: damages and recovery strategy. 2024a.

HADDAD, Eduardo A. et al. Economic impacts of the 2023 earthquake in Morocco. 2024b.

HADDAD, Eduardo A. et al. Economic drivers of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. *Nature Sustainability*, 1 set. 2024c.

HADDAD, Eduardo A. et al. Uneven integration: the case of Angola. 2020a. Disponível em: <[www.policycenter.ma](http://www.policycenter.ma)>.

HADDAD, Eduardo A. et al. Interstate input-output model for Mexico, 2013. *Análisis Económico*, n. 90, p. 7–43, 2020b.

HADDAD, Eduardo A. et al. Interregional Input-Output Matrix for Colombia, 2012\*. Bogotá: 2016.

HADDAD, Eduardo A.; ARAÚJO, Inácio F. Shades of blue: the regional structure of the ocean economy in Brazil. *npj Ocean Sustainability*, v. 4, n. 1, p. 15, 23 abr. 2025.

HADDAD, Eduardo Amaral; BONET, Jaime; HEWINGS, Geoffrey J. D. *The Colombian Economy and Its Regional Structural Challenges: A Linkages Approach.*: Springer, 2023.

HADDAD, Eduardo Amaral; EL-HATTAB, Fatna; ALI, Abdelaziz Ait. A practitioner's guide for building the Interregional Input-Output System for Morocco, 2013. 2017.

HADDAD, Eduardo Amaral; GONÇALVES JÚNIOR, Carlos Alberto; NASCIMENTO, Thiago Oliveira. Matriz Interestadual de Insumo-Produto para o Brasil: uma aplicação do método IIOAS\*. *Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos*. 2017. Disponível em: <<http://www.revistaaber.org.br>>.

HOEKSTRA et al. *The Water Footprint assessment manual*. London; Washington, DC: 2011. Disponível em: <[www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk)>.

LEÓN, J. A. et al. Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

MARGULIS, Sergio; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt (ed.). *Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades*. Coord. geral: Jacques Marcovitch. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. 82 p. Disponível em: <http://www.economiadoclima.org.br>.

MOHOR, Guilherme Samprogná; MENDIONDO, Eduardo Mario. Economic indicators of hydrologic drought insurance under water demand and climate change scenarios in a Brazilian context. *Ecological Economics*, v. 140, p. 66–78, 1 out. 2017.

MOZ-CHRISTOFOLLETTI, Maria Alice; PEREDA, Paula Carvalho. Distributional welfare and emission effects of energy tax policies in Brazil. *Energy Economics*, v. 104, 1 dez. 2021.

OLIVEIRA, Jaqueline; PALIALOL, Bruno; PEREDA, Paula. Do temperature shocks affect non-agriculture wages in Brazil? Evidence from individual-level panel data. *Environment and Development Economics*, v. 26, n. 5–6, p. 450–465, 5 out. 2021.

ROCHA, Ademir Antônio Moreira. *Climate Change, Water Resources and Economic Impacts: An Analysis of Brazilian Hydrographic Regions*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021.

RODRIGUES, Loredany C. C.; FÉRES, José Gustavo; COELHO, Alexandre Bragança. Pesticide use in Brazil: virtuous or vicious cycle? In: 51o ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA (ANPEC) (org.). Rio de Janeiro: 2023.

RUGGIERO, P. G. C. et al. The Brazilian intergovernmental fiscal transfer for conservation: A successful but self-limiting incentive program. *Ecological Economics*, v. 191, 1 jan. 2022.

SIMÕES, Marcelo Previato. Avaliação do impacto sistêmico da perda de produtividade agrícola no Rio Grande do Sul via Insumo-Produto e Equilíbrio Geral Computável: Universidade de São Paulo, 2025.

SOUZA, Bruno; HADDAD, Eduardo. Climate change in Brazil: dealing with uncertainty in agricultural productivity models and the implications for economy-wide impacts. *Spatial Economic Analysis*, v. 17, n. 1, p. 83–100, 2022.

VIEIRA, Renato S.; HADDAD, Eduardo A. A weighted travel time index based on data from Uber Movement. *EPJ Data Science*, v. 9, n. 1, 1 dez. 2020.

VISENTIN et al. Insurance for adaptation to hydrological anomalies: analysis using Computable General Equilibrium Models for Brazilian hydrographic regions: INCT para Mudanças Climáticas Fase 2. Conferência de resultados. Caderno de resumos, 2025.

ZHOU, Lei; CHEN, Zhenhua. Are CGE models reliable for disaster impact analyses? *Economic Systems Research*, v. 33, n. 1, p. 20–46, 2021.

## 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, de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 1). Este fluxograma é referente ao subcomponente segurança alimentar do INCT Fase 2 .

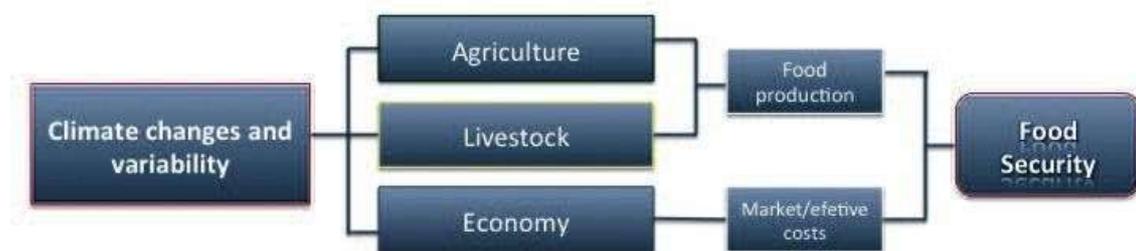


Figura 1. Fluxograma da subcomponente da segurança alimentar

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

As questões relacionadas com a segurança alimentar e as alterações climáticas têm sido cada vez mais debatidas e analisadas por investigadores de diferentes áreas do conhecimento. Estas duas questões representam importantes desafios para a população mundial e envolvem diretamente o setor agrícola e as suas relações com outros setores econômicos. Como a demanda por produtos agrícolas crescerá com o aumento da população e da renda nas próximas décadas, ações setoriais podem contribuir

significativamente para as metas internacionais de redução e estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Especificamente, é consenso que, por meio de uma gestão adequada e de uma agricultura regional, práticas alternativas no setor de agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use) podem contribuir grandemente para mitigar as emissões de GEE.

Os sistemas produtivos baseados na intensificação sustentável da produção agrícola passam necessariamente por uma abordagem integrada entre as alterações climáticas, as ações de adaptação e a 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<sub>o</sub> em mm), precipitação (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), radiação solar (kWh/dia/m<sup>2</sup>), 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.



Figura 2: Pontos de obtenção de dados climáticos estimados, geo-referenciados, do modelo Hadgem2 (+) e obtidas da base de dados *Daily gridded meteorological variables in Brazil* (XAVIER et al , 2016).

Essas duas bases de dados, Xavier e HADGEM2-ES, foram comparadas com os dados climatológicos medidos através do método de Kolgomorov-Smirnov (K-S) que atesta o grau de concordância entre os dados medidos e os dados observados (Figura 3).

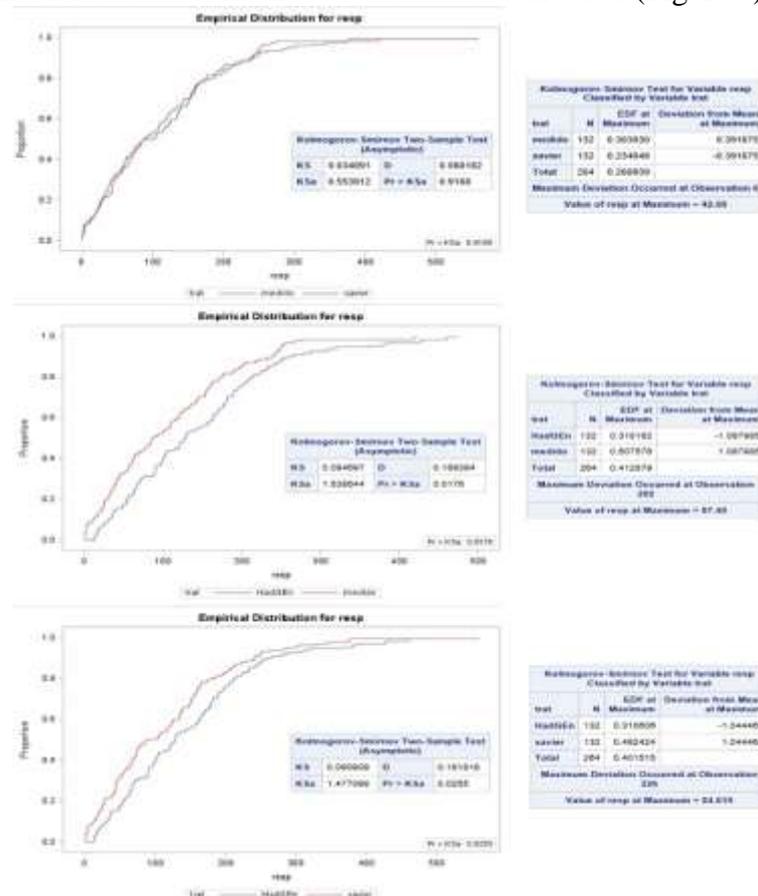


Figura 3: Teste de concordância K-S no sistema SAS

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).

O balanço hídrico foi estimado conforme o esquema ilustrado na figura45

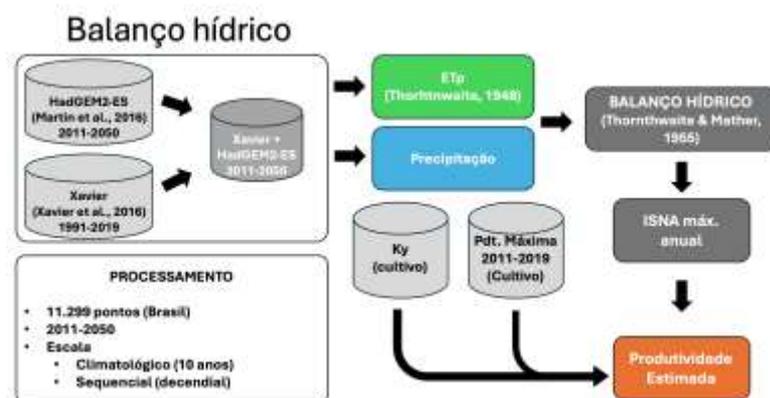


Figura 4 Esquema de simulação do Balanço hídrico para estimativa de variáveis meteorológicas e posteriormente utilizados na estimativa da produtividade.

A partir dos resultados do balanço hídrico, foram obtidos os mapas de deficiência hídrica (Figura 5), 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.

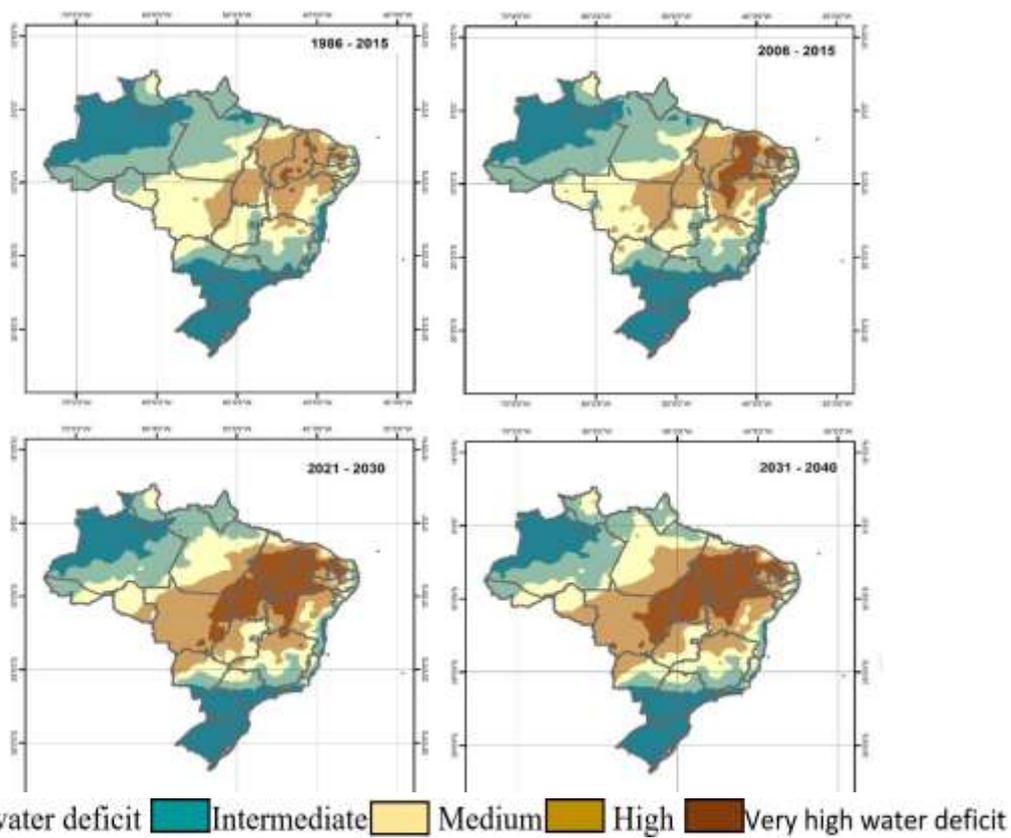


Figura 5: Mapas de deficiência hídrica para os períodos 1986-2015, 2006-2015, 2021-2030 e 2030-2040.

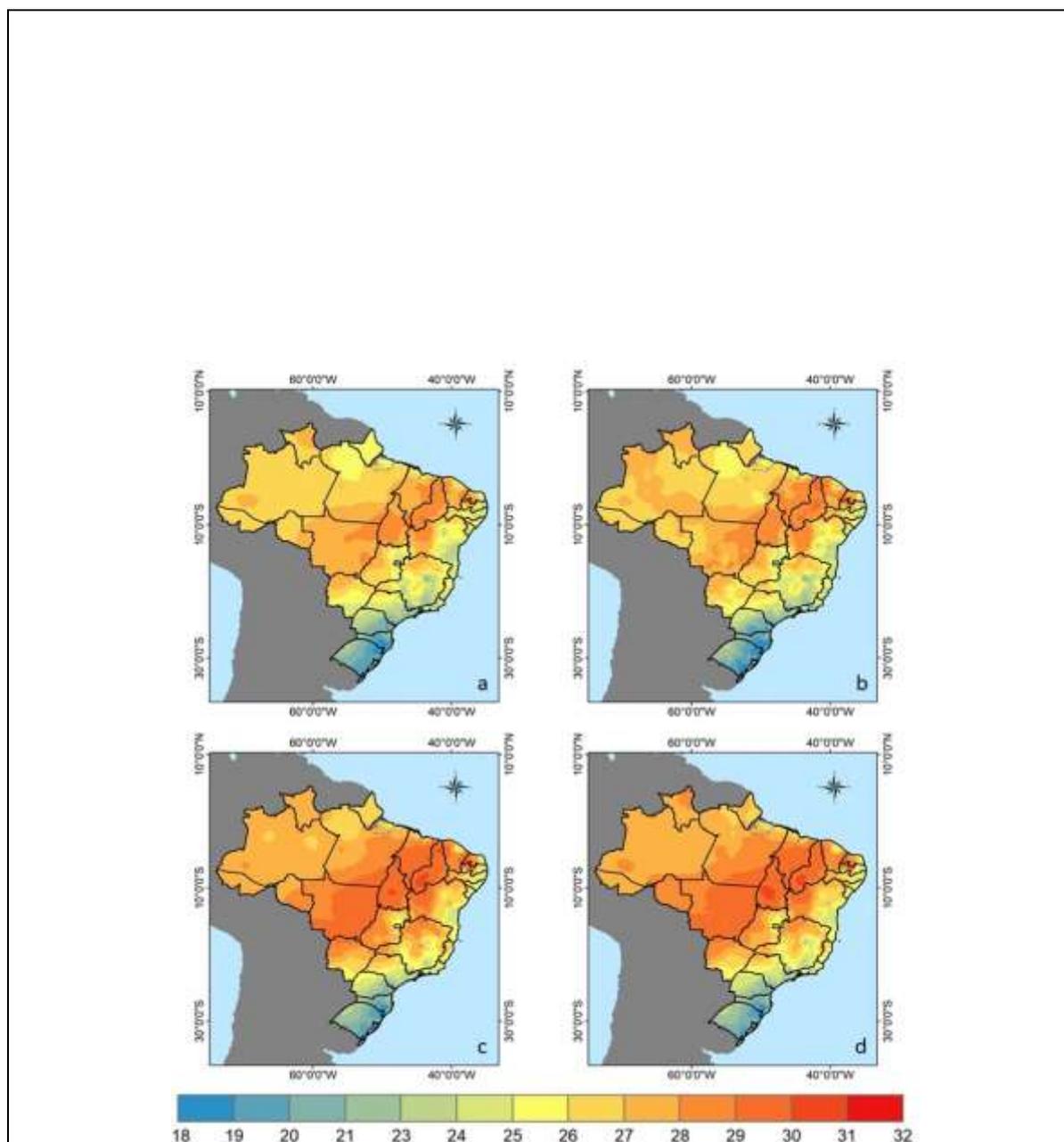
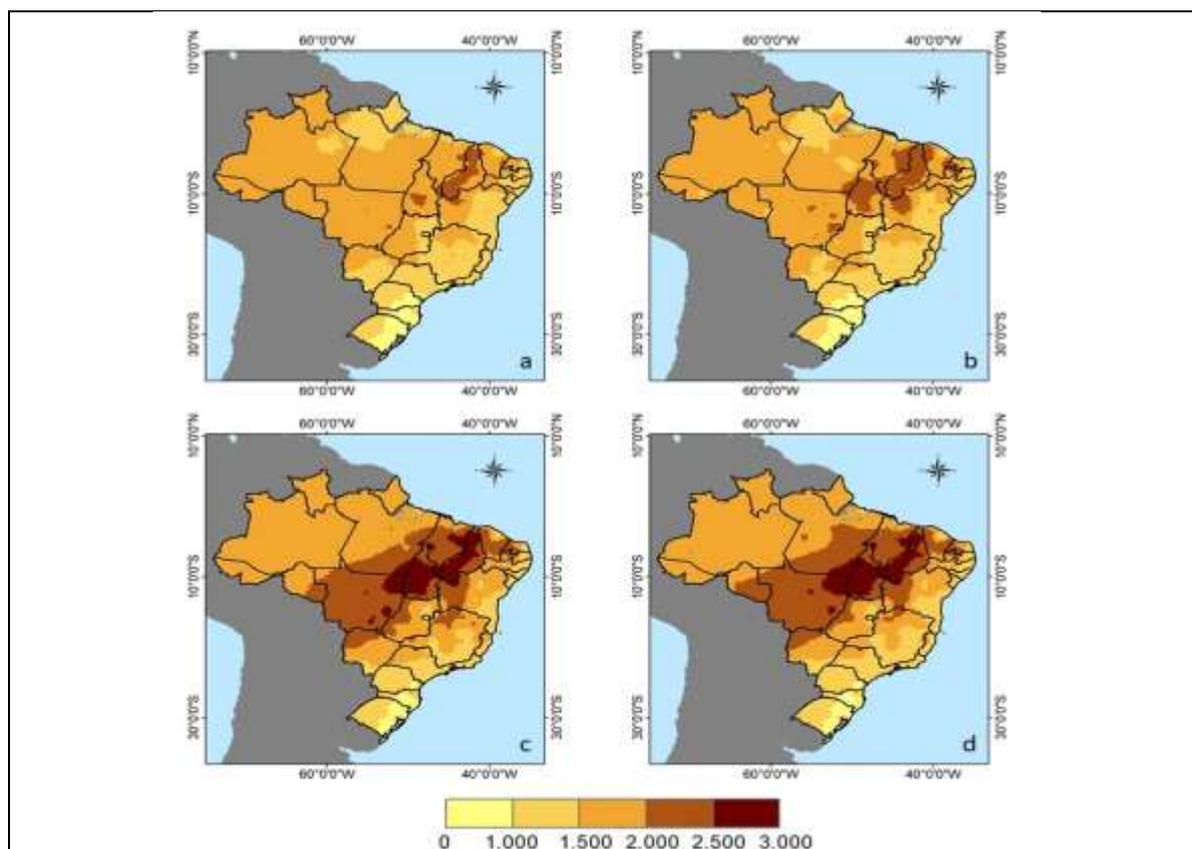


Figura 7: Mapas de temperatura, obtidos a partir dos dados dos modelos HADGEM2 e *Daily gridded meteorological variables in Brazil* para os períodos 1986-2015, 2006-2015, 2021-2030 e 2030-2040

A evapotranspiração na média climática varia de 801 mm a 2.287 mm no Brasil, sendo a ETP total máxima de 2.465 mm, 2.901 mm e 2.877 mm para as séries históricas 2006-2015, 2021-2030 e 2031-2040, respectivamente. Enquanto a mínima é de 749 mm para 2006-2015 e manteve-se no índice de 826 mm para 2021-2030 e 2031-2040 na média para todo território (figura 8).



**Figura 8:** Evapotranspiração total (a) 1986 - 2016; (b) 2006-2015; (c) 2021-2030; (d) 2031-2040.

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

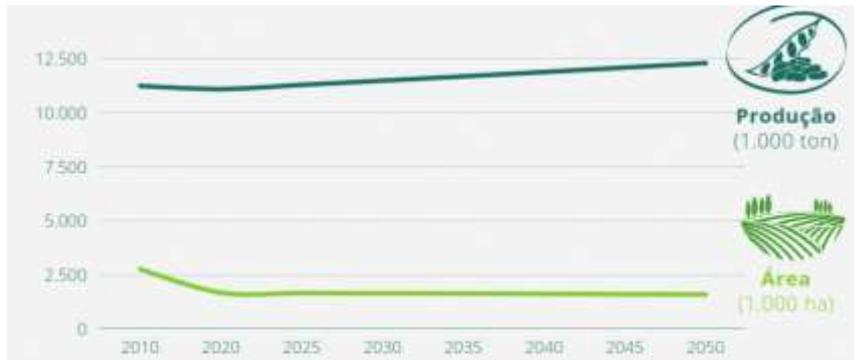
### **Projeção da produção das culturas de arroz, feijão, trigo e mandioca**

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. Na figura 8 está ilustrada a evolução da produção de arroz até o ano de 2050.

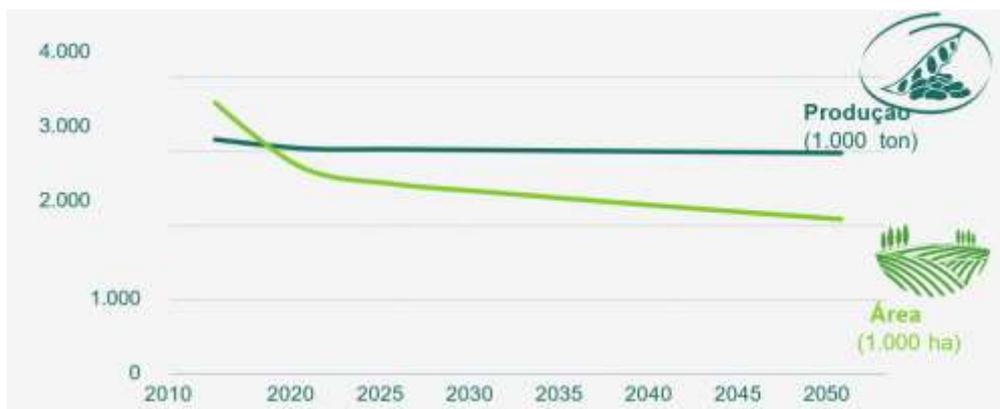


**Figura 8.** Evolução da produção de arroz até o ano de 2050.  
Fonte: IBGE, Pesquisa Agrícola Municipal até 2020.

### 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. Na figura 9 está indicada a evolução da produção de feijão para o Brasil até o ano de 2050.



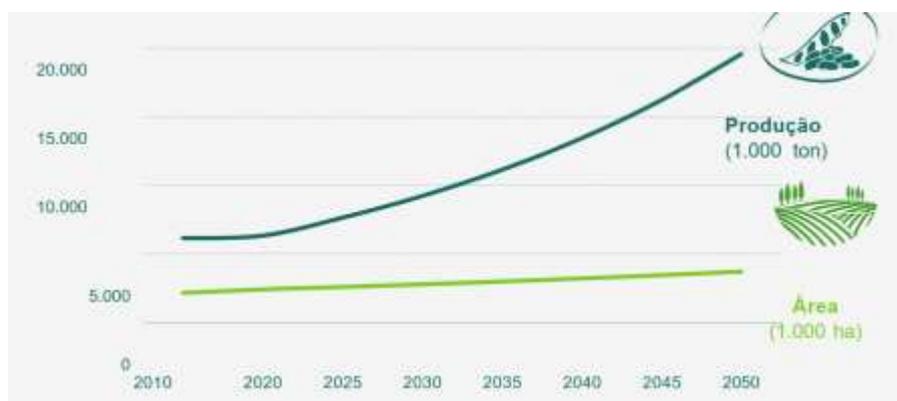
**Figura 9:** evolução da produção de feijão no Brasil até o ano de 2050.  
Fonte: IBGE, Pesquisa Agrícola Municipal até 2020.

### 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. Na figura 10 está indicada a evolução da oferta de trigo no Brasil até o ano de 2050. Portanto, em função da conjuntura nacional e internacional, o trigo é uma cultura cuja projeção indica um aumento da oferta de grãos.



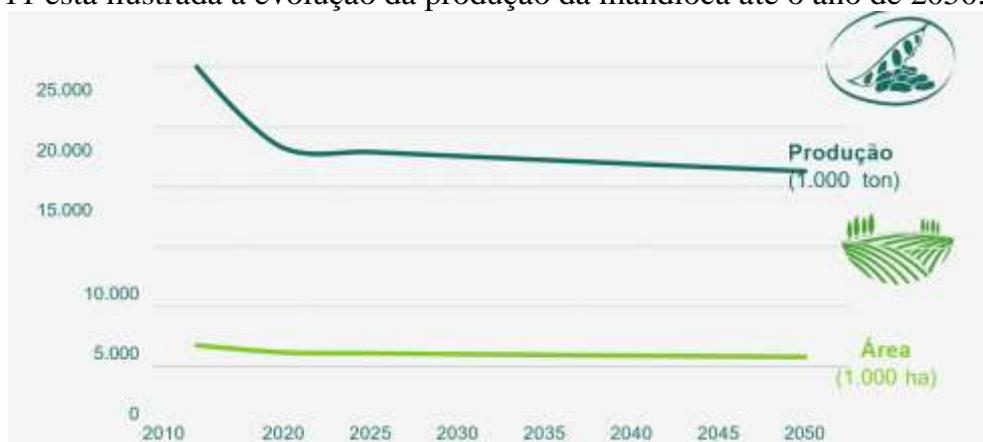
**Figura 10.** Evolução da oferta de trigo até o ano de 2050.

**Fonte:** IBGE, Pesquisa Agrícola Municipal até 2020.

### Mandioca

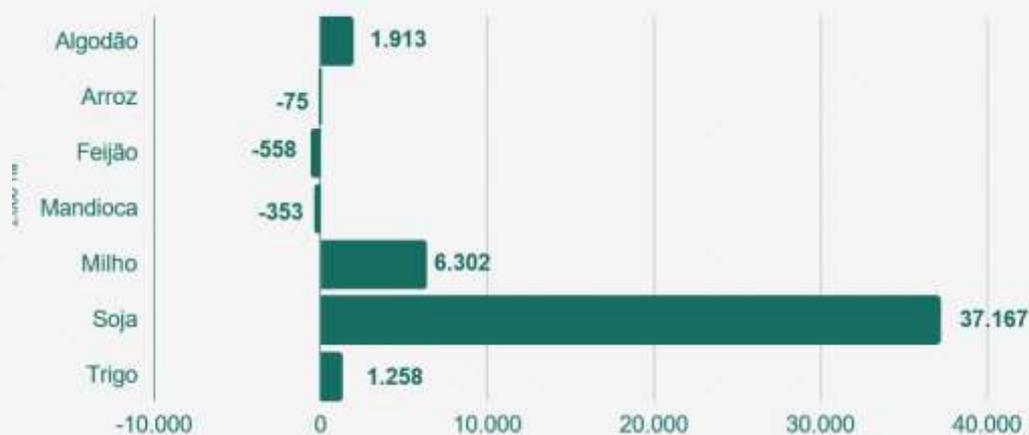
A produção de mandioca em 2020 foi de aproximadamente 18 milhões de toneladas em 1,2 milhão de hectares. A mandioca é amplamente utilizada no dia a dia do brasileiro; contudo os dados históricos mostram que a produção vem perdendo espaço na competição pelo uso do solo com outras culturas. Diversos fatores 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. Na figura 11 está ilustrada a evolução da produção da mandioca até o ano de 2050.



**Figura 11.** Evolução da produção de mandioca até o ano de 2050. Fonte: IBGE 2020

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.



**Figura 12:** Variação da área plantada para várias culturas do Brasil entre os anos de 2021 e 2050. As culturas de feijão, arroz e mandioca apresentam uma diminuição da área plantada enquanto soja e milho apresentam um aumento na área plantada..

As projeções da produção e da área das principais culturas mostram que a área plantada no Brasil deve ultrapassar 100 milhões de hectares em 2050. 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. A tabela 1 mostra a 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.

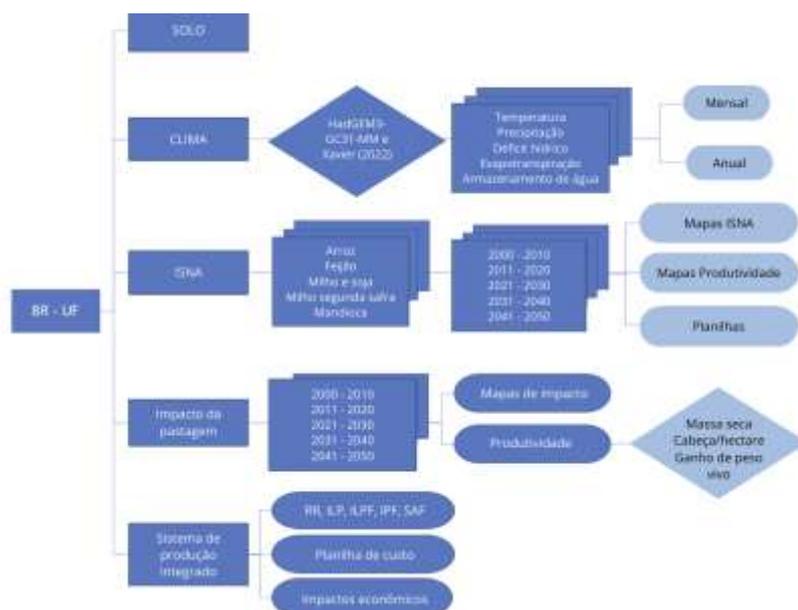
**Tabela 1.** Consumo *per capita* de quatro itens da cesta básica nos últimos 35 anos, em kg/habitante.

	<b>Arroz</b>	<b>Feijão</b>	<b>Mandioca</b>	<b>Trigo</b>
1985	<b>67</b>	<b>19</b>	<b>171</b>	<b>32</b>
1990	<b>74</b>	<b>16</b>	<b>159</b>	<b>37</b>
1995	<b>65</b>	<b>21</b>	<b>151</b>	<b>13</b>
2000	<b>67</b>	<b>16</b>	<b>120</b>	<b>14</b>
2005	<b>71</b>	<b>16</b>	<b>129</b>	<b>31</b>
2010	<b>65</b>	<b>18</b>	<b>125</b>	<b>31</b>
2015	<b>60</b>	<b>16</b>	<b>114</b>	<b>26</b>
2020	<b>49</b>	<b>14</b>	<b>83</b>	<b>26</b>

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). Na figura 13 é indicado o esquema de estimativa de produtividade das culturas.



**Figura 13.** Esquema adotado para estimar a produtividade das culturas até 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 mecanístico 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
- K<sub>y</sub> = coeficiente de ajuste.

No caso do K<sub>y</sub>, como estamos trabalhando no Brasil todo, inicialmente vamos utilizar K<sub>y</sub>=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 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

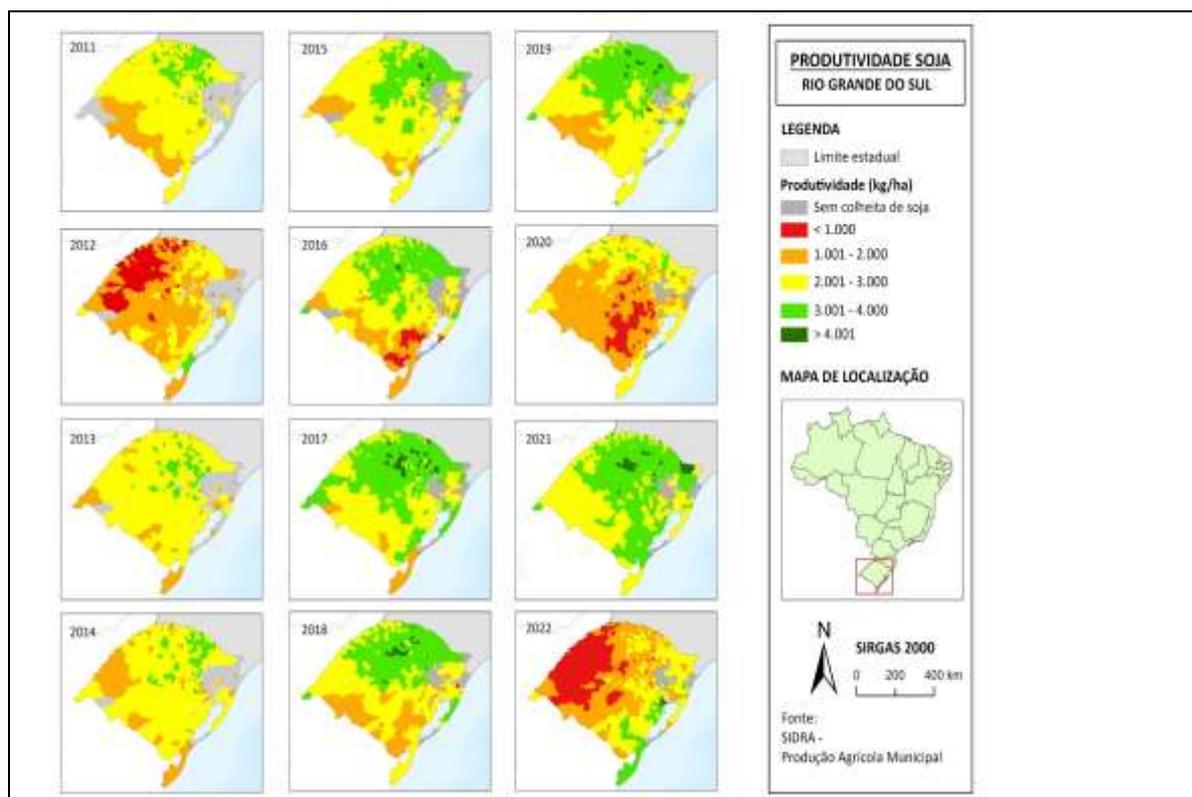
estão estas culturas se a temperatura continuar subindo nas atuais taxas (0,3°C) por década. Ao mesmo tempo, foi feito um esforço de caracterizar os eventos extremos que vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos. Projeções para os próximos anos referentes à frequência de ocorrência de temperaturas 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 manteve as tendências de perdas acentuadas na agricultura, que segundo a CONAB seguiram um padrão de 15% de perdas na safra.

No relatório do INCT – 2021, referente ao componente segurança alimentar, com a avaliação dos resultados com o modelo HadGEM3-GC31-MM, os resultados parecem mais pessimistas do que os do modelo CIMIP5 HADgem2-ES. As perdas de rendimento foram maiores do que as obtidas no modelo anterior.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos com o modelo HadGEM3-GC31-MM do CIMIP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050. No caso da soja nos cerrados a perda estimada na produtividade é de 26% no período.

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 (N<sub>2</sub>O), 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.



**Figura 14.** Variação espacial das perdas de produtividade no Rio Grande do Sul, no período de 2010 a 2022.  
**Fonte:** Assad & Lopes-Assad (2024).



**MODELO: HADGEM3 - GC - CMIP 6 - RCP SSP 285**

**Produtividade (kg/ha)**

<b>Bioma</b>	<b>Cultura</b>	<b>2011/2020</b>	<b>2021/2030</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença (%)</b>	<b>2031/2040</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença (%)</b>	<b>2041/2050</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>Amazônia</b>	Soja	3.078	2.456	623	20	2.504	574	19	2.562	516	17
	Milho	2.543	2.795	252	10	3.597	1.054	41	2.867	324	13
	Arroz	1.917	1.907	10	1	1.825	92	5	1.766	151	8
	Feijão	678	679	2	0	672	6	1	660	18	3
<b>Cerrado</b>	Soja	3.244	2.399	845	26	2.277	967	30	2.486	758	23
	Milho	4.331	4.879	548	13	6.964	2.633	61	5.227	896	21
	Arroz	2.105	1.867	238	11	2.083	21	1	1.897	207	10
	Feijão	1.179	1.077	103	9	1.210	30	3	1.166	14	1
<b>Floresta Atlântica</b>	Soja	3.349	3.524	175	5	3.523	174	5	3.702	353	11
	Milho	4.818	5.329	510	11	6.176	1.358	28	5.608	790	16
	Arroz	3.542	3.433	109	3	3.708	166	5	3.513	29	1
	Feijão	1.171	1.112	58	5	1.193	22	2	1.178	7	1
<b>Pampa</b>	Soja	2.458	2.845	87	16	2.819	361	15	2.998	540	22
	Milho	3.812	3.756	56	1	3.314	498	13	3.936	124	3
	Arroz	7.337	7.337	-	-	7.337	-	-	7.337	-	-
	Feijão	1.030	1.030	-	-	1.030	-	-	1.030	-	-
<b>Caatinga</b>	Soja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Milho	660	722	62	9	925	265	40	716	56	8
	Arroz	1.604	1.819	215	13	1.879	75	17	1.899	295	18
	Feijão	321	344	23	7	374	53	16	374	53	16

**Tabela 2:** Resultados obtidos com o modelo HadGEM3-GC31-MM do CIMP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050.

## **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)<sup>1</sup>, produzindo 8 milhões de toneladas de carne (IBGE, 2024)<sup>2</sup>. Deste total, 2,9 milhões de toneladas foram exportadas, representando 22,9% das exportações mundiais (FAO, 2023)<sup>3</sup>. 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.

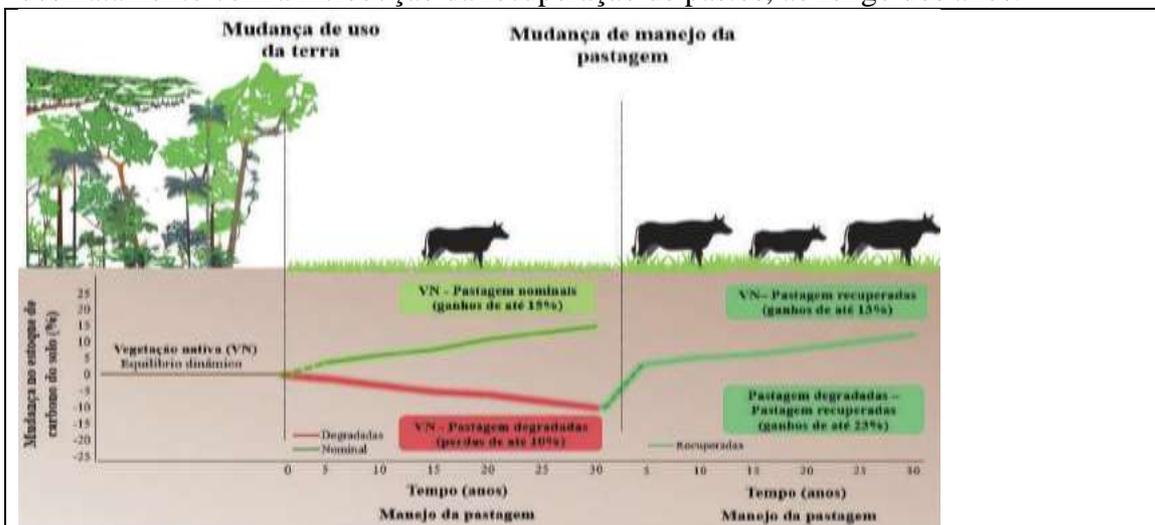
O bioma Cerrado é um bom exemplo de possível adoção dos sistemas integrados. No início da ocupação do Cerrado brasileiro, com a introdução do plantio da soja, as cultivares eram de ciclo longo com produtividade em torno de 1,7 toneladas por hectare (Arantes e Souza, 1993). Atualmente a produtividade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

O exemplo acima pode ser ilustrado pela Figura 15 que mostra como funciona o manejo de culturas em áreas com pastos degradados. No caso do Mato Grosso, a média de produtividade em sistemas integrados pode chegar a 9,5 toneladas de grãos/ha, com uma remoção média de 1.3 t C/ha/ano.



**Figura 15.** Evolução dos sistemas de produção solteiro para sistemas integrados. **Fonte:** Vilela, 2019. CBAGRO

A Figura 16 indica como é o ciclo da emissão/remoção de carbono após o desmatamento com a introdução da recuperação de pastos, ao longo dos anos.



**Figura 16.** Ciclo das emissões e remoções após o desmatamento e com a adoção do manejo de pastos recuperados. Ilustração de Bruna E. Schiebelbein. **Fonte:** Ruiz et al. (ANO??), Cherubin et al. (2023).

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

O ciclo soja+milho não fixa carbono, mas ao introduzir o pasto no sistema ao longo dos anos há um ganho importante de matéria orgânica no solo, e conseqüentemente de carbono orgânico, como indicado na Figura 16.



**Figura 16.** Variação do teor de matéria orgânica no solo em sistemas de rotação contínua de soja e milho, pasto depois de lavoura e lavoura depois de pasto. **Fonte:** Sousa et al. (1997).

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

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

Neste caso foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados com prioritários para recuperação em três níveis: Municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados, até 45 mil e até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF (Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta). Na figura 18, estão identificados os municípios que devem ser priorizados e sua distribuição geográfica.



**Figura 18.** Municípios identificados com maior aptidão para implantação de ILPF em pastos degradados.

Isso corresponde à redução pela pecuária de 11,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, sem considerar as remoções.

### Considerações finais

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

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

Num segundo momento, a partir dos estudos desenvolvidos 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.

### **Referências bibliográficas**

ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C.; BELTRAO, N.E.D.M.; PINTO, H.S. (2013). Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, p. 48: 1– 8. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100001>

ASSAD, E. D. et al. (2016) Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira as mudanças climáticas . *Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança clima no Brasil*, v.4, p.127-88.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. (2008). *Aquecimento Global e a Nova Geografia da produção Agrícola no Brasil*. Brasília: Embaixada Britânica, v.1. 82p.

ASSAD, E.D.; LOPES-ASSAD, M.L. (2024) Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. *Desafios e oportunidades*. *USP Estudos avançados* 38 (112), 2024

BRASIL (2016). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Sumário Executivo/ Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação*. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 45 p.

CONTAG, Observatório do Clima. (2025). *Agricultura familiar e os sistemas alimentar remoção de carbono e transição justa São José dos Pinhais, PR*. Seven Editora. 50p DOI: 10.56238/livrosindi202507-001

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I. WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G.; FERREIRA, E. *Classificação e tendências em Lavras, MG*. (2007). *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.31, n.6, p.1862-1866. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. (1979). *Yield response to water*. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*. Rome, FAO.

GONDIM, R. S.; FUCK JÚNIOR, S. C. de F.; EVANGELISTA, S. R. M.; CASTRO, M. A. H. de; TEIXEIRA, A. dos S. (2011). *Impacto das mudanças climáticas na*

evapotranspiração em nível de Bacia Hidrográfica utilizando um Sistema de Informações Geográficas.

IBGE-Pesquisa Agropecuária Municipal 2022. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>

LIDDICOAT, S.; JONES, C.; ROBERTSON, E. CO<sub>2</sub> Emissions Determined by HadGEM2-ES to be Compatible with the Representative Concentration Pathway Scenarios and Their Extensions. *Journal of Climate*, 26(13), 4381–4397. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00569.1>

MARCOS JUNIOR et al. (2018). Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5 Rev. bras. meteorol. 33 (4) • Oct-Dec 2018 • <https://doi.org/10.1590/0102-7786334007>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (2024). Conversão de pastagens degradadas em sistemas de produção agropecuários e florestas sustentáveis. Plano de priorização de áreas e estimativa de investimentos. GPP (Grupo de Políticas Públicas - Esalq/USP) Deflo/SDI/Mapa (Departamento de Reflorestamento e Recuperação de Áreas Degradadas Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo do Ministério da Agricultura e Pecuária). Brasília, 294 P.

MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T.J.; JONES, C.D.; MCDONALD, R.E.; MCLAREN, A.J.; O'CONNOR, F.M.; ROBERTS, M.J.; RODRIGUEZ, J.M.; WOODWARD, S.; BEST, M.J.; BROOKS, M.E.; BROWN, A.R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S.H.; DHARSSI, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J.M.; FALLOON, P.D.; GEDNEY, N.; GRAY, L.J.; HEWITT, H.T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M.R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W.J.; JAMES, P.M.; JOHNS, T.C.; JOHNSON, C.E.; JONES, A.; JONES, C.P.; JOSHI, M.M.; KEEN, A.B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A.P.; MAIDENS, A.V.; MANNERS, J.C.; MILTON, S.F.; RAE, J.G.L.; RIDLEY, J.K.; SELLAR, A.; SENIOR, C.A.; TOTTERDELL, I.J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P.L.; WILTSHIRE, A. (2011) The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geosci Model Dev* 4(3):723–757. doi: 10.5194/gmd-4-723-2011, 2011

PONPANG-NGA, P.; TECHAMAHASARANONT, J. Effects of climate and land use changes on water balance in upstream in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Agric. Nat. Resour.* 2016, 50, 310–320.

RUIZ, Francisco et al. **Constructing soils for climate-smart mining**. *Communications Earth & Environment*, v. 4, p. 1-6, 2023 Tradução . . Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00862-x>. Acesso em: 26 maio 2024.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Publications in Climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p

SOUSA, D. M. G. de; VILELA, L.; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistemas de cultivo em um latossolo de Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. Informação, globalização, uso do solo Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

TORRES, ROGER RODRIGUE. ANÁLISE DE INCERTEZAS EM PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMÉRICA DO SUL. 2014. 271f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2014.

VILELA, L. 2019. XXI CBAGRO, Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. MCTI-2020- Quarto Inventário Nacional de Emissões e remoções antrópicas de Gases de efeito estufa.

XAVIER, A.C., SCANLON, B.R. AND KING, C.W. (2016). Conjunto de dados de variáveis meteorológicas diárias no Brasil (1980-2013). CLIMA Policy Brief #2, Centro Clima/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 4 p.

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, v.42, n.16, p.8390-404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731> 2022.

#### **4.8 Segurança hídrica**

Os resultados alcançados pela Subcomponente de Segurança Hídrica do INCTMC2 durante o período 2017-2025 (Figura 1) são relacionados com a promoção e atualização dos respectivos objetivos e metas (ver Tabela S.1 e Tabela S.2, do Material Complementar), 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 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,
- (7) Alianças nacionais e internacionais para pesquisas relevantes para políticas públicas com impactos locais (Figura 2).

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”, explicados à continuação.

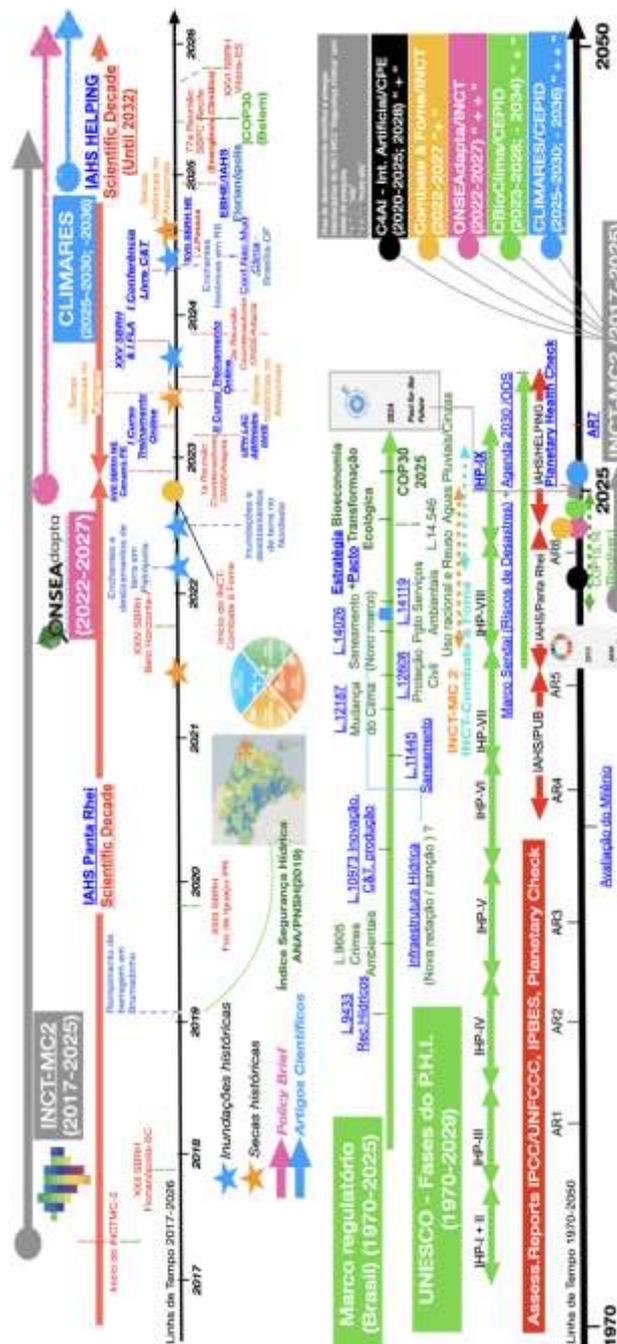


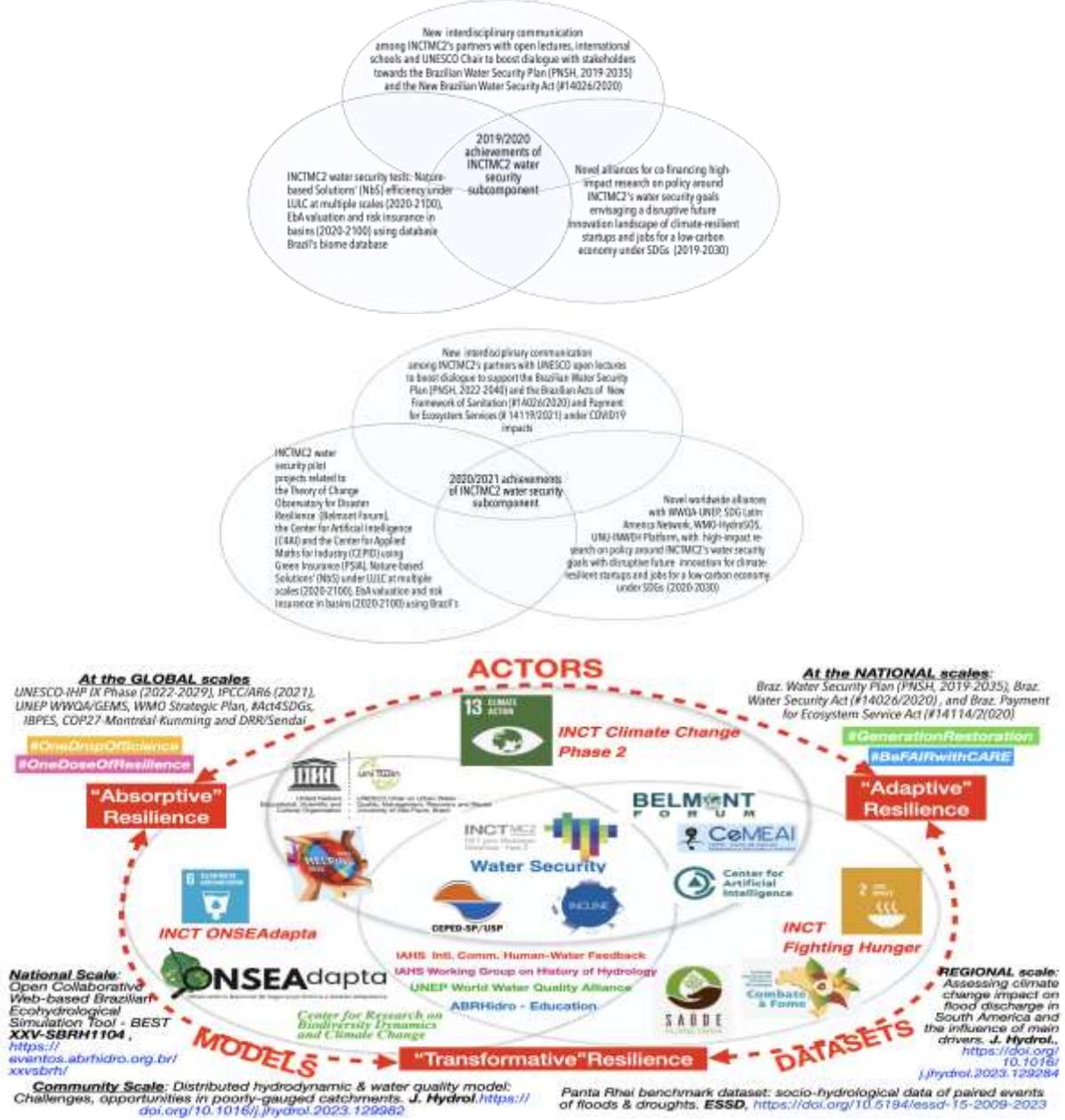
Figura 1- Linha temporal de Segurança Hídrica do INCTMC2(2017-2025, parte superior) com contexto global (1970-2050, parte inferior)

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 ([C4AI](#)), 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 WEF 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 (ver Seções 3 e 4 deste Capítulo).

Figura 2- A transformação interdisciplinar da subcomponente de Segurança Hídrica do INCTMC2 em quatro momentos: 2019/2020 (superior esquerda), 2020/2021 (superior direita), 2022/2023 (centro), 2024/2025 (abaixo). Relatórios e detalhes em: <http://inctmc2.cemaden.gov.br/>. Explicações e exemplos nas seções 3 e 4 deste capítulo





## Resumo de resultados sobre Avaliações Tradicionais de Segurança Hídrica

Na Figura 1 e na Figura 2, aparecem resultados de Segurança Hídrica relacionados com índices globais-regionais, mecanismos de adaptação local e métodos científicos:

- **Índices:** Contribuições Nacionais (NDC, UNFCCC), Nature's Contribution to People (NCP, CDB & IPBES), e "Digital Sequence Information" (DSI, CBD) para Capital Natural.
- **Mecanismos:** "Enhanced Transparency Framework" (ETF), post-Paris 2015/UNFCCC, "Monitoring, Report & Verification" (MRV, UNFCCC) de GEE, "Global Stocktake" (GST, UNFCCC), "Sustainable Development Mechanism" (SDM) de metas de emissões neutras, "Principles of Sustainable Insurance" (PSI-UNEPFI), "Bonos Verdes", "Waste Wise Cities" (UN-Habitat), "Water, Sanitation & Hygiene"(WASH, UN-Agenda 2030).
- **Métodos:** "Soluções baseadas na Natureza" ("NbS"), Adaptação baseada em Ecossistemas ("EbA"), Adaptação baseada em Comunidades("CbA"), Participatory Action Research ("PAR").

Resultados de avaliações tradicionais são apresentadas na Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, e Figura 9.

## Segurança Hídrica sob a ótica regional

Na Figura 3 aparecem os impactos projetados para América do Sul devido às mudanças climáticas com modelos regionais, p.ex. Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando o cenário SSP 2, RCP 4.5 para diferentes períodos futuros (Fagundes et al, 2023; Petry et al, 2023). A equipe do IPH/UFRGS, grupo associado ao INCT-MC2 Segurança Hídrica, lidera estas avaliações regionais. Na parte superior (Figura 3, A) aparece uma comparação entre o sinal (positivo ou negativo) das mudanças no escoamento total e no fluxo de sedimentos em principais bacias de América do Sul, devido a projeções climáticas do período 2021-2055, estimadas por modelos regionais Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o cenário RCP 4.5 (Fagundes et al, 2023). Na parte inferior (Figura 3, B) aparece o fator de mudança

(RPCF) do Período de Retorno (RP) das vazões máximas diárias em América do Sul. As partes em azul (ou vermelho) apresentam um aumento (ou decréscimo) da frequência de enchentes, tomando como referência o período histórico (1960-2014) e futuro (2015-2100, SSP2-4.5; Petry et al, 2023).

### **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). Na Figura 4 (Kreibich et al, 2022), com base em dados históricos, na Parte Superior, aparecem as frações de cada indicador que contribuem para riscos de inundações ("a", esquerda) e para secas ("b", direita). Na Parte Central ("a") da Figura 4 aparecem a distribuição geográfica de eventos pareados de inundações e secas extremos para a gestão de risco, e na Parte Inferior ("b") da Figura 4 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, Figura 4) ou aumento destes (cores laranja-vermelho, parte inferior, Figura 4) 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.

### **As tendências em segurança hídrica**

Assim, os resultados e recomendações do INCT-MC2 Segurança Hídrica de Figura 3 e da Figura 4 são contrastados com os resultados de Chagas et al (2022) sobre a distribuição espacial de tendências de aceleração, desaceleração, umedecimento, e estiagem nos escoamentos em bacias brasileiras (Parte Superior, Figura 5). Na Figura 5 apresentam-se a localização de quatro quadrantes nas tendências regionais de escoamento, com cores mais fortes indicando maiores intensidades das mudanças. Na Parte Inferior da Figura 5 apresenta-se a classificação das tendências do escoamento em quadrantes de aceleração, desaceleração, umedecimento, e estiagem. Na parte "a" aparecem símbolos que indicam tendências de cheias e de secas em 886 estações. Nessa Figura 5 aparecem alguns casos de relevância, por exemplo Norte de Amazonia ("NA"), Sul de Amazonia ("SA"), Sul do Brasil ("SB"), e Planaltos Brasileiros ("BH"), indicados por cores. Nessa Figura 5 aparecem símbolos que representam a tendência mediana de cada área de relevância, e as barras de erros indicam a incerteza mediana temporal dessas tendências. Na parte "b" da Figura 5 aparece a classificação das tendências regionais, com cores mais fortes indicando as maiores frações de amostras (Chagas et al, 2022).

## 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, na Figura 6 aparecem as mudanças estimadas de escassez hídrica (Ballarin et al, 2023). Nos setores "a" e "b" da Figura 6 se mostram as mudanças 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". Nos setores "c" e "d" da Figura 6 destaca-se a relação entre as mudanças relativas entre um futuro distante (2070–2100) e um período histórico (1980–2010) de: *disponibilidade hídrica* ( $\Delta Q$ ), *demanda hídrica* ( $\Delta Dem$ ), e no *índice de escassez hídrica* ( $\Delta Scarcity$ ) para cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Uma linha de traços amarela separa bacias hidrográficas com mudanças positivas e negativas no índice de escassez. Na Figura 6, uma linha cinza (traços) separa bacias com mudanças positivas e negativas na disponibilidade hídrica. Números vermelho (azul) indicam frações de bacias cuja escassez hídrica piora (ou melhora). Nos setores "e" e "f", respectivamente aparecem as bacias hidrográficas classificadas em quatro categorias de acordo com suas mudanças positivas/negativas na disponibilidade hídrica ( $\Delta Q$ ) e na demanda hídrica ( $\Delta Dem$ ). Classes de categoria por bioma são apresentados em gráficos de barras esticadas.

## 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* ( $\Delta Q$ ), *demanda hídrica* ( $\Delta Dem$ ), 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. Inicialmente, na Figura 7 (Taffarello et al, 2017) apresenta como 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* ( $\Delta Q$ ), *demanda hídrica* ( $\Delta Dem$ ), e no *índice de escassez hídrica* ( $\Delta Scarcity$ ), a segurança hídrica é expandida a partir da aplicação de seguros climáticos. Por um lado, a Figura 8 (Guzmán et al, 2020), aparece 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 km<sup>2</sup>) 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/>. As Figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 destacam alguns avanços e também desafios de segurança hídrica sob mudanças climáticas, especialmente para incluir novas dimensões, especialmente aspectos sociohidrológicos, explicadas à continuação.

### **Resumo de Relações Sociohidrológicas e de Conhecimento Hídrico Ancestral**

Ainda, a Subcomponente de Segurança Hídrica, em cooperação com INCT-ONSEAdapta, e IAHS com Décadas Científicas de Panta Rhei (2013-2022) e HELPING (2023-2032) buscam valorizar a história, a cultura e as artes dentro da gestão adaptativa para segurança hídrica em comunidades vulneráveis, por meio de: a) novos arquétipos, b) ciência cidadã, e c) estudos de caso.

- *Arquétipos "Ancestral Human-Water Feedbacks" (AHWF)*: começam com a convergência do INCT-MC2 com INCT-ONSEAdapta, Panta Rhei e HELPING (Figura 1) e mostram recentes experiências de elementos pouco frequentes ("arte, história, cultura"), combinados com os mais comuns (p.ex. "engenharias" e "matemáticas").
- *Ciência Cidadã*: aplicado com narrativas, alegorias e cenários extremos, desde uma visão de "deterioro-com-extinção" ("Cenário Abismal") até restauração e recuperação ancestral ("Cenário Ancestral"). Assim, a "Hidrologia Ancestral" é aqui ligada aos serviços ecossistêmicos ("Nature's Contributions to People") e NbS, com ciência aberta e educação ambiental rumo a uma governança policêntrica. Esses elementos são complementados aos cenários do IPCC/AR6 e IPBES, com novos arquétipos sociohidrológicos para comunidades vulneráveis e povos originários.
- *Estudos de Caso*: quando atribuídos a tarefas extensionistas no ensino superior, as discussões e as novas questões sobre co-criação de conhecimento hídrico engajam essa "Hidrologia Ancestral" com as comunidades dentro da Década Científica HELPING/IAHS.

Resultados destes arquétipos sociohidrológicos sobre segurança hídrica aparecem na Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15, e Figura 16.

### **Novos arquétipos de segurança hídrica com gestão adaptativa**

A Figura 10 mostra um gráfico combinando de potenciais arquétipos para a evolução da governança hídrica policêntrica da subcomponente de segurança hídrica do INCTMC-2 no período 2017-2025. Na Figura 10, por um lado, a parte A, incorpora uma visão ancestral para lições complexas de práticas indígenas ([Apgar et al, 2009](#)). A parte B da Figura 10 resgata a abordagem tradicional de segurança hídrica sem gestão adaptativa ([UN Water 2013](#)), que é considerada no primeiro índice de PSH pela ANA (2019). No entanto, na Figura 10, parte C, os novos Princípios de Cidades Sábias à Água (que usam racionalmente as águas, [IWA, 2016](#)), e a parte D, um exemplo de educação ambiental

pela visão de segurança hídrica de uma criança de 9 anos, incorpora aspectos de participação comunitária, que são também destacados no INCT-MC2, especialmente durante a pandemia de COVID-19, conhecida como [Panta Rhei Open Science for Future Earth illustration, 2020](#). Por outro lado, na Figura 10 parte E, há uma releitura de ações globais, por exemplo tanto do denominado "desenvolvimento climático resiliente centrado numa ação planetária", conforme proposto no [IPCC/AR6, 2022](#), como do Diagrama de Valor dos Alertas Antecipados para Todos centrados em pessoas ([UN & WMO, 2022](#), parte F da Figura 10). Contudo, no INCT-MC2 Segurança Hídrica, há também uma revisita aos conceitos de "justiça na adaptação e planejamento para a adaptação" ([Bustamante et al, 2023](#), parte G), assim como na parte H indicando uma possível realização da teoria de panarquia para a convergência e sistemas adaptativos ([Sundstrom et al., 2023](#)), unindo os ODSs e visão tradicional de segurança hídrica. Uma combinação destes arquétipos são revisitados pelo INCT-MC2 Segurança Hídrica com sinergias em: i) I Conf. Nacional de Mudanças Climáticas, 2024; ii) o [INCT Observatory of water security and adaptive management](#), iii) a iniciativa "UNESCO hydro resilience, citizen and open science for climate adaptation" ([UNESCO, 2024](#)), ligadas aos ODSs integrados com o Marco Sendai de RRD retomados no [2024 International Symposium on Integrated Water Resources Management \(IWRM\)](#).

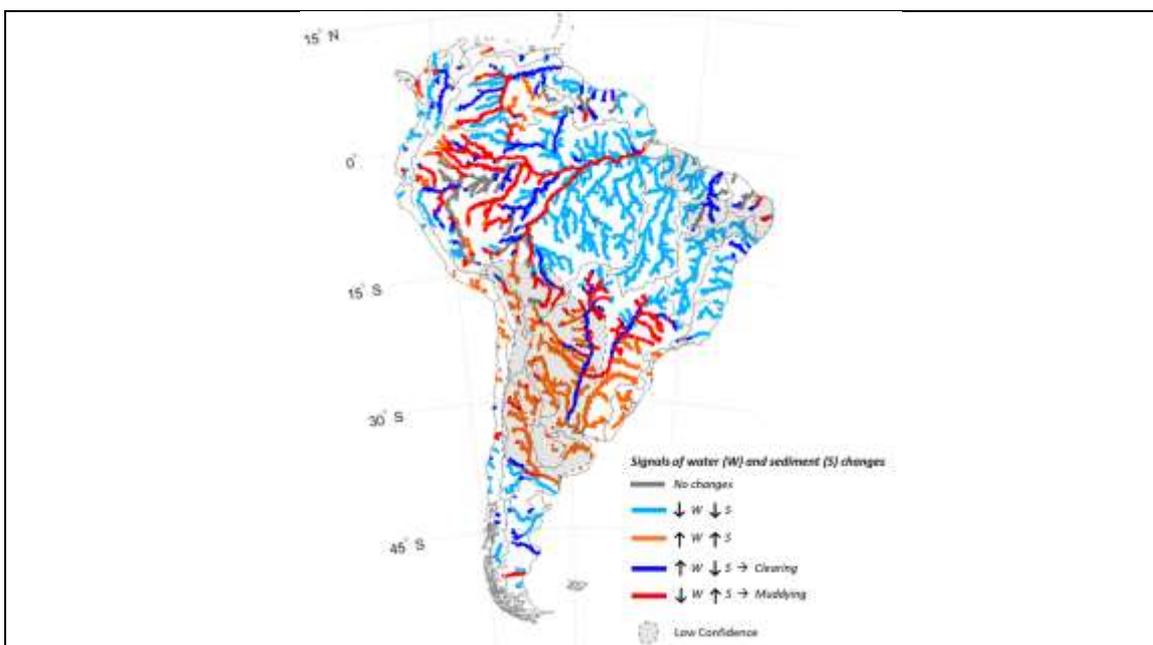
### **Novos arquétipos de segurança hídrica com sociohidrologia**

Para os objetivos e metas do INCT-MC2 Segurança Hídrica, esses possíveis novos arquétipos de gestão adaptativa precisam de diálogo interdisciplinar com outras subcomponentes do INCT-MC2 e projetos (ver Figura 1). Um exemplo experimental do INCT-MC2 Segurança Hídrica no período 2017-2025, apresentado na Figura 11, é introduzido pelo aprendizado empírico e interdisciplinar de possíveis relações sociohidrológicas, conforme recomendações da Década Científica IAHS/Panta Rhei e de novas propostas para a Década Científica IAHS/HELPING ("Hydrology Engaging Local People IN a Global world"). Uma destas relações acentuam a cocriação de conhecimento na segurança hídrica e propostas para uma hidrologia ancestral. Assim os novos arquétipos, aqui intitulados de "Ancestral Human-Water Feedbacks" (AHWF) visam tanto à gestão adaptativa como à segurança hídrica policêntrica. Na Figura 11, parte superior, aparecem aspectos sociohidrológicos de história, de artes e de ancestralidade (cores verdes predominantes), que são interconectados com avaliações técnicas e tradicionais, mais enfocados em engenharias e em matemática (parte inferior, cores azuis predominantes). Este fluxograma temporal experimental é coalinhado com contextos globais, p.ex. as Décadas Científicas da IAHS de Panta Rhei (2013-2022), e de HELPING (2023-2032), e com as fases VIII e IX do PHI UNESCO, e as redes brasileiras de C&T&I (como mostradas na Figura 1). Disto, o desenvolvimento de narrativas, cenários e arquétipos sociohidrológicos podem invocar algumas alternativas. Por exemplo, um arquétipo sociohidrológico para "Cenário Abismal Ano 2100" é mostrado na Figura 12 (Mendiondo et al, 2025). Na parte superior da Figura 12, aparecem uma ilustração alegórica, com narrativa poética e alguns exemplos práticos de mitigação e adaptação. Na parte inferior da Figura 12 aparece um arquétipo ("modelagem sociohidrológica") onde se promove uma má adaptação, com priorização de gestão da oferta hídrica, aumentando a desigualdade social e crescimento infraestrutural cinza ou tradicional, de alto impacto socioambiental e exacerbada pela mudança de uso do solo, do clima, do crescimento populacional e pelos hábitos de consumo não sustentáveis (parte esquerda da Figura 12). Por outro lado, um outro arquétipo sociohidrológico, denominado e "Ancestral 2100" aparece na Figura 13, também com ilustração alegórica, narrativas poéticas e exemplos,

tanto para área rural e área urbana. Na parte inferior da Figura 13 aparecem os arquétipos de adaptação baseada em ecossistemas (EbA), comunidades (CbA), soluções baseadas na natureza (NbS), gestão da demanda hídrica, aumentando as opções de serviços de reservação de água e reúso com infraestrutura "verde-azul" de baixo impacto. Tanto na Figura 12 como na Figura 13, aparecem referências iniciais para facilitar o cálculo e a possibilidade de adaptar estes arquétipos em educação ambiental com jogos educacionais e com tecnologias de gêmeos digitais.

### 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. Por um lado, na Figura 14 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. Por outro lado, na Figura 15 o INCT-MC2 Segurança Hídrica (Souza et al, 2020) destaca as siscrepâncias 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, na Figura 16 (Sarmiento-Buarque et al, 2020), 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.



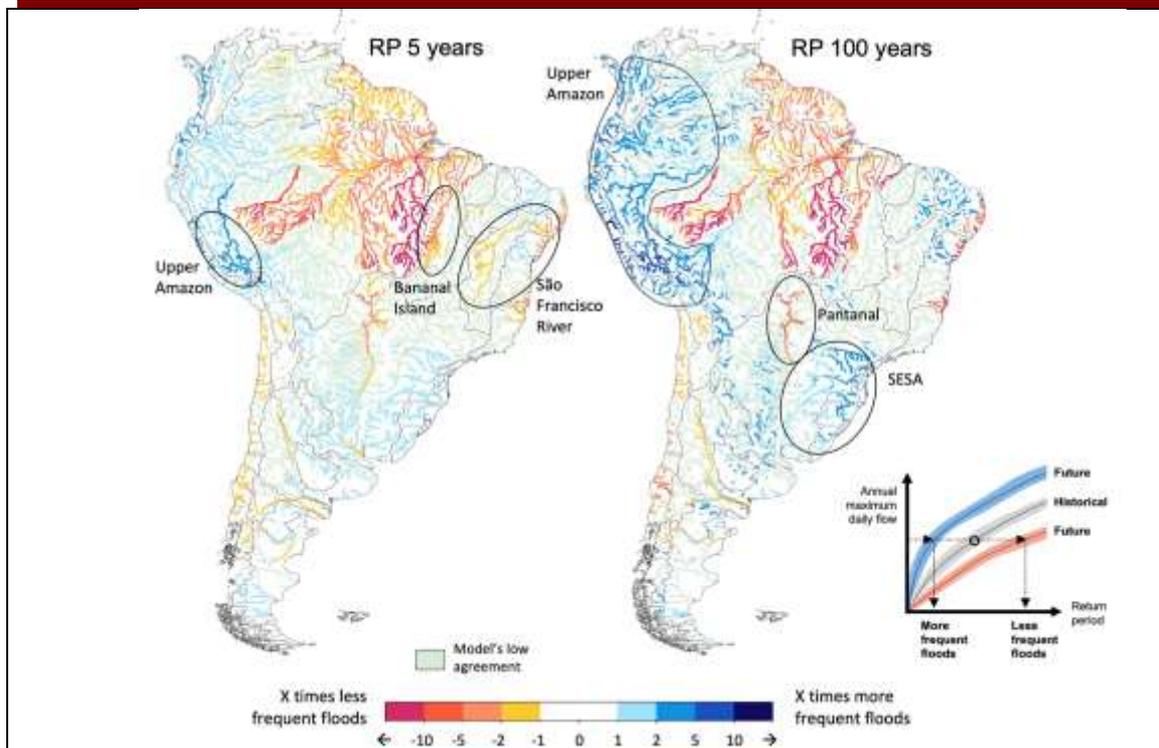


Figura 3. Cenários avaliados para regimes de escoamento em América do Sul do INCT-MC2 Segurança Hídrica. Parte A: Comparação entre o sinal (positivo ou negativo) das mudanças no escoamento total e no fluxo de sedimentos em América do Sul, devido a projeções climáticas do período 2021-2055, estimadas por modelos regionais Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o cenário RCP 4.5 (Fonte: Fagundes et al, 2023). Parte B: Fator de mudança (RPCF) do Período de Retorno (RP) das vazões máximas diárias em América do Sul. As partes em azul (ou vermelho) apresentam um aumento (ou decréscimo) da frequência de enchentes, tomando como referência o período histórico (1960-2014) e futuro (2015-2100, SSP2-4.5) (Fonte: Petry et al, 20

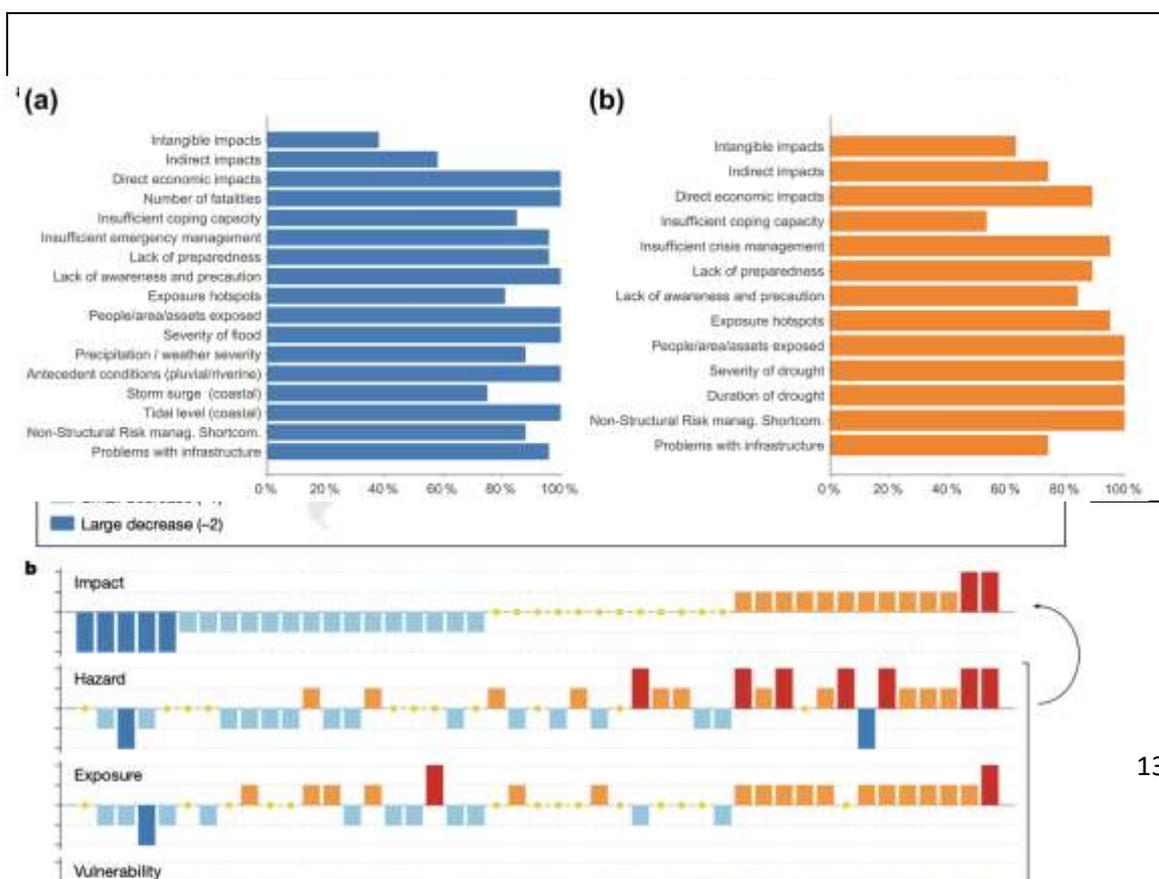


Figura 4. Análise de gestão de riscos de eventos de secas e inundações destacados no INCT-MC2 Segurança Hídrica. Parte Central (a): Distribuição geográfica de eventos pareados de inundações e secas sem precedentes para a gestão de risco. Parte Inferior (b): Indicadores de mudança, classificados pela mudança do impacto. "Impacto" é considerado sob controle de ameaças, exposições e vulnerabilidade, que são exacerbados quando há deficiências na gestão de risco. Parte Superior: Frações de cada indicador para inundações ("a", esquerda) e para secas ("b", direita). Fonte: Kreibich et al (2022).

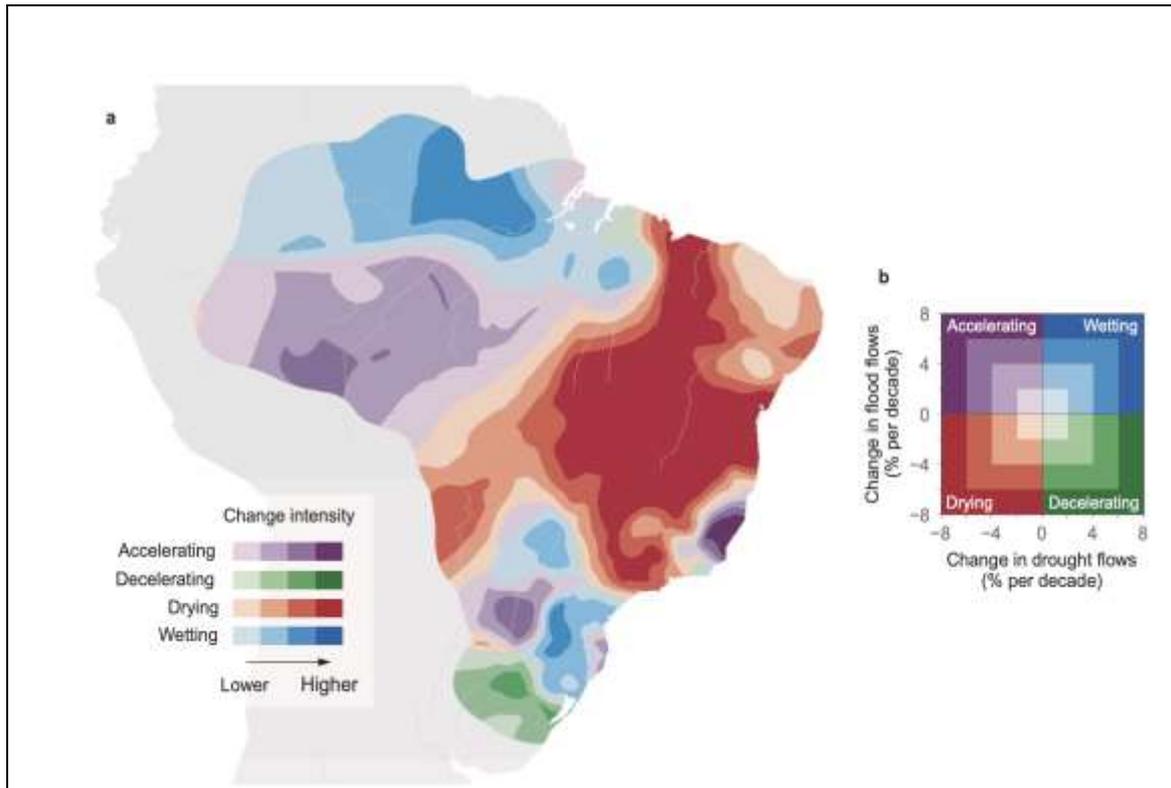


Figura 5. Dinâmica temporal observada nos regimes hidrológicos no território nacional do INCT-MC2 Segurança Hídrica. Parte Superior: Distribuição espacial de tendências de aceleração, desaceleração, umedecimento, e estiagem nos escoamentos no Brasil. Parte Inferior: Classificação das tendências do escoamento em quadrantes de aceleração, desaceleração, umedecimento, e estiagem. (a) Fonte: Chagas et al (2022).

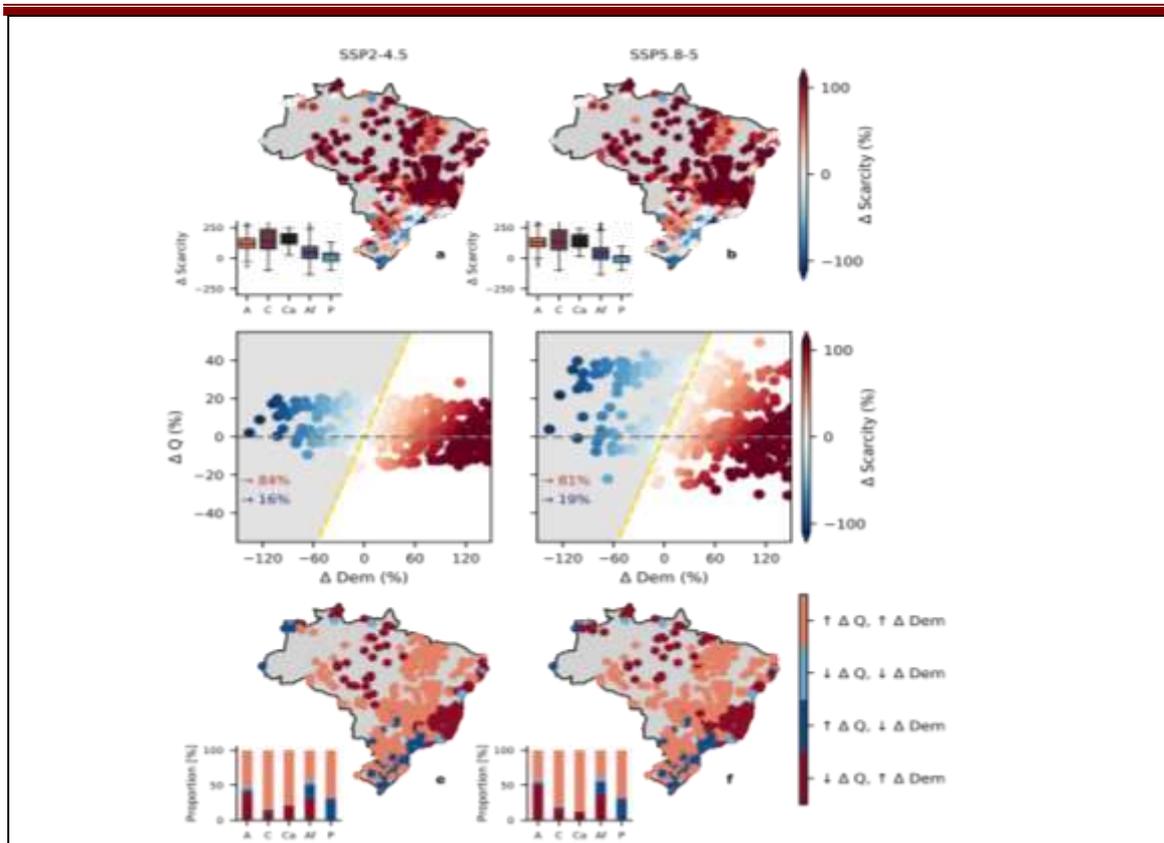


Figura 6. Mudanças de escassez hídrica do INCT-MC2 Segurança Hídrica. ("a" e "b") Mudanças relativas da média de escassez hídrica de longo período entre um futuro distante (2070–2100) e períodos históricos (1980–2010) para cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. ("c" e "d"). Relação entre as mudanças relativas entre um futuro distante (2070–2100) e um período histórico (1980–2010) de: disponibilidade hídrica ( $\Delta$ Q), demanda hídrica ( $\Delta$ Dem), e no índice de escassez hídrica ( $\Delta$ Scarcity) para cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. ("e" e "f") Bacias hidrográficas classificadas em quatro categorias de acordo com suas mudanças positivas/negativas na disponibilidade hídrica ( $\Delta$ Q) e na demanda hídrica ( $\Delta$ Dem). Classes de categoria por bioma são apresentados em gráficos de barras esticadas. Fonte: Ballarin et al (2023).

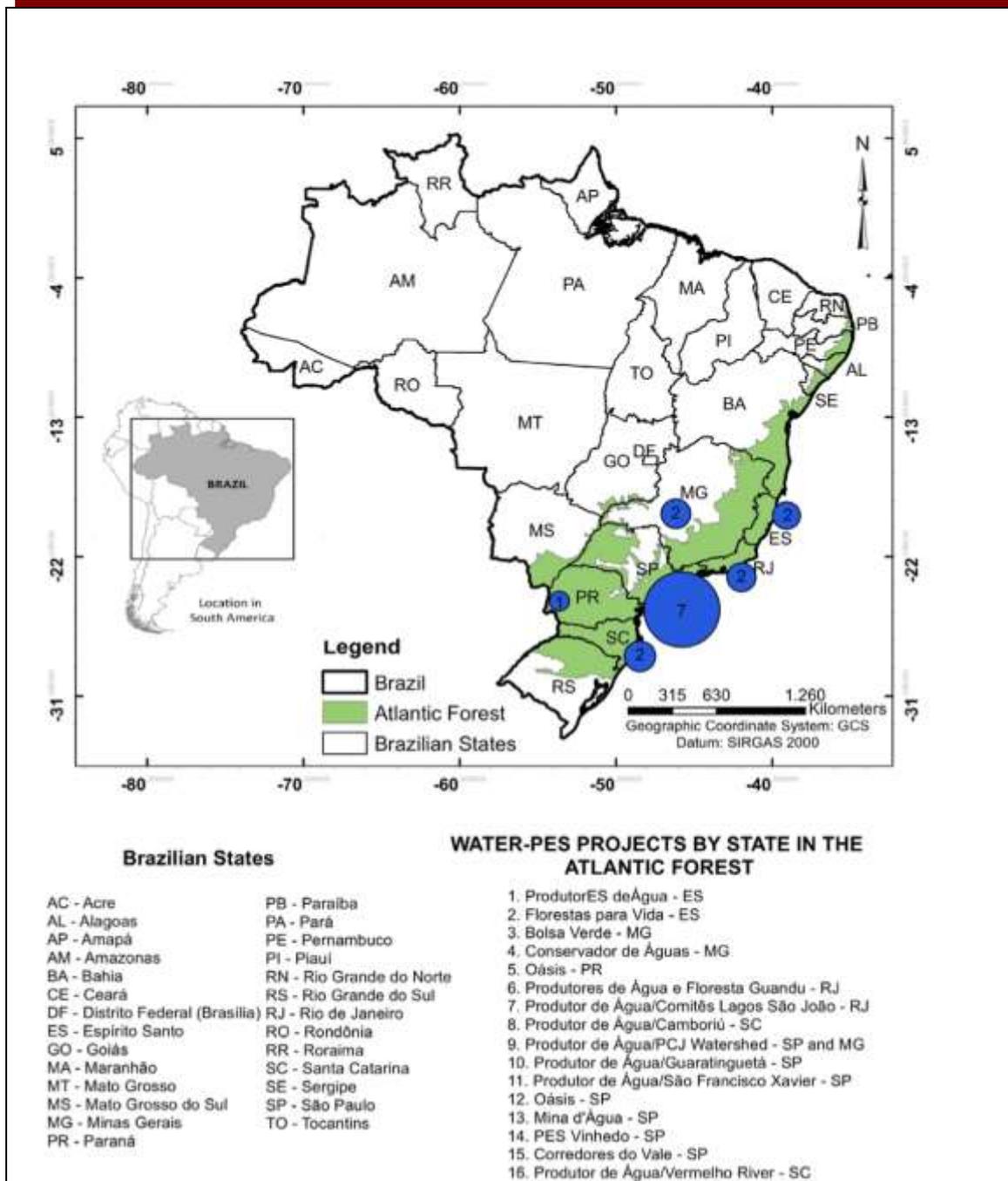


Figura 7. Serviços climáticos em escala local do INCT-MC2 Segurança Hídrica. Na figura, aparecem projetos de Pagamento por Serviços Ambientais na Mata Atlântica brasileira. O tamanho dos círculos azuis é relativo ao número de projetos por estado (Taffarello et al, 2017).

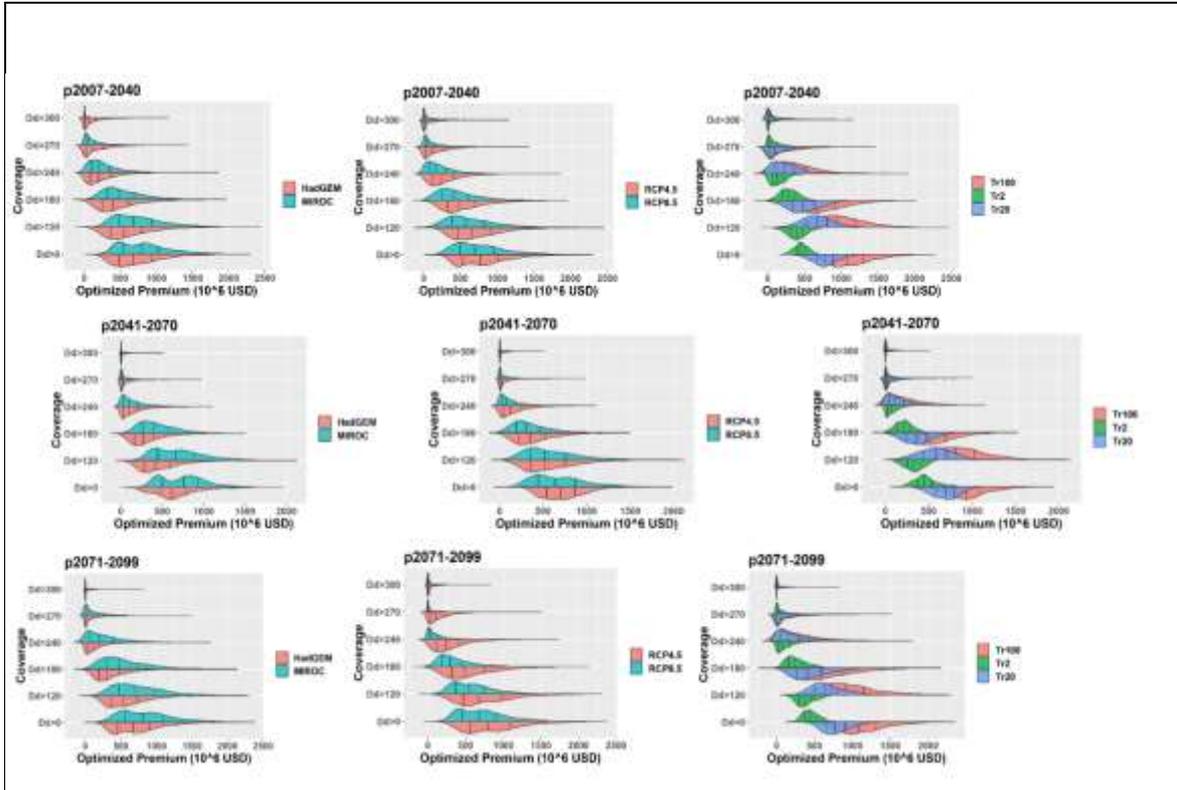
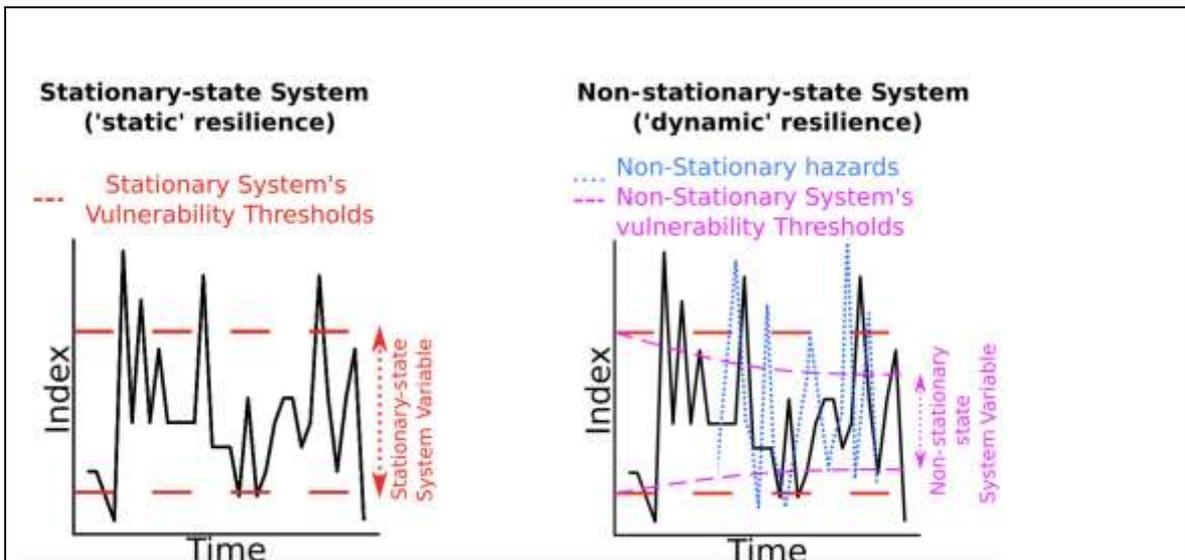


Figura 8: Análise de sensibilidade de aversão ao risco do INCT-MC2 Segurança Hídrica, usando gráficos de probabilidades tipo violinos (eixo vertical) de prêmios de seguros climáticos de longo prazo ( eixo horizontal ) de companhias de abastecimento com retiradas de água superficial de bacias doadoras de tamanho médio (p.ex. Sistema Cantareira) afluentes à região metropolitana de São Paulo. Fonte: Guzmán et al (2020).



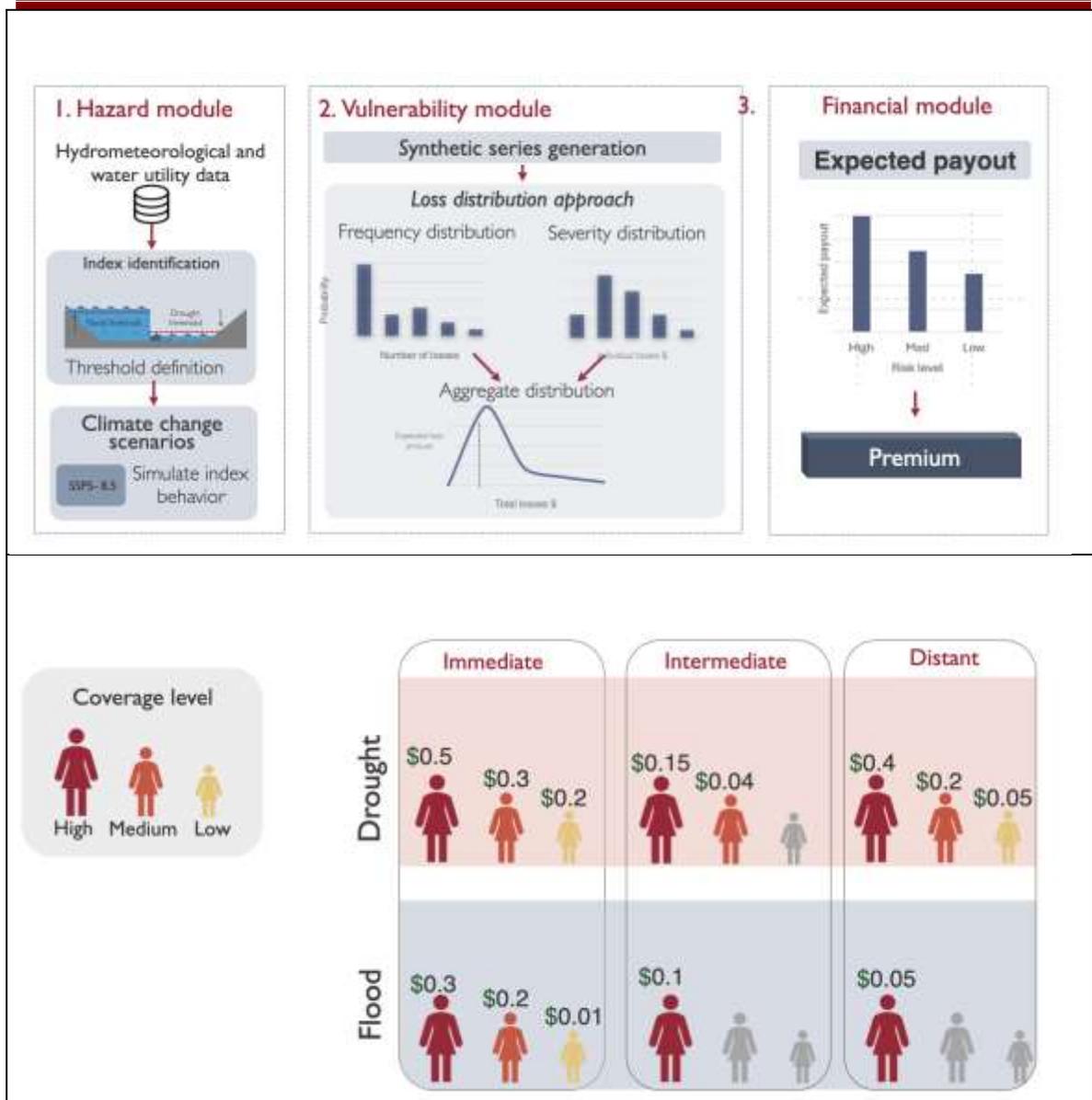


Figura 9. Seguros climáticos do INCT-MC2 Segurança Hídrica Parte Superior: Seguro Hídrico Dinâmico sob Mudanças (Benso et al, 2023). Parte Inferior: Monitor de risco de secas agregadas e de simulações de prêmios de seguros (Gesualdo et al, 2024).



Figura 10. Gestão adaptativa e arquétipos para governança hídrica policêntrica da subcomponente de segurança hídrica do INCTMC-2. Legendas: A: Transdisciplinaridade ancestral para lições complexas de práticas indígenas; B: Abordagem tradicional de segurança hídrica sem gestão adaptativa ; C: Princípios de Cidades Sábias à Água (que usam racionalmente as águas); D: -Uma visão de segurança hídrica de uma criança de 9 anos incluindo participação comunitária; E: Desenvolvimento climático resiliente centrado numa ação planetária (IPCC/AR6, 2022); F: Diagrama de Valor dos Alertas Antecipados para Todos centrados em pessoas; G: Justiça na adaptação e planejamento para a adaptação (Bustamante et al, 2023); H: Uma possível realização da teoria de panarquia para a convergência e sistemas adaptativos (Sundstrom et al., 2023).



Figure 11. Um exemplo experimental 2017-2025 de aprendizado empírico e interdisciplinar de relações sociohidrológicas e de hidrologia ancestral do INCT-MC2 Segurança Hídrica. Aspectos históricos, de artes e de ancestralidade (parte superior, cores verdes predominantes) são interconectados com avaliações técnicas e tradicionais, mais enfocados em engenharias e em matemática (parte inferior, cores azuis predominantes). Fonte: Mendiondo et al (2025).

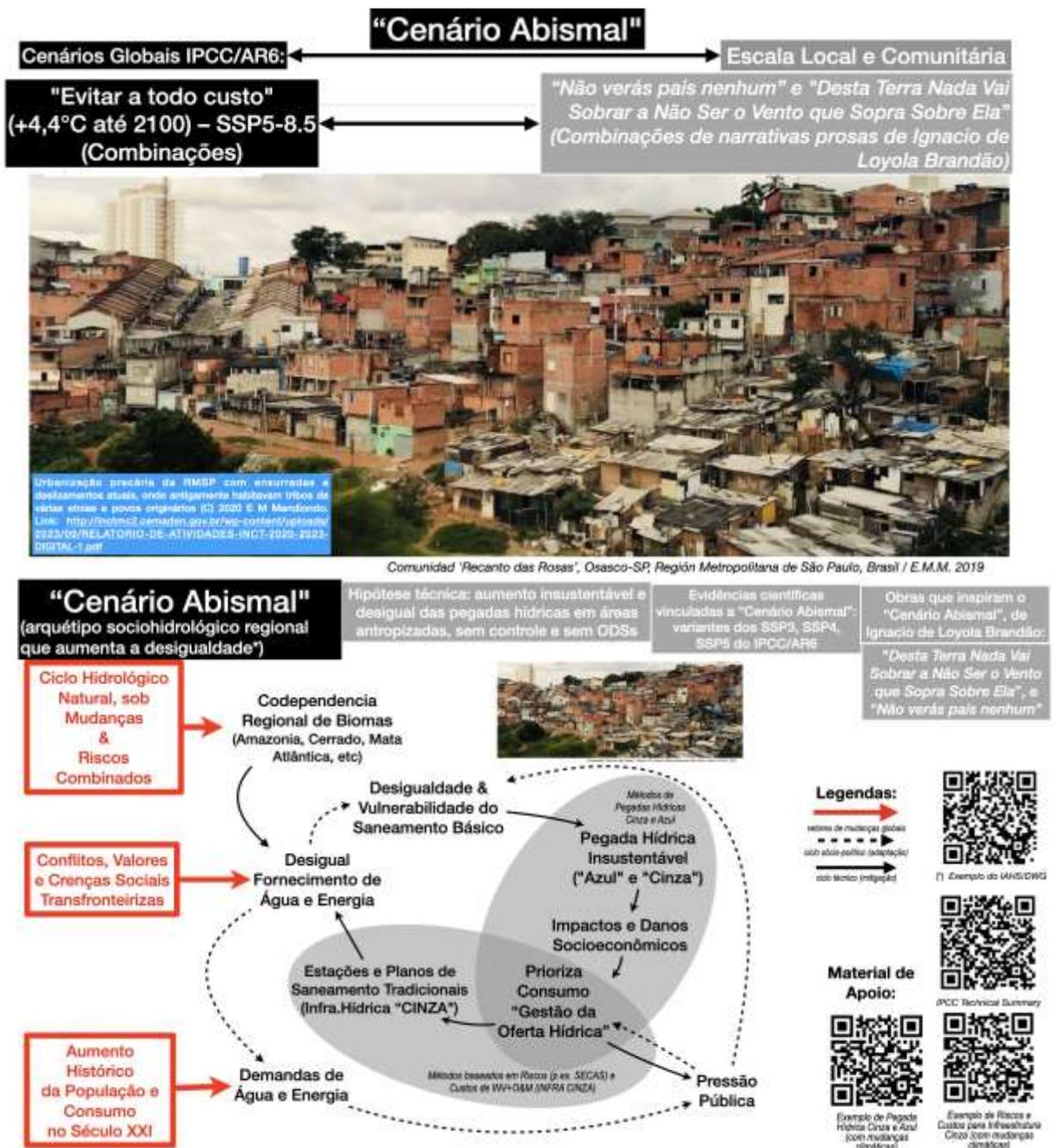


Figure 12. Arquétipo Sociohidrológico para "Cenário Abismal 2100" do INCT-MC2 Segurança Hídrica (Mendiondo et al, 2025). Detalhes explicados no texto.

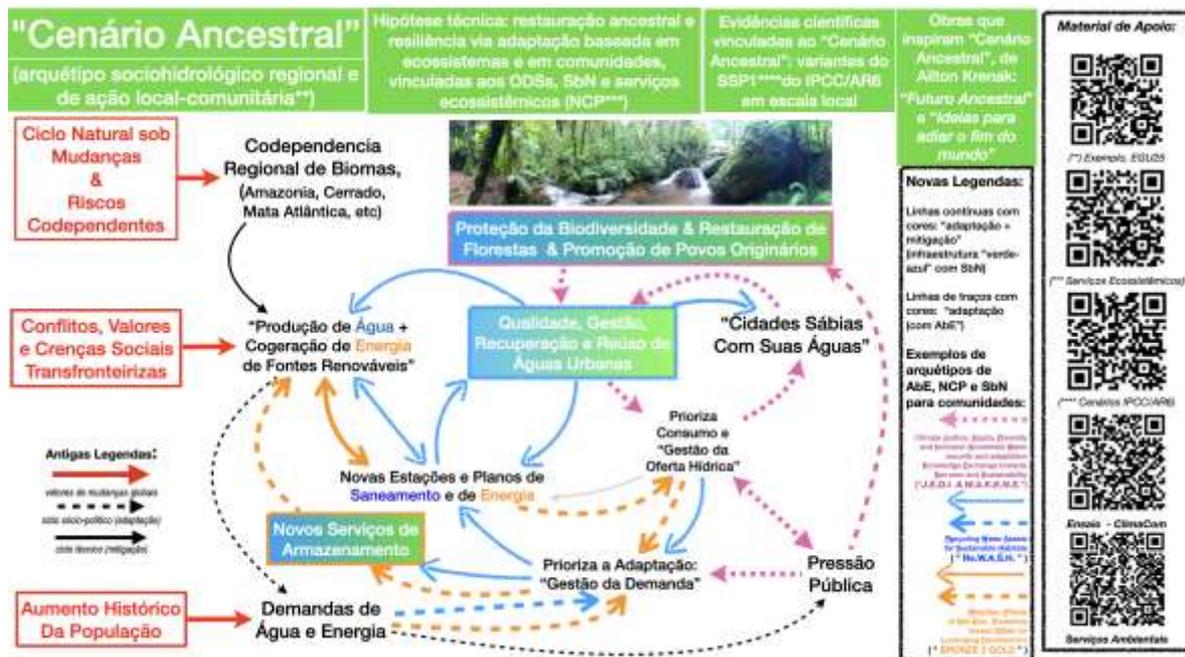


Figura 13- Arquétipo Sociohidrológico "Ancestral 2100" do INCT-MC2 Segurança Hídrica aplicado a comunidades vulneráveis (Mendiondo et al, 2025). Detalhes explicados no texto.

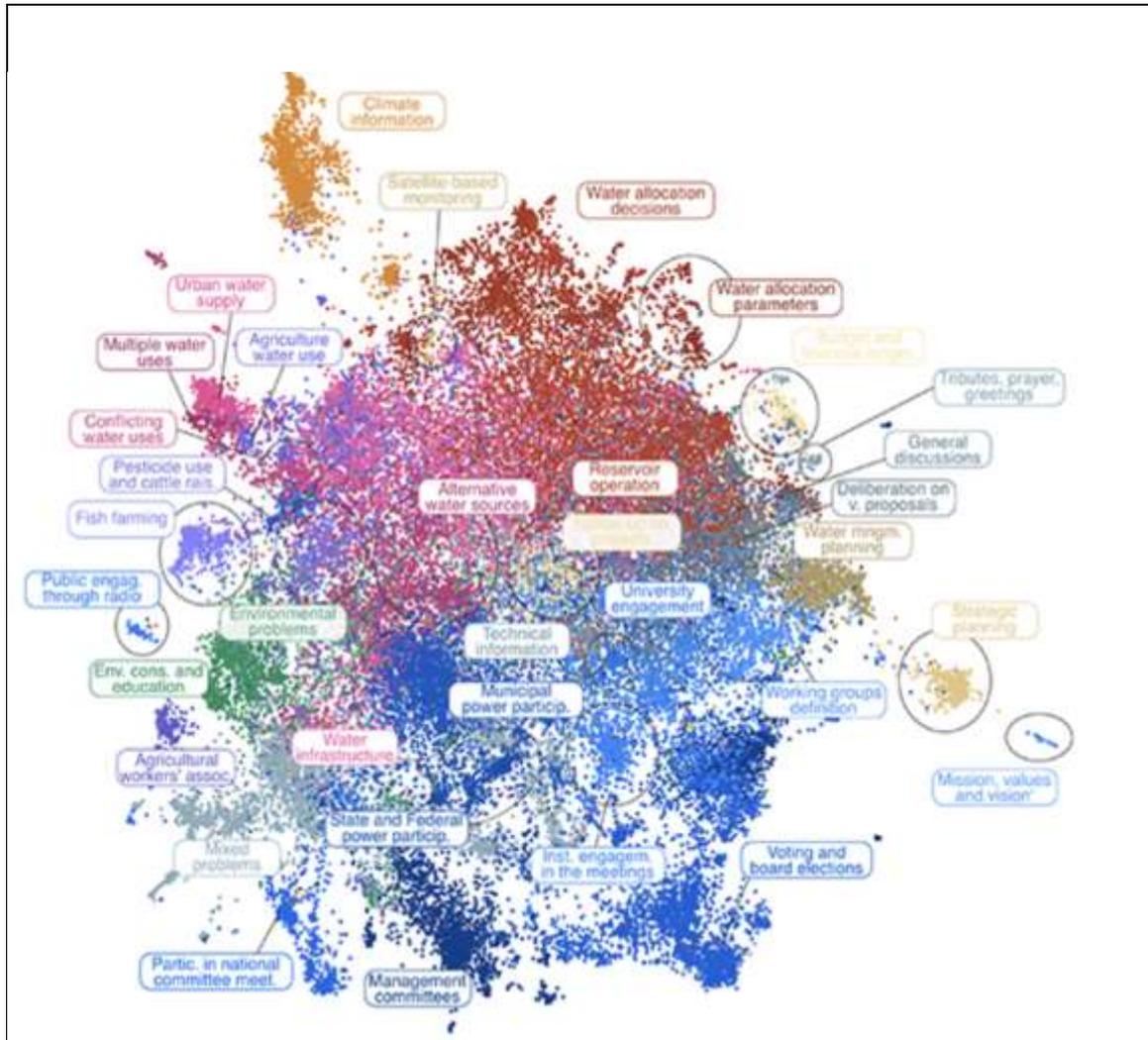


Figura 14. Mapeamento sociohidrológico da dinâmica de alocação de água a partir da releitura das reuniões com tomadores de decisão (Nunes et al, 2024)

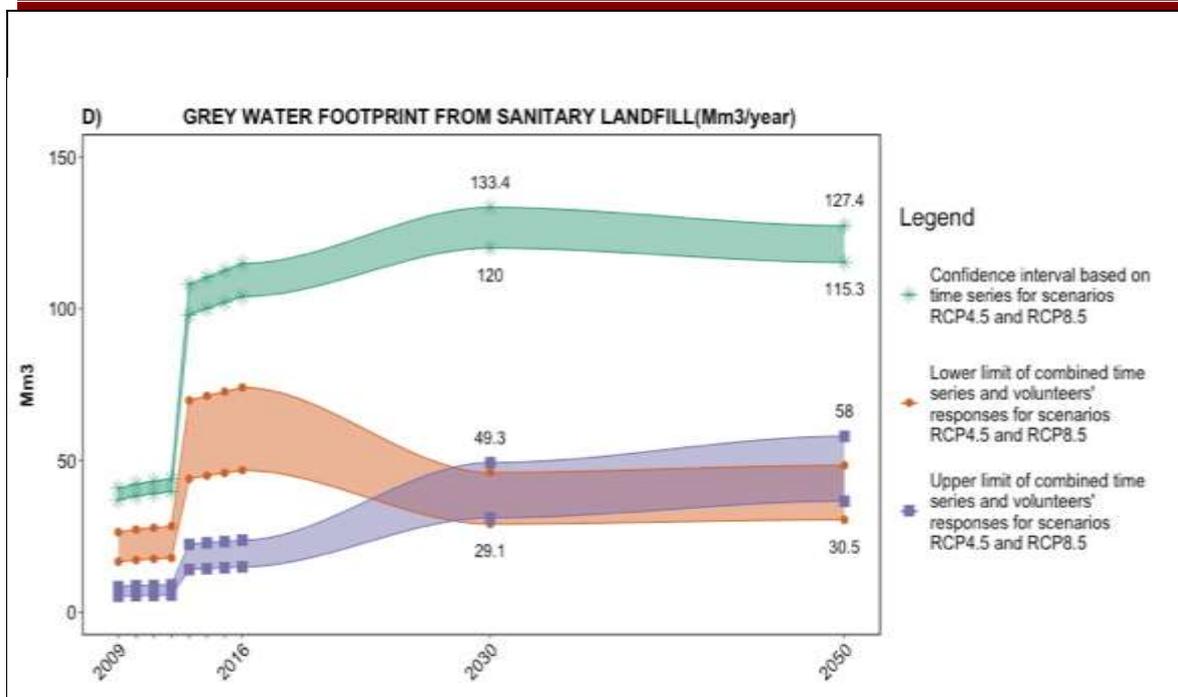


Figura 15. Modelagem sociohidrológica sob mudança climática do INCT-MC2 Segurança Hídrica mostra as discrepâncias entre a percepção cidadã sobre a Pegada Hídrica Cinza de lixões de município de tamanho médio ao longo dos agregados no período 2009-2050, cenários RCP 4.5 & RCP 8.5 (Souza et al, 2020).

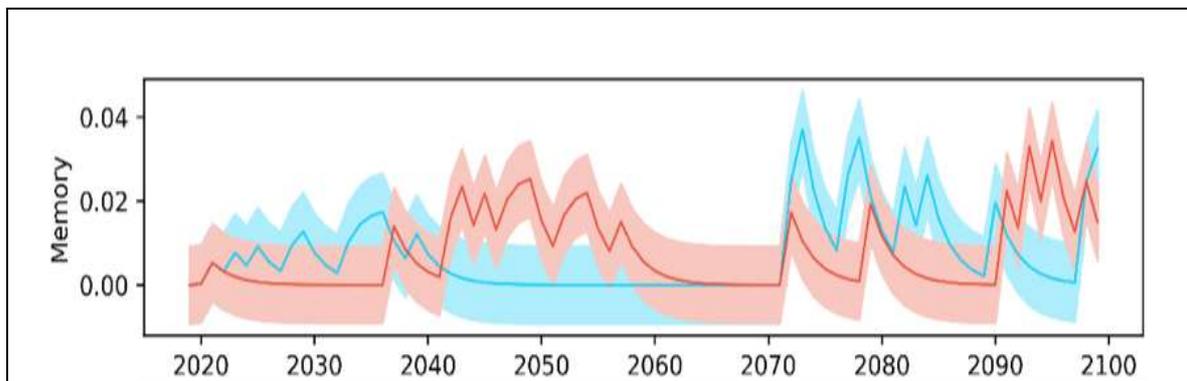


Figura 16. Modelagem sociohidrológica do INCT-MC2 Segurança Hídrica com fatores adimensionais de memória social de impactos de inundações 2020-2100 para cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 sobre um município de tamanho médio (Sarmiento-Buarque et al, 2020).

Material complementar

Objetivos, metas e participação de atores do INCT-MC2 Segurança Hídrica estão disponíveis em:

<https://drive.google.com/file/d/1TdgsYyysZ2knN0A4ycgRueUQ7Uc75ym/view?usp=sharing> .

Referências

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

## **4.9 Desastres e cidades**

### **INTRODUÇÃO**

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).

Ressalta-se que várias das referências acima destacadas foram decorrentes de estudos desenvolvidos no escopo do INCT-MC Fase 2, cujos resultados mais relevantes são detalhados no presente Capítulo.

## **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/km<sup>2</sup> e área total de 402.395 km<sup>2</sup> (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.

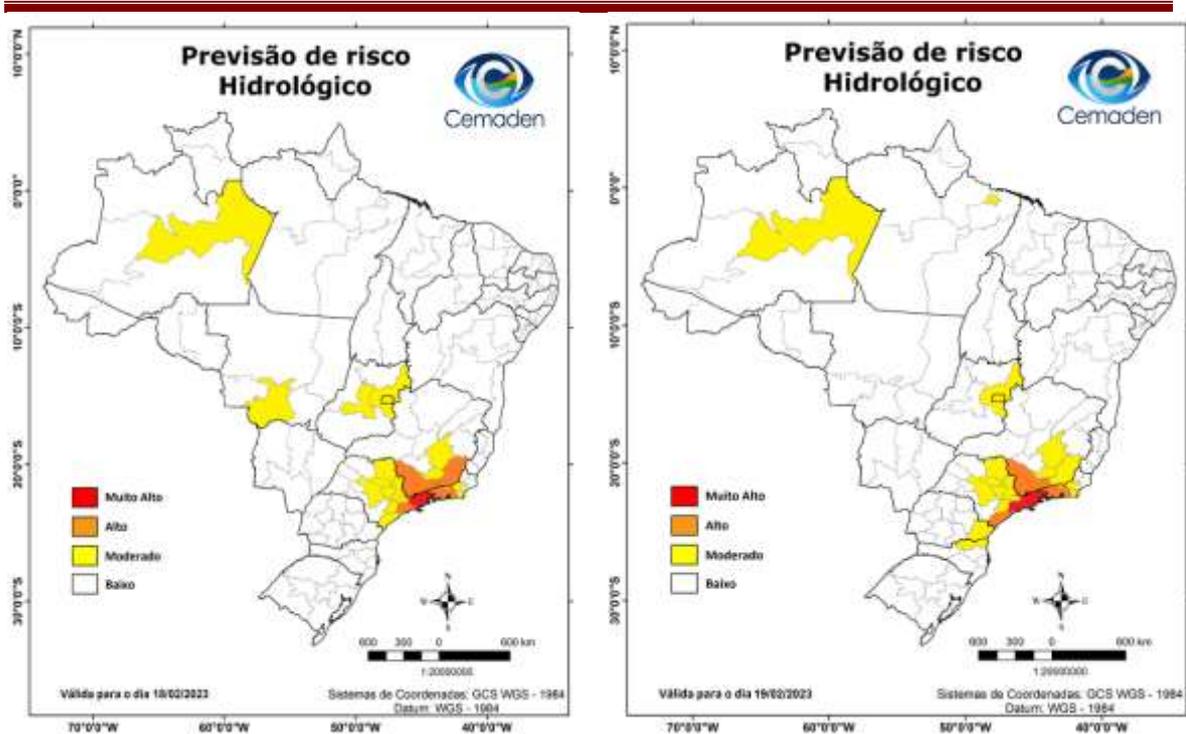


Fig. 1 – Possibilidade de ocorrência de eventos hidrológicos em pelo menos um município localizado em mesorregiões destacadas. Mapa elaborado por equipe multidisciplinar, considerando cenários de riscos hidrológicos atuais somados à previsão de chuvas. (FONTE: Alvalá et al, 2024a)

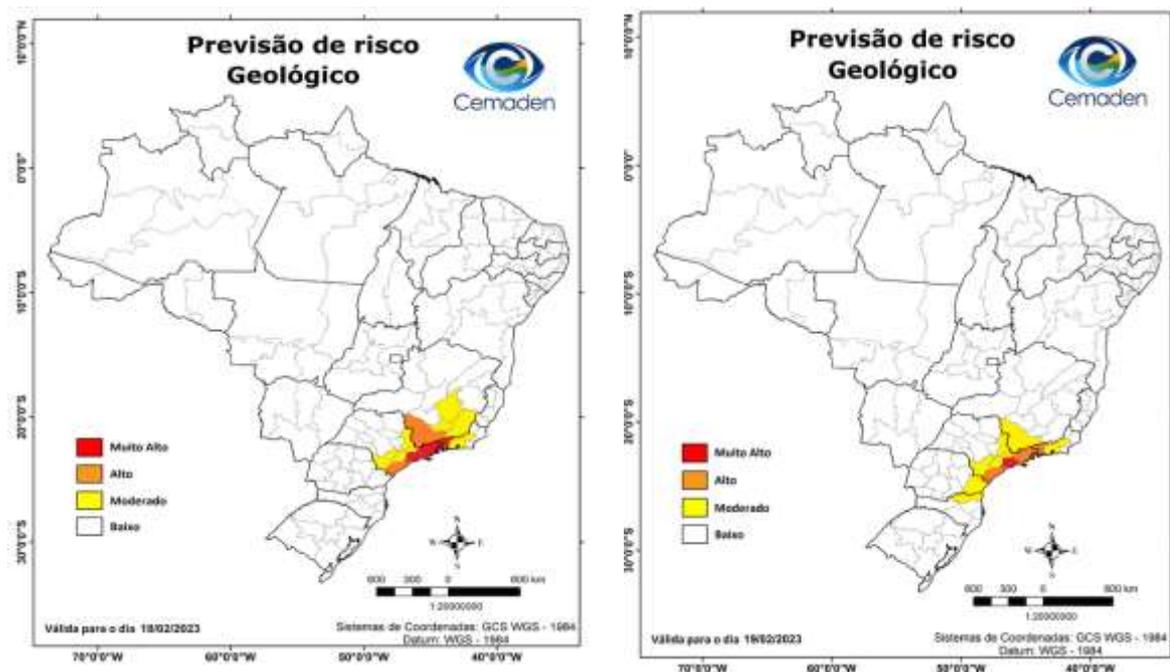


Fig. 2 – Possibilidade de ocorrência de eventos de deslizamentos em pelo menos um município localizado em mesorregiões destacadas. Mapa elaborado por equipe multidisciplinar, considerando cenários de riscos hidrológicos atuais somados à previsão de chuvas (FONTE: Alvalá et al., 2024a).

Embora ações antecipadas tenham sido providas, a eficácia do sistema de alerta precoce de desastres usado para alertar autoridades e moradores, bem como os alertas detalhados de riscos hidrológicos e geológicos muito altos enviados aos serviços de emergência estaduais e municipais com vários dias de antecedência não foram suficientes para salvar vidas. As pessoas não foram avisadas em São Sebastião da catástrofe iminente ou, se avisadas, não estavam preparadas para entender o risco ao qual estavam sujeitas. Em ambos os casos, as ações não foram tomadas a tempo para que 64 vidas não fossem perdidas e os danos às infraestruturas fossem minimizados. Vale ressaltar que as chuvas extremas registradas durante o evento causaram um colapso generalizado de encostas que se concentraram em uma faixa contínua de aproximadamente 40 km de comprimento e aproximadamente 10 km de largura, abrangendo áreas de altas colinas adjacentes à costa de São Sebastião e incluindo pequenas ilhas e áreas montanhosas. Portanto, houve clusters específicos de deslizamentos e fluxos, que resultaram em volumes extraordinários de material mobilizado e os consequentes impactos foram mais severos nas praias de Barra de Boiçucanga (434 residências em áreas de risco), Camburi (608 residências), Baleia (185 residências), Barra do Sahy (162 residências) e Juquehy (575 residências), totalizando quase 200 residências afetadas. No estudo de Marengo et al. (2024a), também discutiu-se a necessidade de aprimorar a comunicação em caso de desastre iminente, destacando-se que sistemas de alerta precoce focando múltiplos riscos são vitais para a adaptação e redução de riscos em áreas suscetíveis a desastres, assim como políticas públicas eficazes devem ser implementadas para salvar vidas.

Visando avaliar os impactos dos desastres ocorridos no estado do Rio Grande do Sul em setembro de 2023, uma análise integrada dos fatores de risco de inundações foi efetuada, considerando-se metodologia baseada em análises meteorológicas e hidrológicas, avaliação da vulnerabilidade populacional e capacidades municipais de gestão de risco a partir de fontes de dados públicos (Alvalá et al, 2024b). Neste desastre, chuvas extremas afetaram mais de 400.000 pessoas, que, combinadas com as características de vulnerabilidade das populações e as capacidades municipais de gestão de risco de desastres influenciaram os impactos das inundações nos municípios afetados. Um sistema frontal estacionário causou chuvas e inundações sem precedentes entre 1 e 4 de setembro de 2023 em parte do estado do RS. Uma frente fria quase estacionária vinda da Argentina intensificou a precipitação, exacerbada por uma área de baixa pressão em níveis superiores. Atribuídos ao El Niño de 2023, esses eventos resultaram em chuvas intensas que excederam os níveis normais em 200–300 mm, levando a inundações que afetaram 107 municípios, resultando em 54 mortes e extensos danos materiais. As bacias dos rios Caí e Taquari-Antas foram particularmente afetadas, com os níveis dos rios excedendo os limites críticos, causando inundações severas e a maioria das mortes. A vulnerabilidade foi maior entre populações de baixo nível socioeconômico que vivem em moradias com infraestrutura precária, especialmente em pequenos municípios dependentes da agricultura (Figura 3).

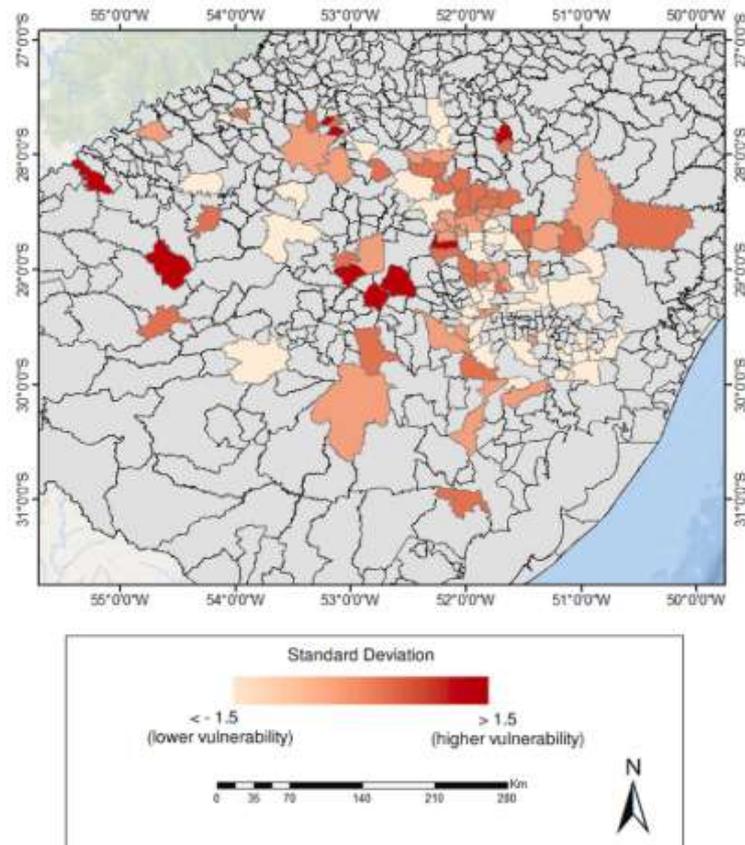


Fig. 3 – Índice de Vulnerabilidade para os municípios analisados (FONTE: Alvalá et al, 2024b)

A alta vulnerabilidade ressaltada no estudo associou-se à ausência de políticas públicas que melhorem as condições socioeconômicas, como políticas de ação social para trabalhadores rurais, combate ao atraso escolar e melhorias na infraestrutura domiciliar. Além disso, as administrações municipais precisam investir no fortalecimento de ferramentas, ações e políticas voltadas para a resposta e gestão de riscos, além de promover atividades educativas em proteção e defesa civil, com atenção especial à população idosa.

Em 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi novamente afetado por temporais que deflagraram inundações e deslizamentos de terra que impactaram grande parte do estado, incluindo a capital, Porto Alegre. De acordo com a Confederação Nacional de Municípios, os prejuízos financeiros no estado somaram 11 bilhões de reais, e, de acordo com boletim da Defesa Civil do estado, até 03 de julho de 2024 foram registrados 180 óbitos, 32 pessoas desaparecidas, 478 municípios afetados, 2.398.255 pessoas afetadas e 806 feridos.

Considerando o monitoramento e alertas de desastres, a partir da rede de monitoramento de chuvas do CEMADEN/MCTI foram registrados acumulados de chuvas entre 22 de abril a 6 de maio de 2024 que variaram entre 368 mm em Porto Alegre e 778 mm em Fontoura Xavier. Mais de 80 alertas de riscos geo-hidrológicos foram emitidos pelo CEMADEN para 45 cidades do estado do RS. Mudanças na circulação atmosférica associada ao fenômeno El Niño que atuou sobre o Brasil, como parte da variabilidade natural do clima, contribuíram para a estacionalidade das frentes frias e consequentes altos volumes de chuva registrados no Estado. Além disso, a tendência de aumentos nos extremos de chuvas faz parte de uma tendência já observada no Sudeste da América do

Sul durante os últimos 60 anos, isto é, de aumento de extremos de chuvas, o qual tem sido previsto em projeções dos modelos do IPCC para as próximas décadas. Esta tendência de aumento de extremos observada em todo o mundo está associada ao aquecimento global, em que um aumento da temperatura pode incrementar o conteúdo de umidade da atmosfera e acelerar o ciclo hidrológico, gerando chuvas intensas (Marengo et al., 2024b).

Conforme destacado em Marengo et al. (2025a), as inundações ocorridas no estado do Rio Grande do Sul foram desencadeadas por fortes chuvas superiores a 500 mm em cinco dias, fazendo com que os níveis de água do Lago Guaíba atingissem 5,35 m em 6 de maio, o nível mais alto desde a enchente de 1941. Antes da grande inundação em Porto Alegre, as previsões de chuva e os alertas de alto risco de inundação foram emitidos com alguns dias de antecedência. No Brasil, o Sistema de Alerta Precoce (SAE) opera por meio de uma estrutura intersetorial e multiagências. Nos últimos quinze anos, a integração de informações climáticas na prevenção de desastres, redução de riscos, monitoramento e alerta precoce melhorou significativamente. No entanto, apesar de o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) ser a principal instituição responsável pelo monitoramento e emissão de alertas antecipados de inundações, enxurradas e deslizamentos de terra em todo o país, ainda há necessidade de uma melhor integração das informações. A melhoria poderia aprimorar as ações de resposta e contribuir para a construção de resiliência. Logo, o estudo priorizou fornecer uma breve revisão das condições climatológicas que levaram às inundações no Rio Grande do Sul, bem como examinou o papel dos Centros de Alerta Antecipado de Desastres Naturais (SAE) e do Sistema de Alerta Antecipado de Múltiplos Riscos (SAEM) no Brasil durante o desastre, bem como uma avaliação das atividades de prevenção e alerta antecipado do CEMADEN antes e durante o evento. Neste escopo, visou compreender a natureza e os impactos únicos do desastre mencionado, visando melhor se preparar para eventos semelhantes no futuro.

## **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 km<sup>2</sup> 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.

### **CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA NO BRASIL: AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIAS E IMPACTOS RECENTES**

A seca é um dos desastres que mais causa impactos socioeconômicos no Brasil. Sua recorrência tem afetado amplamente o abastecimento de água, a produção agrícola e a geração de energia, comprometendo a segurança alimentar e hídrica, sobretudo em comunidades mais vulneráveis. A identificação de áreas mais frequentemente afetadas é essencial para subsidiar estratégias de mitigação e adaptação, especialmente diante do contexto de mudanças climáticas. Neste escopo, uma análise da evolução espaço-temporal das secas no Brasil, combinando análises de tendências bem como, a avaliação

dos eventos mais intensos ocorridos nas diferentes regiões do país entre 1982 e 2022 (Figura 4).

Os eventos de secas ocorridos entre 2011 e 2019 foram avaliados utilizando o Índice Integrado de Seca (IIS), que combina dados meteorológicos (SPI) e de sensoriamento remoto (VHI) (Cunha et al., 2019). Desde 2018, o IIS passou a integrar a rotina operacional do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), permitindo o acompanhamento das condições de seca em todos os municípios brasileiros. As estimativas atualizadas do IIS podem ser acessadas em: <https://mapasecas.cemaden.gov.br/#iis1>.

Cunha et al. (2019) observaram que, no intervalo 2011–2017, registraram-se os episódios mais severos e abrangentes, com ênfase nos anos hidrológicos 2014/2015 e 2015/2016. A região Nordeste registrou a seca mais prolongada e intensa do período, enquanto o Sudeste foi marcado pela crise hídrica que afetou o Sistema Cantareira em 2014/2015. Na Amazônia, a seca de 2015/2016, considerada a mais grave em um século, provocou impactos significativos na vegetação e acentuou a propagação de incêndios florestais (Cunha et al., 2019; Alvalá et al., 2017, Aragão et al., 2018; Jiménez-Muñoz et al., 2016, Nobre et al., 2016; Deusdará-Leal et al., 2019).

Complementando essa análise, um segundo estudo sobre a caracterização espaço-temporal das secas no Brasil entre 1982 e 2022, baseado também no Índice Integrado de Seca (IIS-12), mostrou que o período de 2013 a 2022 apresentou a maior frequência de eventos classificados como severos a excepcionais, afetando cerca de 7% do território nacional (Cuartas et al., 2022; Marengo et al., 2020). As regiões mais impactadas foram o Nordeste, o norte do Sudeste, grande parte do Centro-Oeste e áreas do Sul, com a bacia do rio Paraná registrando um aumento significativo na intensidade das secas ao longo das últimas quatro décadas.

Para avaliar as tendências temporais na recorrência e intensidade das secas, o estudo aplicou o teste não paramétrico de Mann-Kendall para detecção de tendências e a estimativa da inclinação de Sen para quantificar a magnitude das mudanças. Os resultados indicaram um aumento estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ) na severidade das secas na bacia do rio Paraná. Padrões similares, embora menos intensos, foram observados também em setores da Amazônia Oriental (Figura 5).

Os impactos dessas secas variam conforme as características locais e socioambientais. No Nordeste, as perdas agrícolas afetaram especialmente pequenos produtores, com déficits de umidade do solo levando a quedas drásticas na produção (Zeri et al., 2018; Cunha et al., 2018). Na Amazônia, além dos impactos na vegetação, as secas intensificaram a propagação de incêndios, muitas vezes associados a atividades humanas, como desmatamento e queimadas (Aragão et al., 2018; Anderson et al., 2018). Já no Sudeste e Centro-Oeste, a redução nos níveis de reservatórios e a escassez hídrica trouxeram desafios para o abastecimento urbano e a geração de energia (Nobre et al., 2016; Getirana, 2016).

A combinação de dados climáticos e de sensoriamento remoto tem se mostrado essencial para o monitoramento operacional e a avaliação dos impactos das secas (Cunha et al., 2019; Bhuiyan et al., 2006). Diante do cenário de mudanças climáticas, com projeções de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos (IPCC, 2021), torna-se urgente fortalecer estratégias de adaptação, especialmente em regiões historicamente vulneráveis, como o semiárido nordestino e a Amazônia (Marengo et al., 2020; Marengo et al., 2025b; PBMC, 2013).

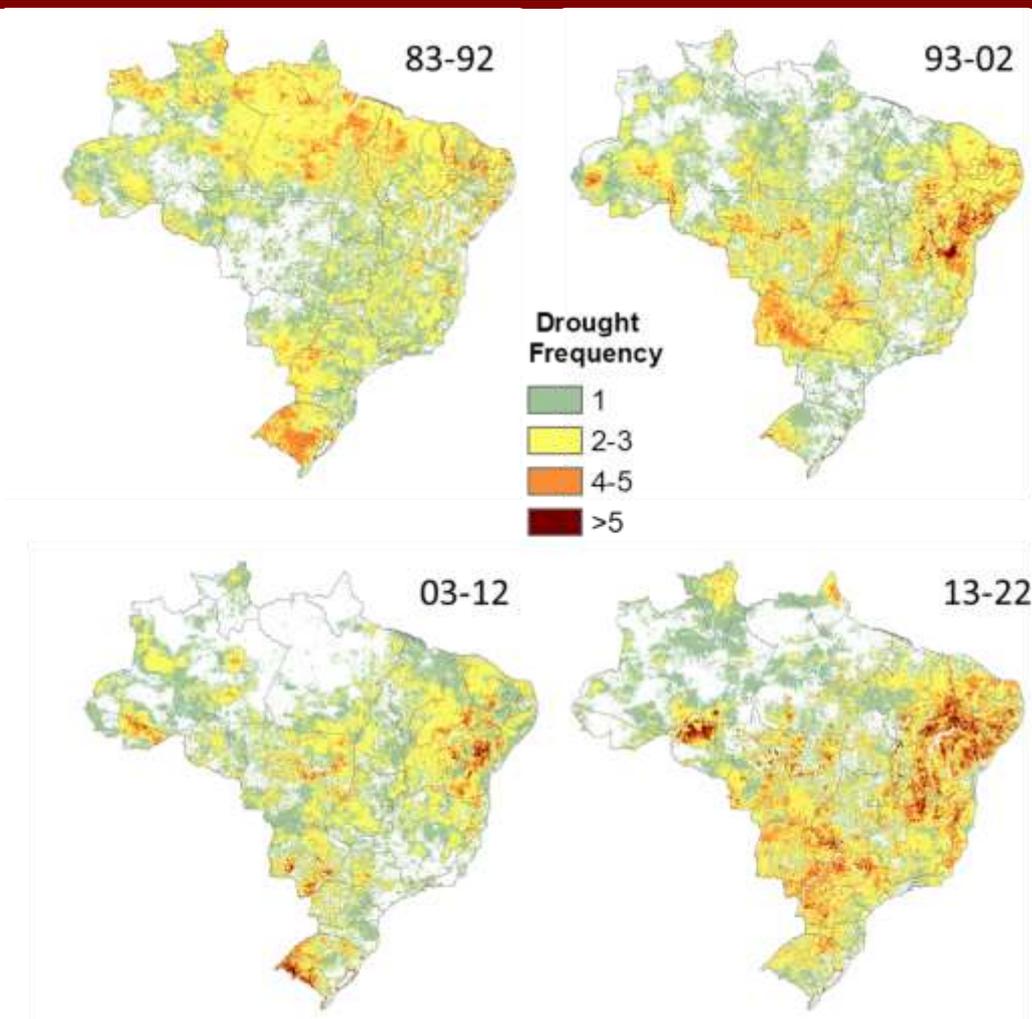


Fig. 4 – Frequência de eventos de seca das categorias severa a excepcional (1982–2022).

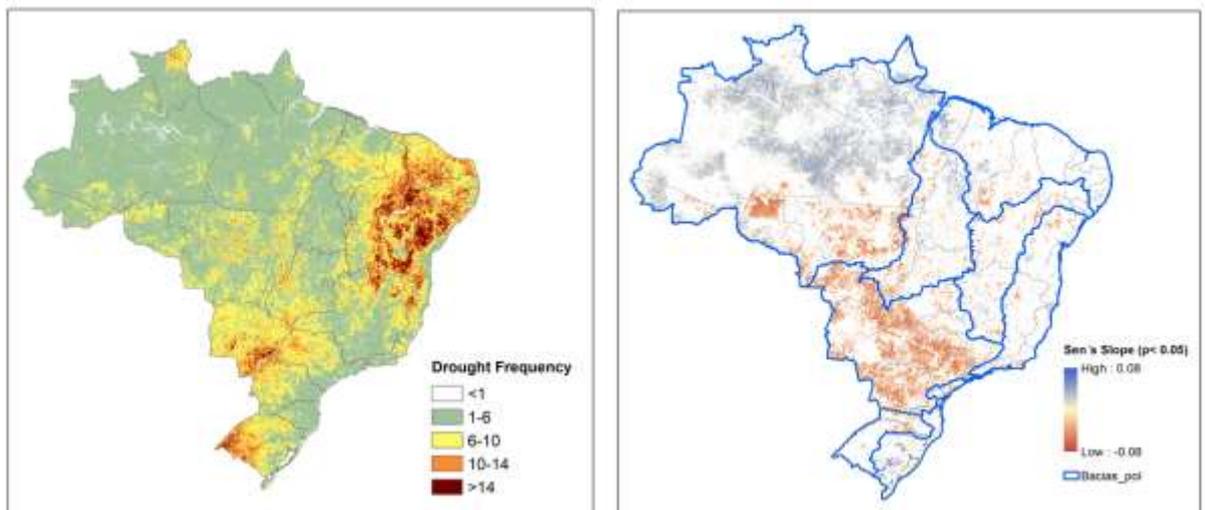


Fig. 5 – À esquerda, frequência de eventos de seca classificados como severos, extremos ou excepcionais no Brasil entre 1983 e 2022. À direita, tendência de intensificação das secas estimada pela inclinação de Sen com base no teste de Mann-Kendall, indicando áreas com aumento significativo da severidade ao longo do tempo.

## **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 (Figura 6). 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 (Figura 7: 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.

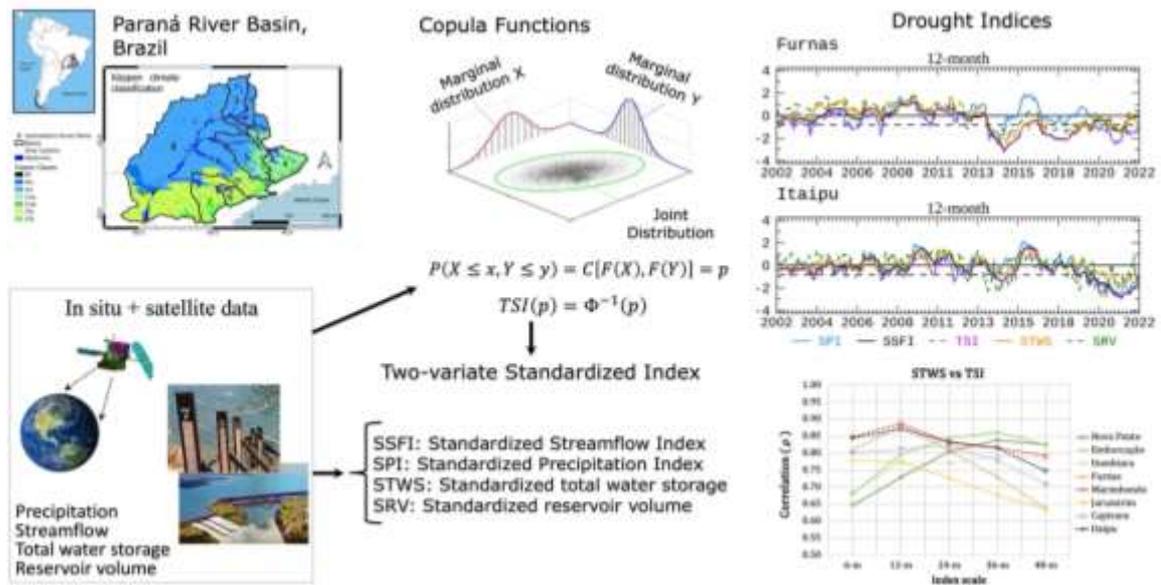


Fig. 6 – Esquema resumo do estudo (Graphical abstract de Cuartas et al., 2024)

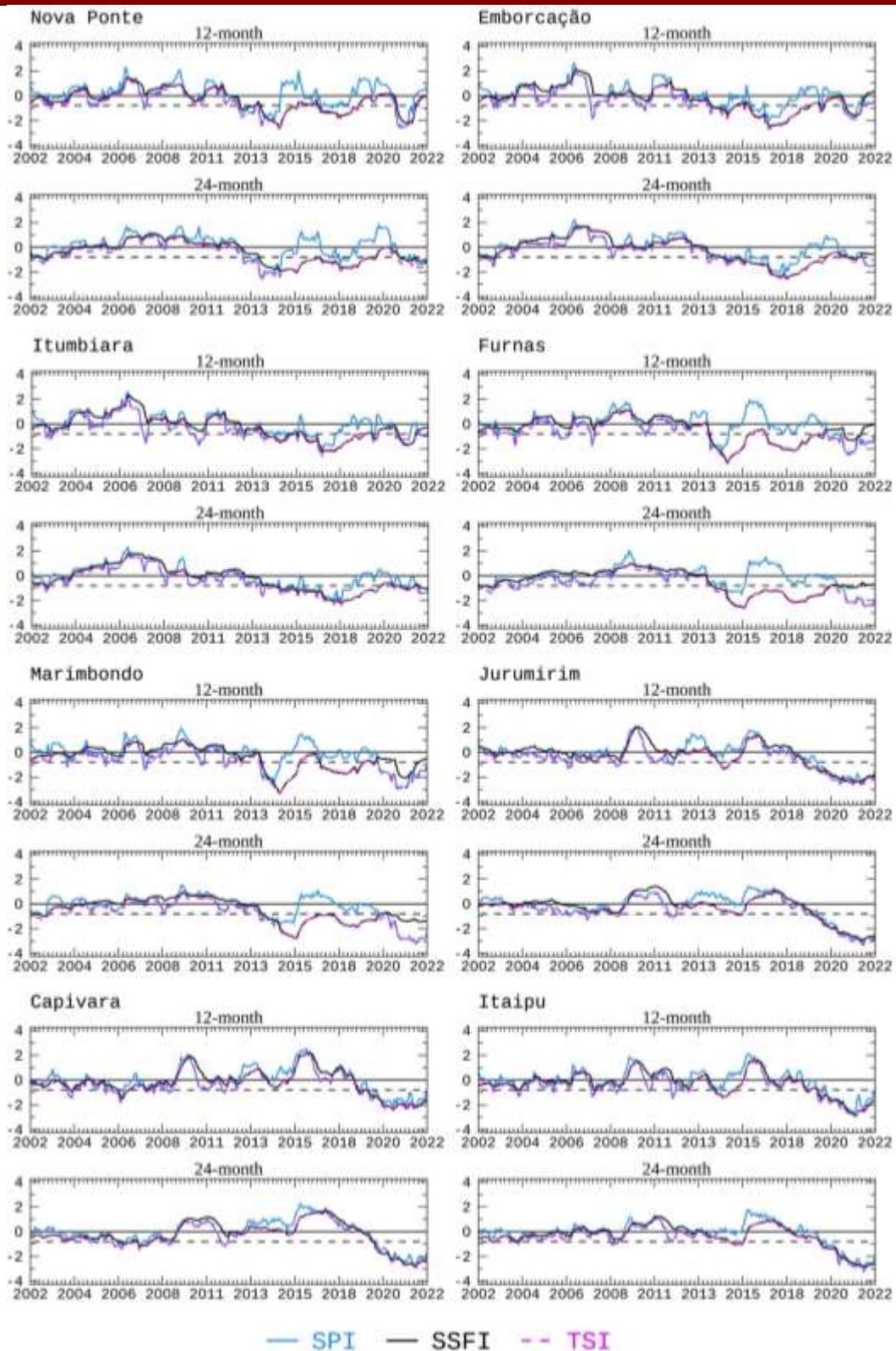
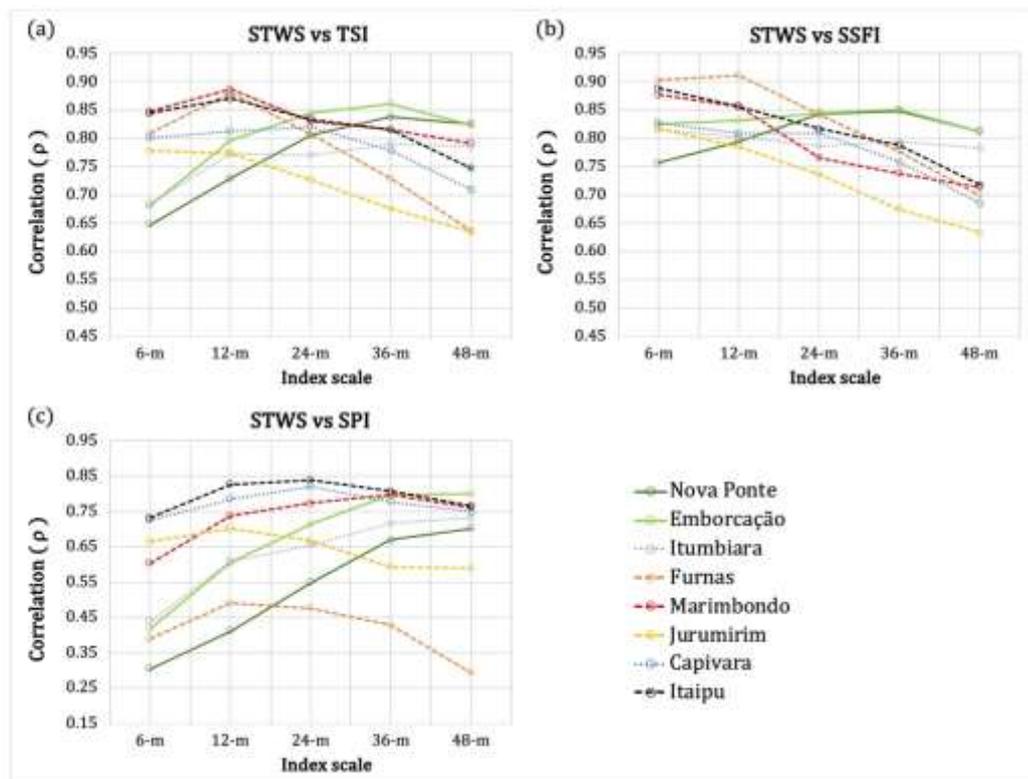


Fig. 7 – Series temporais do SPI, SSFI e TSI, no período de 2002 a 2022, em escalas de tempo de 12 e 24 meses, para todas as bacias. A linha tracejada preta corresponde ao valor -0,8, abaixo da qual se considera uma condição de seca.

A avaliação do TSI com variáveis hidrológicas derivadas de sensoriamento remoto, como o TWS do GRACE, e dados de profundidade do lençol freático estimados por meio do

modelo HAND, permitiu uma análise mais robusta da dinâmica de armazenamento de água na bacia. A forte correlação entre o TSI, o SSFI e o TWS (Figura 8) revelou que índices que incorporam múltiplas variáveis são mais eficazes na representação dos diferentes componentes do ciclo hidrológico durante eventos de seca. Além disso, a utilização de dados piezométricos e análise da relação entre áreas com HAND superior a 15 metros e a profundidade do lençol freático reforçaram a importância de incorporar informações do subsolo na avaliação de secas hidrológicas, especialmente em áreas críticas de recarga e armazenamento. Esses resultados enfatizam a importância de integrar indicadores e múltiplas variáveis, como armazenamento de água terrestre, 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, o que pode fornecer subsídios importantes para a tomada de decisão por parte dos gestores públicos.



**Fig. 8** – Correlação ( $\rho$ ) entre o armazenamento total de água terrestre (STWS) do GRACE e (a) Índice Padronizado Bivariado (TSI), (b) Índice Padronizado de Vazão (SSFI) e (c) Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em escalas de tempo de 6, 12, 24, 36, e 48 meses.

Baseado em variáveis amplamente disponíveis, como precipitação e vazão — elementos centrais para o setor hidrelétrico e para a gestão dos recursos hídricos de modo geral — o TSI oferece uma abordagem abrangente para a avaliação de secas que pode ser adaptada a diferentes escalas temporais e espaciais. Sua robustez metodológica, aliada à relevância hidrológica dos dados que o fundamentam, torna o TSI uma ferramenta promissora para uso operacional no monitoramento e mitigação dos impactos da seca, especialmente no apoio ao planejamento e tomada de decisão em diversos cenários de escassez hídrica ou de mudanças climáticas. Ao possibilitar intervenções mais oportunas e o delineamento de estratégias de mitigação mais eficazes, o índice se consolida como um instrumento de valor estratégico para o planejamento integrado dos setores de água e energia. Nesse sentido, sua contribuição para o aprimoramento do monitoramento das secas hidrológicas

no Brasil é particularmente relevante, destacando-se como uma solução prática, acessível e tecnicamente robusta. A consolidação de sistemas de previsão mais eficazes, capazes de responder com agilidade às crescentes pressões impostas pelas mudanças climáticas e pela intensificação do uso da água, dependerá diretamente do avanço contínuo das pesquisas na área, do desenvolvimento de novas abordagens de modelagem e da ampliação da disponibilidade e qualidade dos dados hidrometeorológicos.

Apesar dos avanços representados por índices como o TSI, a escassez de dados *in situ* e de séries históricas longas e consistentes para variáveis hidrológicas fundamentais ainda constitui um desafio relevante em diversas regiões do país. Essa limitação compromete não apenas a caracterização precisa dos regimes hidrológicos locais, mas também a capacidade de validar e calibrar indicadores com maior robustez estatística. Nesse contexto, a modelagem hidrológica emerge como uma alternativa estratégica para suprir lacunas de informação, permitindo a simulação de processos em áreas com baixa densidade de monitoramento e contribuindo para o desenvolvimento de ferramentas analíticas mais abrangentes. A integração entre modelos hidrológicos, dados observacionais e produtos derivados de sensoriamento remoto configura-se, portanto, como um caminho essencial para fortalecer a capacidade de diagnóstico e previsão de secas hidrometeorológicas, ampliando o alcance e a eficácia das ações de monitoramento e gestão dos recursos hídricos frente aos desafios impostos pelas mudanças no clima e pelo uso intensivo da água.

## **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 (Figura 9), 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 á 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).

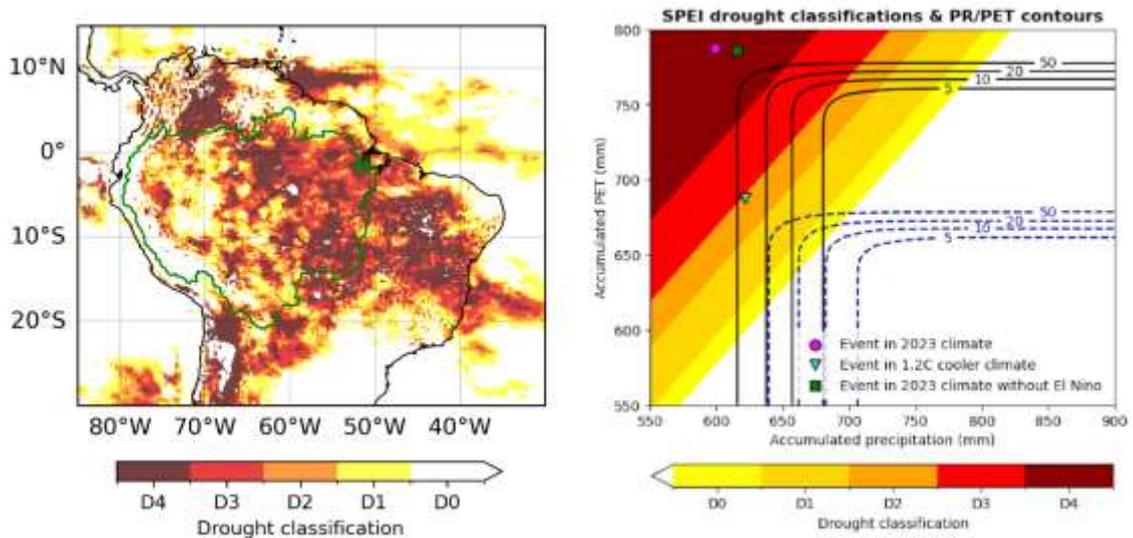


Fig. 9 – Seca na Amazônia: SPEI de 6 meses (SPEI-6) sobre a Bacia do Rio Amazonas (destacada em azul), de junho a novembro de 2023, categorizada de acordo com o sistema US Drought Monitor (esquerda); Distribuição conjunta da precipitação acumulada de 6 meses e PET com a classificação de seca SPEI correspondente (direita). Os contornos sólidos indicam períodos de retorno sob a distribuição conjunta no clima atual, enquanto os contornos tracejados indicam os mesmos períodos de retorno em um clima 1,2°C mais frio. Os contornos sombreados representam diferentes níveis de severidade da seca. O círculo magenta indica a seca de 2023 no clima atual; o triângulo turquesa mostra um evento de severidade equivalente em um clima 1,2°C mais frio; e o quadrado verde mostra um evento de severidade equivalente no clima de 2023, mas com uma fase ENSO neutra.

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 (Figura 10) 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 – Figura 11). 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 (Figura 12). 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 (Figuras 13 e 14).

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](http://www.georisk.cemaden.gov.br)).

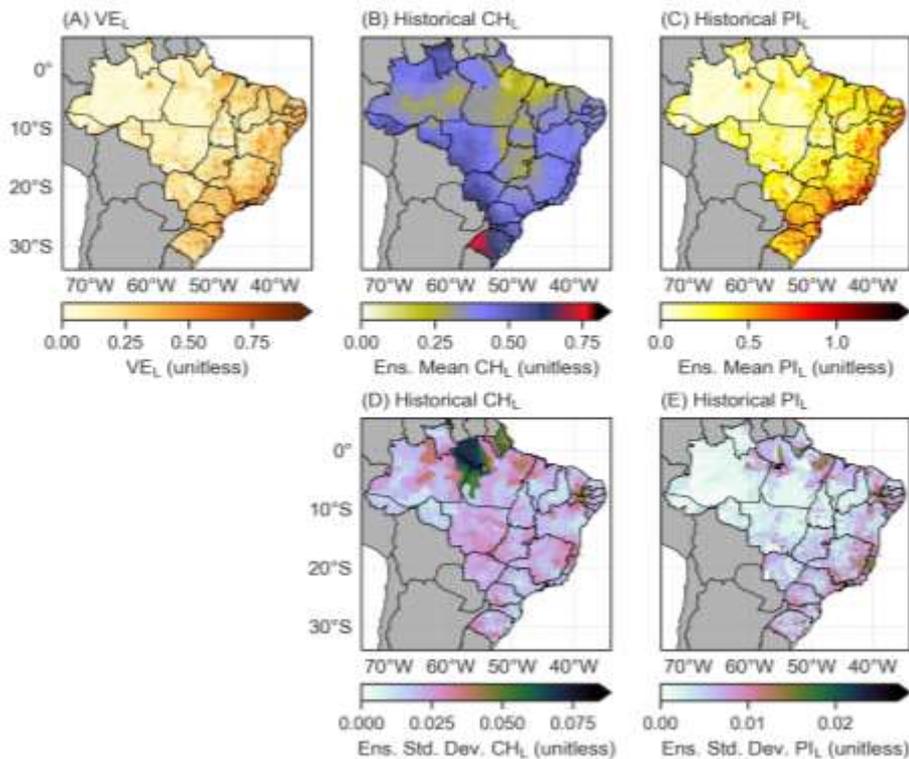


Fig. 10 – Distribuição geográfica de (A) o índice de vulnerabilidade-exposição para deslizamentos de terra (VEL), (B, D) a média e o desvio padrão do conjunto de modelos para o índice histórico de ameaças climáticas para deslizamentos de terra (CHL), respectivamente, bem como (C, E) a média e o desvio padrão do conjunto de modelos para o índice histórico de impacto potencial para deslizamentos de terra (PIL).

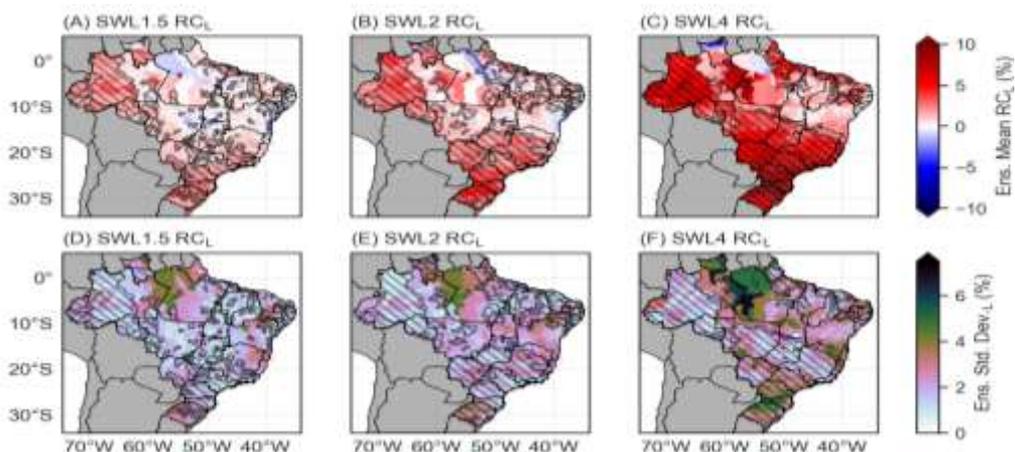


Fig. 11 – Distribuição geográfica das mudanças relativas da média (parte superior) e do desvio padrão (parte inferior) do índice de impacto potencial para deslizamentos de terra (RCL) em relação ao período histórico para diferentes cenários: (A,D) SWL1,5°C; (B,E)

SWL2°C; e (C,F) SWL4°C. O padrão de hachura representa áreas onde a concordância de sinais entre os modelos apresenta valores acima ou abaixo de +66% ou -66%, respectivamente.

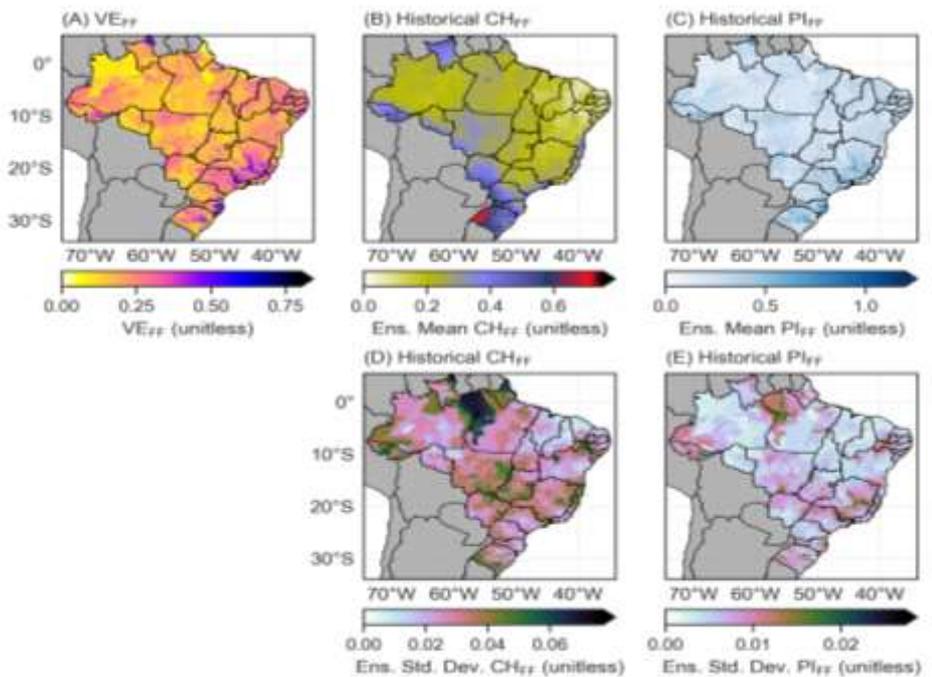


Fig. 12 – Distribuição geográfica de (A) o índice de vulnerabilidade-exposição para inundações bruscas, enxurradas e alagamentos (VEFF), (B,D) a média e o desvio padrão do conjunto de modelos para o índice histórico de ameaças climáticas para inundações bruscas, enxurradas e alagamentos (CHFF), respectivamente, assim como (C,E) a média e o desvio padrão do conjunto de modelos para o índice histórico de impacto potencial para inundações bruscas, enxurradas e alagamentos (PIFF).

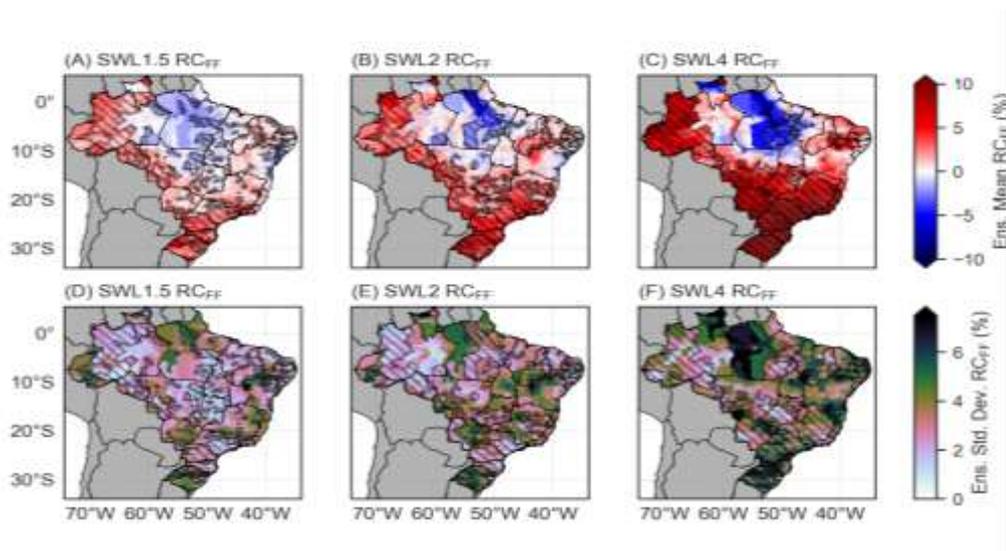


Fig. 13 – Distribuição geográfica da média (parte superior) e do desvio padrão (parte inferior) das mudanças relativas do índice de impacto potencial para inundações bruscas, enxurradas e alagamentos (RCFF) em relação ao período histórico para diferentes cenários: (A,D) SWL1,5°C; (B,E) SWL2°C; e (C,F) SWL4°C. O padrão de hachura

indica áreas onde a concordância de sinais entre os modelos apresenta valores acima ou abaixo de +66% ou -66%, respectivamente.

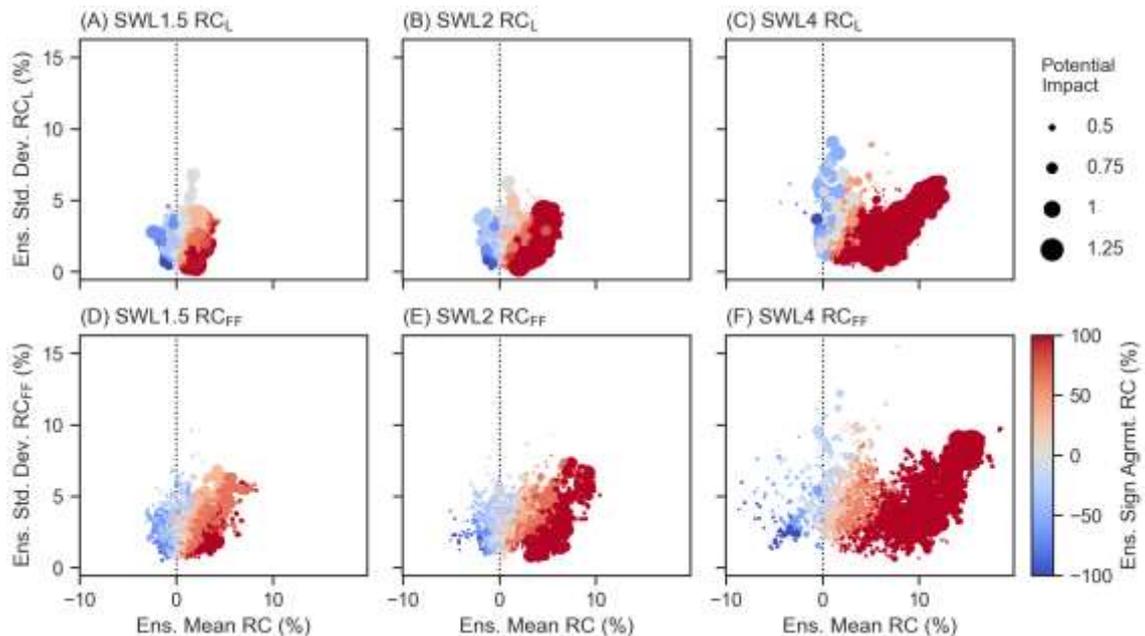


Fig. 14 – Gráfico de dispersão da mediana do conjunto de modelos (eixo x) e do desvio padrão (eixo y) das mudanças relativas do impacto potencial em relação ao período histórico para deslizamentos de terra (parte superior) e inundações bruscas, enxurradas e alagamentos (parte inferior) em diferentes cenários: (A,D) SWL1,5°C; (B,E) SWL2°C; e (C,F) SWL4°C. A cor da bolha representa a concordância de sinais entre os modelos. O tamanho da bolha é proporcional ao impacto potencial alcançado em cada cenário.

## 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.

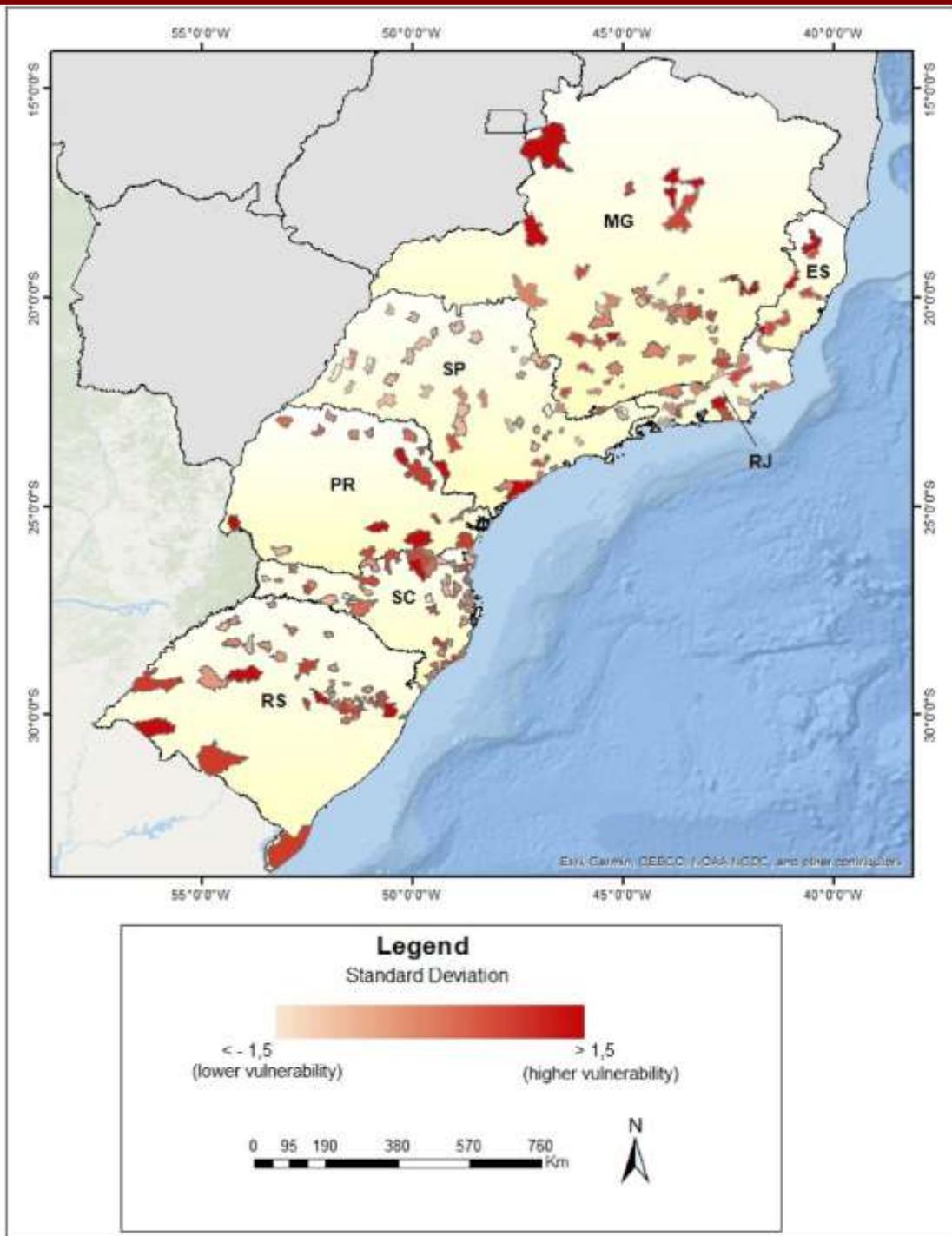


Fig. 15 – Distribution of overall municipalities related to all municipalities analyzed. Source: Ribeiro et al. (2021).

## 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.

**Quadro 1. Danos e prejuízos totais para o setor de educação**

Período dos dados	Entre 1991 e 2024
Nº de eventos (todos da COBRADE)	71.929
Nº de escolas danificadas	75.074
Nº de escolas destruídas	3.815
Valor total dos danos materiais ((DM	R\$ 3.279.344.782,74
Valor total dos prejuízos públicos (PP)	R\$ 2.999.248.878,05
DM e PP por desastres hidrológicos	R\$ 3.350.683.736,20
DM e PP por desastres geológicos	R\$ 151.883.527,54
DM e PP por desastres meteorológicos	R\$ 2.408.940.423,39

Fonte: produzido no escopo do projeto INCT-MC Fase 2 a partir de dados S2iD.

As chuvas intensas causaram o maior impacto em termos de danos materiais, totalizando no período mais de um trilhão de reais (R\$ 1.132.212.288,32). Já as inundações foram responsáveis por cerca de um trilhão de reais em prejuízos públicos (R\$ 995.449.483,30). O maior número de escolas danificadas (50.215) está relacionado com vendavais, e o maior número de escolas destruídas (1389) está relacionado com inundações.

Concernente ao grau de exposição de escolas a inundações e deslizamentos, utilizando-se dados do Censo Escolar do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP 2023) e mapeamento de áreas de risco geológico e hidrológico do Serviço Geológico do Brasil para o recorte de 1038 municípios monitorados pelo CEMADEN, observou-se que pelo menos 1312 escolas ativas estão localizadas em área de risco geológico (ARG), 1807 em área de risco hidrológico (ARH) e 2927 (ARGH) estão expostas a ambos os tipos de risco, bem como um total de 30235 escolas localizadas em até 1km da ARG, 25583 da ARH e 41608 da ARGH. São Paulo é o estado com maior número de escolas em área de risco ou localizadas em até 1km de distância: ARG = 550, 10104; ARH = 427, 7937; e ARGH = 936, 12922 escolas, respectivamente. Entre 45% e 48% são escolas municipais; entre 30 e 35% são particulares e 20% são estaduais.

Especificamente no que se refere ao grau de exposição e impacto potencial sobre escolas no estado do Rio Grande do Sul, avaliação recente apontou que no cenário climático anual esperado para os 39 municípios monitorados pelo CEMADEN (dados até maio de

2024), 118 escolas estão localizadas em áreas de risco hidrológico (ARH), ou seja, exatamente na mesma posição dessas áreas, a 0 metros de distância. Esse número foi obtido através da sobreposição do mapeamento das escolas (elaborado pelo CEMADEN com base em endereços do Censo Escolar INEP 2023) com o mapeamento das áreas de risco (realizado pelo CPRM entre 2014 e 2024 e revisado pelo CEMADEN). Além disso, considerando escolas situadas a até 1 km dessas áreas de risco, o total chega a 1.278 escolas, o que representa aproximadamente 42% do total de escolas nesses municípios (Figura 16).

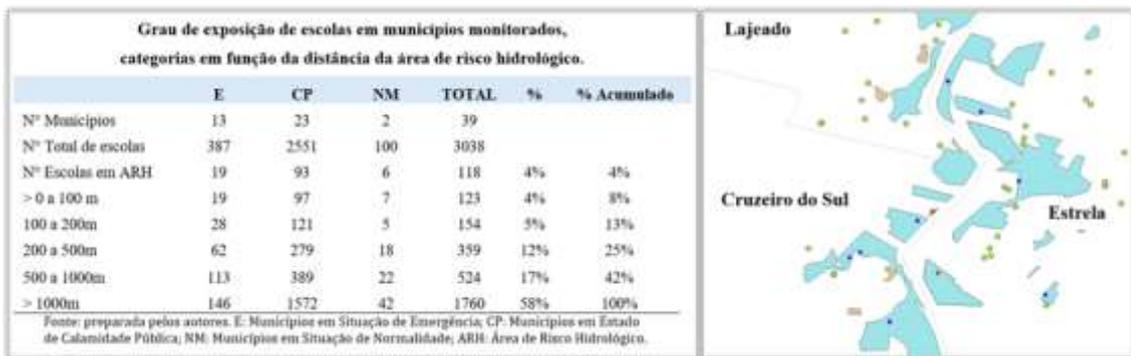
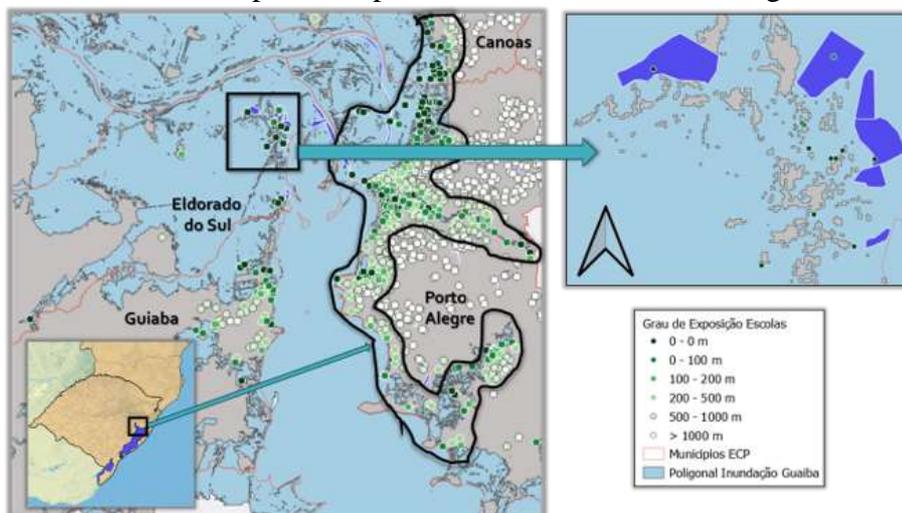


Fig. 16 – Grau de exposição de escolas a riscos hidrológicos em municípios monitorados pelo CEMADEN (até 2024), considerando um cenário anual esperado. **Esquerda:** tabela com informação desagregada por município, considerando os que tiveram declaração de emergência (E), estado de calamidade pública (CP) ou mantiveram sua normalidade (NM) no contexto do evento extremo de 2024. **Direita:** Excerto do mapa de exposição; os pontos azuis representam escolas localizadas nas áreas de risco hidrológico e as verdes representam escolas próximas dessas áreas.

No cenário extremo de chuvas e inundações ocorrido no Rio Grande do Sul, entre o final de abril e início de maio de 2024, o número de escolas afetadas foi estrondosamente maior do que a pior situação prevista para um cenário normal. Nesse cenário, somente considerando os 95 municípios que declararam estado de calamidade pública (95 municípios), 513 escolas ficaram dentro da mancha de inundação, e um total de 2841 escolas estavam localizadas em até 1km dessa mancha (Figura 17). Tal informação é importante porque enquanto escolas dentro da área de risco ou dentro da mancha de inundação recebem o impacto direto numa emergência, aquelas próximas podem ser afetadas indiretamente, por exemplo sendo utilizadas como abrigo.



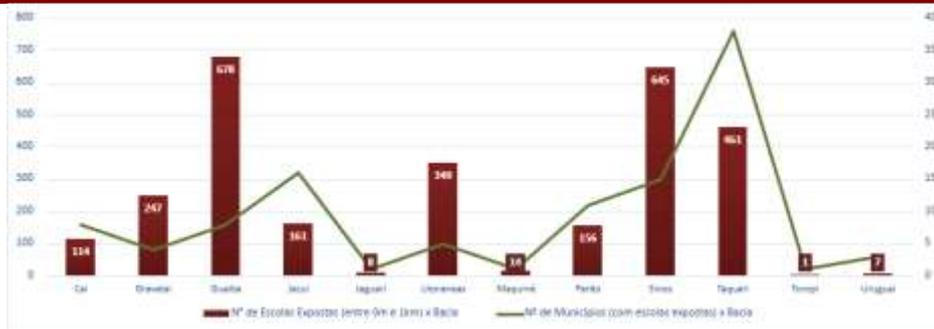


Fig. 17 – Grao de exposição de escolas a riscos hidrológicos em municípios declarados em estado de calamidade pública pelo evento extremo de maio de 2024 no Rio Grande do Sul. **Acima:** Excerto do mapa de exposição nesse cenário, com destaque para uma área onde tanto as escolas localizadas dentro das áreas de risco mapeadas como as escolas próximas dessas áreas ficaram submersas na mancha de inundação. **Abaixo:** Distribuição de escolas expostas x bacia.

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.

**Quadro 2.** Ranking dos dez municípios com os maiores prejuízos potenciais à infraestrutura

Município	Infraestrutura		
	Reconstruio total	Danificado 50%	Danificado 25%
Porto Alegre	R\$29.343.243	R\$14.671.622	R\$7.335.811
Canoas	R\$11.067.568	R\$5.533.784	R\$2.766.892
São Leopoldo	R\$5.108.108	R\$2.554.054	R\$1.277.027
Guaba	R\$2.724.324	R\$1.362.162	R\$681.081
Lajeado	R\$1.759.459	R\$879.730	R\$439.865
Eldorado do Sul	R\$1.475.676	R\$737.838	R\$368.919
Cachoeirinha	R\$1.248.649	R\$624.324	R\$312.162
Mum	R\$1.021.622	R\$510.811	R\$255.405
Estrela	R\$794.595	R\$397.297	R\$198.649
So Sebasto do Ca	R\$794.595	R\$397.297	R\$198.649
<b>Total 24 municípios</b>	<b>R\$60.559.459</b>	<b>R\$30.279.730</b>	<b>R\$15.139.865</b>

**Quadro 3.** Ranking dos dez municípios com os maiores prejuízos potenciais  equipamentos

Município	Infraestrutura		
	Reposição total	Danificado 50%	Danificado 25%
Estrela	R\$284.817.297	R\$142.408.648	R\$35.602.162

Triunfo	R\$249.073.683	R\$124.536.842	R\$31.134.210
Porto Alegre	R\$4.430.227	R\$2.215.113	R\$553.778
Canoas	R\$2.162.767	R\$1.081.383	R\$270.346
São Leopoldo	R\$882.721	R\$441.360	R\$110.340
Eldorado do Sul	R\$384.472	R\$192.236	R\$48.059
Lajeado	R\$381.594	R\$190.797	R\$47.699
Guaíba	R\$367.212	R\$183.606	R\$45.901
São Sebastião do Caí	R\$317.001	R\$158.501	R\$39.625
Roca Sales	R\$221.965	R\$110.982	R\$27.746
<b>Total 24 municípios</b>	<b>R\$544.568.442</b>	<b>R\$272.284.221</b>	<b>R\$68.071.055</b>

Por definição, os impactos acontecem quando há interação entre ameaças e elementos expostos. Os danos previstos para um cenário anual são muito menores aos danos previstos para um cenário extremo. Considerando que este último cenário está se tornando mais frequente, os processos de mitigação, prevenção e preparação para emergências, assim como os processos de adaptação às mudanças climáticas devem considerar os dois cenários e planejar, preferencialmente, com base em cenários extremos.

O relatório de danos informados pela defesa civil, referente ao evento de maio de 2024 no RS, apontou que o setor da educação teve aproximadamente 400 milhões de reais em impactos diretos, relacionados às 190 escolas. Tais dados correspondem à infraestrutura e equipamentos das escolas afetadas, mas não inclui os impactos indiretos, nem os de longo prazo (Quadro 4). Além disso, os relatórios da SEDUC-RS apontam números maiores. Ainda que subestimados, os dados da defesa civil mostram a gravidade da situação para o setor, e a necessidade de uma gestão de riscos e desastres centrada nas escolas e na comunidade escolar.

**Quadro 4.** Relatório de danos informados sobre evento de 2024 em Rio Grande do Sul:

recorte de informações sobre o setor escolar

Mesorregião	Escolas danificadas	Escolas destruídas	Danos materiais	Prejuízos públicos
Centro Ocidental Rio Grandense	10	1	R\$200.000,00	--
Centro Oriental Rio Grandense	26	0	R\$17.067.492,88	R\$69.087.263,00
Metropolitana Porto Alegre	129	0	R\$277.637.665,00	R\$14.610.000,00
Nordeste Rio Grandense	10	0	R\$22.001,00	R\$32.000,00
Noroeste Rio Grandense	14	0	R\$297.500,00	R\$12.500,00
Sudeste Rio Grandense	0	0	--	R\$200.000,00
Sudoeste Rio	0	0	--	--

Grandense				
<b>Total</b>	<b>189</b>	<b>1</b>	<b>R\$295.224.658,88</b>	<b>R\$83.941.763,00</b>

Fonte: base de dados S2iD

## **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 provê 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).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, E., Marengo, J. A., Mantovani, J., Londe, L. R., San, R. L. Y., Park, E., Lin, Y. N., Wang, J., Mendes, T., Cunha, A. P., Pampuch, L., Seluchi, M., Simões, S., Cuartas, L. A., Goncalves, D., Massi, K., Alvalá, R., Moraes, O., Filho, C. S., Mendes, R., and Nobre, C.: Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1157–1175, 2023. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1157-2023>
- Alvalá, R. C. S.; Barbieri, A. Desastres Naturais. In: Nobre, C. and Marengo, J. (Eds), *Mudanças Climáticas em Rede: um olhar interdisciplinar. Contribuições do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas*. Canal6 Editora, Bauru, SP, 2017a, p. 203-230.
- Alvalá, R. C. S.; Cunha, A. P. M. A.; Brito, S. S. B.; Seluchi, M. E.; Marengo, J. A.; Moraes, O. L. L.; Carvalho, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. 2017b. *Print version* ISSN 0001-3765. *On-line version* ISSN 1678-2690. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- Alvalá, R. C. dos S.; Ribeiro, D. F.; Marengo, J.; Seluchi, M. E.; Gonçalves, D. A.; da Silva, L. A.; Cuartas Pineda, L. A.; Saito, S. M.. Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: vulnerabilities and risk management capabilities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, August 2024a, 104645. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104645>
- Alvalá, R. C. S. VULNERABILIDADE DOS BIOMAS BRASILEIROS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. In: Celso Pansera, Ima Vieira, Luiz Davidovich, Fernando Peregrino (Org). *Inundações, seca e fogo: o alerta dos biomas – uma contribuição à COP30*. 1ed. São Paulo: Expressão Popular, 2025, p. 53-62. ISBN 978-65-5891-165-4 (MCTI /FINEP).
- Anderson, L.O. et al. (2018). Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373(1760), 20170411. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0411>
- Aragão, L.E.O.C. et al. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9, 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Bhuiyan, C. et al. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.10.002>
- Banco Mundial. Avaliação de perdas e danos: inundações e deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro – Janeiro de 2011. Brasília, Banco Mundial. 2012.

Borges, P. A.; Bernhofer, C.; Rodrigues, R.R. Extreme rainfall indices in Distrito Federal, Brazil: trends and links with ENSO and MJO. *International Journal of Climatology*, 38, 4550-4567, 2018.

Brito, S. S. B.; Cunha, A. P. M. A.; Cunningham, C. C.; Alvalá, R. C. S.; Marengo, J. A.; Araujo Carvalho, M. Frequency, duration and severity of drought in the Brazilian Semi-arid region. *International Journal of Climatology*. V. 23, p. 200-213, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>.

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, CEPAL. 2014. Manual para la Evaluación de Desastres. (LC/L.3691), Santiago, Chile. Publicación de las Naciones Unidas. 322 páginas. Disponible [en línea] <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35894/>.

Cuartas, L. A.; Thais Fujita, Juliana Andrade Campos, Cintia Bertacchi Uvo, Gholamreza Nikravesh, Jonas Olsson, Johanna Sörensen, José Antonio Marengo, Diogo Amore, Elisângela Broedel, Jerusa Peixoto, Hydrometeorological drought analysis through Two-variate Standardized Index for the Paraná River Basin, Brazil, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 54, 2024, 101886, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101886>.

Cunha, A. P. M. A.; Zeri, L. M. M.; Deusdará Leal, K.; Costa, L. Cuartas, L. A.; Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Vieira, R. M. S. P.; Barbosa, A. A.; Castro, C. C.; Garcia, J. V. C.; Broedel, E.; Alvalá, R. C. S.; Ribeiro-Neto, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 2019a, v. 10, p. 642; doi:10.3390/atmos10110642. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.

Cunha, A. P. M. A.; Tomasella, J.; Ribeiro-Neto, G. ; Brown, M. ; Garcia, S. R.; Brito, S.B.; Carvalho, M. A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*, v. 19, p. e855, 2018.

Cunha, A. P. M. A.; Marchezini, V.; Lindoso, D. P.; Saito, S. M., Alvalá, R. C. S. The challenges of Consolidation of a Drought-Related Disaster Risk Warning System to Brazil (Desafios para a Consolidação de um Sistema de Alerta de Risco de Desastre Associado às Secas no Brasil). *Sustentabilidade em Debate*, v. 10, p. 43-76, 2019b. ISBN/ISSN 2179-9067.

Cunningham, C. A. C.; Cunha, A. P. M. A.; Brito, S. S. B. Climate change and drought. In: Ben Wisner, Victor Marchezini, Silvia Saito, Luciana Londe. (Org.). *REDUCTION OF VULNERABILITY TO DISASTERS: FROM KNOWLEDGE TO ACTION*. 1ed. São Carlos: Rima, 2017, 1, 5-624.

Cunha, A.P.M.A. et al. (2019). Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>

Deusdará-Leal, K.R. et al. (2019). Implication of the new operation rules for Cantareira System: Re-reading of the 2014/2015 water crisis. *Water Resources Research*, 55(11), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2019WR025255>

Deusdará-Leal, K. R.; Cuartas, L. A.; Zhang, R.; Mohor, G. S.; De Castro Carvalho, L. V.; Nobre, C. A.; Mendiondo, E. M.; Broedel, E.; Seluchi, M. E.; Dos Santos Alvalá, R. C. Implications of the New Operational Rules for Cantareira Water

System: Re-Reading the 2014-2016 Water Crisis. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 12, n. 04, p. 261–274, 2020. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.124016>

Dias, M. C. A.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S.; Stenner, C.; Pinho, G.; Nobre, C. A.; Fonseca, M. R. S.; Santos, C.; Amadeu, P.; Silva, D.; Lima, C. O.; Ribeiro, J.; Nascimento, F.; Corrêa, C. O. Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, June, 31 (2018) 449–459, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.002>

Dias, M. C. A.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S.; Seluchi, M.; Bernardes, T.; Camarinha, P. I. M.; Stenner, C.; Nobre, C. Vulnerability Index Related to Populations at Risk for Landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). **International Journal of Disaster Risk Reduction**, June 21, 2020. IJDRR\_2020\_73.

<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101742>. Volume 49, October 2020, 101742.

Fernandes, L.G.; Rodrigues, R.R. Changes in the patterns of extreme rainfall events in southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 38, 1337-1352, 2017.

Fernandes, Valesca Rodriguez; Cunha, Ana Paula Martins do Amaral, Cuartas Pineda, Luz Adriana; Leal, Karinne R. Deusdará; Costa, Lidiane C.O.; Broedel, Elisangela; França, Daniela de Azeredo; Alvalá, Regina Célia dos Santos; Seluchi, Marcelo E.; Marengo, Jose. Secas e os Impactos na Região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 17 – Vol. 28 – JAN/JUN 2021, páginas 561-584. ISSN: 2237-8642 (Eletrônica), DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.74717>

Getirana, A. (2016). Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. *Journal of Hydrometeorology*, 17(2), 591-599. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS

ANÍSIO TEIXEIRA, INEP. (2024). Censo Escolar 2023. Microdados. Disponível em <https://www.gov.br/inep/pt-br/assuntos/noticias/censo-escolar/mec-e-inep-divulgam-resultados-do-censo-escolar-2023>. Consultado em junho de 2025.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. The Working Group II contribution to the IPCC Sixth Assessment Report assesses the impacts of climate change, looking at ecosystems, biodiversity, and human communities at global and regional levels. It also reviews vulnerabilities and the capacities and limits of the natural world and human societies to adapt to climate change. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Consultado em junho de 2025.

Jiménez-Muñoz, J.C. et al. (2016). Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. *Scientific Reports*, 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>

JIMENEZ, J. C. et al. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, vol. 12, 2019. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>

Marchezini, V.; Wisner, B. 2015. Challenges for vulnerability reduction in Brazil: Insights from the PAR framework. P.57-96. In: Victor Marchezini, Ben Wisner,

- Luciana R. Londe e Silvia M. Reduction of Vulnerability to Disasters: From Knowledge to Action. 620p. Ed. Rima. ISBN 978-85-7656-050-0.
- Marengo, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parc. Estratégicas*, 13(27): 149-176, 2008.
- Marengo, J. A.; Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*. 36, 1033–1050, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J.A., Torres, R.R. and Alves, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1189–1200. 2017a.
- Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Alvalá, R. C. S.; Cunha, A. P.; Brito, S. S.; Moraes, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Online version, 1–13, 2017b.
- Marengo J. A.; Jr, Souza C.; Thonicke, K.; Burton, C.; Halladay, K.; Betts, R. A.; Alves, L. M.; Soares, W. R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* 6:228, 2018.
- Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Cuartas, L. A.; Deusdará Leal, K. R.; Broedel, E.; Seluchi, M. E.; Michelin, C. M.; De Praga Baião, C. F.; Chuchón Ângulo, E.; Almeida, K.; Kazmierczak, M. L.; Mateus, N. P. A.; Silva, R. C.; Bender, F. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020a: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water*, 2021. 3:639204. doi: 10.3389/frwa.2021.639204
- Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Ambrizzi, T.; Young, A.; Barreto, N.J.C.; Ramos, A.M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2020b. 1472, 5–20, <https://doi.org/10.1111/nyas.14307>
- Marengo, J.A.; Ambrizzi, T.; Alves, L.M. ; Barreto, N.J.C.; Simões Reboita, M.; Ramos, A.M. Changing trends in rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo: causes and impacts, *Frontiers in Climate* 2 (2020c) 1–13, <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.00003>.
- Marengo, J. A.; Rodrigues-Filho, S.; Santos, D. V. Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Brazil: an integrated approach. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, p. 14-23, 2021a.
- Marengo, J. A.; Camarinha, P. I.; Alves, L. M.; Diniz, F.; Betts, R. A. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*, v. 3, p. 1-17, 2021b.
- Marengo, J. A.; Seluchi, M. E. ; Cunha, A. P.; Cuartas, L. A.; Goncalves, D.; Sperling, V. B.; Ramos, A. M. ; Dolif, G.; Saito, S.; Bender, F.; Lopes, T. R.; Alvalá,

R. C. ; Moraes, O. L. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November-December 2021. *Natural Hazards*, v. 115, p. 1, 2023a.

Marengo, J. A.; Alcantara, E.; Cunha, A. P.; Seluchi, M.; Nobre, C. A. ; Dolif, G.; Goncalves, D.; Assis Dias, M.; Cuartas, L. A.; Bender, F.; Ramos, A. M.; Mantovani, J. R.; Alvalá, R. C.; Moraes, O. L. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25-28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather and Climate Extremes*, v. 25, p. 100545, 2023b.

Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Seluchi, M. E.; Camarinha, P. I.; Dolif, G.; Sperling, V. B.; Alcântara, E. H.; Ramos, A. M.; Andrade, M. M.; Stabile, R. A.; Mantovani, J.; Park, E.; Alvalá, R. C.; Moraes, O. L.; Nobre, C. A.; Goncalves, D. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th-19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, v. 56, p. 1, 2024a.

[Marengo, José A.](#); [Dolif, Giovanni](#); [Cuartas, Adriana](#); [Camarinha, Pedro](#); [Gonçalves, Demerval](#); [Luiz, Rafael](#); [Silva, Larissa](#); [Alvala, Regina C. S.](#); [Seluchi, Marcelo E.](#); [Moraes, Osvaldo L.](#); [Soares, Wagner R.](#); [Nobre, Carlos A.](#) O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Mudanças Climáticas. Estud. Av.* 38 (112) Sep-Dec 2024b. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>

Marengo, Jose A. ; Cunha, Ana P. ; Espinoza, Jhan-Carlo ; Fu, Rong ; Schöngart, Jochen ; Jimenez, Juan C. ; Costa, Mabel C. ; Ribeiro, Joao M. ; Wongchuig, Sly ; Zhao, Siyu. The Drought of Amazonia in 2023-2024. *American Journal of Climate Change*, v. 13, p. 567-597, 2024c.

Marengo, J. A.; Enner H. Alcântara, Osvaldo L. Moraes, Rodney Martinez, Marcelo Seluchi, Regina C. S. Alvalá, Giovanni Dolif, Demerval Gonçalves. Early Warning Services for Disaster Risk Reduction in Brazil: The experience of CEMADEN during the floods of Rio Grande do Sul of May 2024. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 126, 2025a. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105645>

[Marengo, J. A.](#); Costa, M. C.; Cunha, A. P.; Espinoza, J-C.; Jimenez, J. C.; Libonati, R.; Miranda, V.; Trigo, I. F.; Sierra, J. P.; Geirinhas, J. L. Ramos; A. M.; Skansi, M.; Molina-Carpio, J.; Salinas, R. Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979-2023 in central South America. *Frontiers In Climate* v. 7, p. 1, 2025b.

Nobre, C. A.; Marengo, J. A.; Seluchi, M. E.; Cuartas, L. A.; Alves, L. M. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(02), 252, 2016.

PBMC (2013). Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. COPPE/UFRJ.

Pinos, J.; Quesada-Román, A. Flood risk-related research trends in Latin America and the Caribbean, *Water* (Switzerland) 14 (2022), <https://doi.org/10.3390/w14010010>

Pismel, G. O.; Marchezini, V.; Selaya G.; De Paula, Y. A. P.; Mendoza, E.; Anderson L. O. 2023. Wildfire governance in a tri-national frontier of southwestern Amazonia: Capacities and Vulnerabilities. *IJDRR*. 86 (2023) 103529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103529>

Ribeiro, D. F.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S. Disaster vulnerability analysis of small towns in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, Volume 68, January 2022, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102726>

Ribeiro, D. F.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S. Community disaster resilience in Brazilian small urban centers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, December 13, 2023. Manuscript Number: IJDRR-D-23-02768R1. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104200>

Saito, Silvia Midori, Mariane Carvalho de Assis Dias, Regina Célia dos Santos Alvalá, Claudio Stenner, Cayo Franco, Julia Vicente Martins Ribeiro, Pilar Amadeu de Souza, and Rodrigo Amorim Souza de Moraes Santana. 2019. “População Urbana Exposta Aos Riscos de Deslizamentos, Inundações e Enxurradas No Brasil.” *Sociedade & Natureza* 31. <https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46320>.

Silva, M. R. V.; Parra, L. M. P.; Aires, M.; Cunha, A. P. M. A.; Silva, R. M. Secas Extremas no Nordeste Brasil: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Revista Contemporânea**, V.3, N.4, 2023. <https://doi.org/10.56083/RCV3N4-018>

Souza, D. B.; Souza, P. A.; Ribeiro, J. V. M.; Santana, R. A. S. M.; Dias, M. C. A.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S. Utilização de Dados Censitários Para a Análise de População Em Áreas de Risco. *Revista Brasileira de Geografia* 64 (1): 122–35. [https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375\\_2019\\_n1\\_122-135](https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2019_n1_122-135), 2019.

Souza Jr\* C. M.; Marengo, J.; Ferreira, B.; Ribeiro, J.; Schirmbeck, L. W.; Schirmbeck, J.; Hirye, M.; Cunha, A.; Wiederhecker, H. C.; Latuf, M. O. Amazon severe drought in 2023 triggered surface water loss. *Environmental Research: Climate*, Volume 3, DOI 10.1088/2752-5295/ad7c71

Rosenzweig, C.; Solecki, W. Eds., 2010: Climate change adaptation in New York City: Building a risk management response. New York City Panel on Climate Change 2010 Rep., *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1196, 354 pp.

UNISDR (2009). Drought Risk Reduction Framework and Practices: Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action. United Nations.

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY, UNGA. 2016. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. Seventy-first session. A/71/644. Disponível em [https://www.preventionweb.net/files/50683\\_oiewgreportenglish.pdf](https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf) Consultado em abril de 2025.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, UNDRR. 2022. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, GAR Special Report 2024: Forensic Insights for Future Resilience, Learning from Past Disasters. Disponível em <https://www.undrr.org/gar/gar2024-special-report>. Consultado em junho de 2025.

Vinícius B. P. Chagas, Pedro L. B. Chaffe, Günter Blöschl (2022). Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 13:5136.

Wilches-Chaux, G. La vulnerabilidad global. In: Andrew Maskrey (Ed.), Los desastres no son naturales (pp.11-41). Panamá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

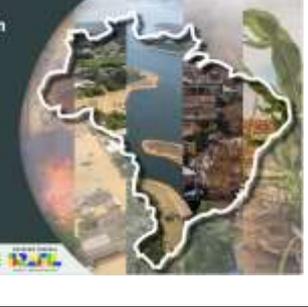
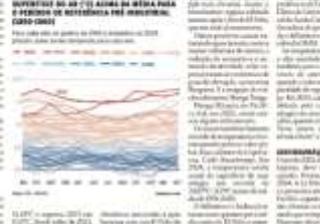
Zeri, M. et al. (2018). Tools for communicating agricultural drought over the Brazilian Semi-arid using the soil moisture index. *Water*, 10(10), 1421.  
<https://doi.org/10.3390/w10101421>

## Resumo INCT MC2 1917-2025

<b>Formacao recursos humanos</b>	<b>Numero 2017-19</b>	<b>Numero 2020-23</b>	<b>Numero 2024-25</b>	<b>Numero 2017-25</b>
Mestrados (em andamento e concluidos)	19	118	13	150
Doutorados (em andamento e concluidos)	8	116	8	132
Pos doutorados (em andamento e concluidos)	9	48	15	72
Iniciacao cientifica (em andamento e concluidos)	8	45	4	57
Bolsis Nivel Tecnico (TT, DTI) (em andamento e concluidos)	35	28	8	71
Pesquisador Visitante (PV) (em andamento e concluidos)	1	3	0	4
<b>Publicacoes</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>
Artigos cientificos em revistas internacionais	223	301	69	593
Artigos cientificos em revistas nacionais	65	73	17	155
Capitulos em livros	24	54	38	116
Livros	8	10	6	24
Produtos tecnicos (Relatorios, web sites, bases de dados)	8	78	43	129
<b>Atividades de extensao</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>	<b>Numero</b>
Cursos de curta duracao	29	30	13	72
Eventos (workshops, seminarios)	51	103	103	257
Reportagens, entrevistas	23	140	157	320

Presentations of the INCT MC2 at meetings and conferences (presential and virtual)



<p><b>A Exposição de Escolas a Inundações no Cenário de Calamidade Pública de Maio de 2024 em Municípios do Rio Grande do Sul</b></p> <p>Agulhas Negras, Vilavieja   Miraflores, Região Delta dos Santos, Arroio, Lethica, Coarata, Las Barreras, Domingos, Domonadi   São, Sotelo   Macinhato, Vitor   Wieringa, José Antônio, Ribeiro, Casarini, Tópico, Ruckert</p> <p>Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - (CENAD/INPE)</p> <p><b>Resumo</b> A exposição de Escolas a Inundações no Cenário de Calamidade Pública de Maio de 2024 em Municípios do Rio Grande do Sul, apresenta uma análise detalhada das condições de inundação em 10 municípios do Rio Grande do Sul, considerando o cenário de calamidade pública de maio de 2024. O estudo foi realizado com base em dados de simulação de inundação gerados pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) do CENAD/INPE, considerando o cenário de calamidade pública de maio de 2024. O estudo foi realizado com base em dados de simulação de inundação gerados pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) do CENAD/INPE, considerando o cenário de calamidade pública de maio de 2024.</p> <p><b>Conclusão</b> O estudo concluiu que as áreas de maior risco de inundação estão localizadas principalmente nas regiões de várzea e áreas próximas a cursos d'água. As áreas de maior risco de inundação estão localizadas principalmente nas regiões de várzea e áreas próximas a cursos d'água.</p> <p><b>Materiais e métodos</b> O estudo utilizou dados de simulação de inundação gerados pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) do CENAD/INPE, considerando o cenário de calamidade pública de maio de 2024. O estudo utilizou dados de simulação de inundação gerados pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) do CENAD/INPE, considerando o cenário de calamidade pública de maio de 2024.</p>	<p><b>O estado do clima em 2024 no Brasil e América do Sul</b></p> <p>Jose A. Marengo CGPDE-CEMADEN</p> <p>16 Janeiro 2025</p> 
<p><b>EMERGÊNCIA NA COSTA OESTE</b></p> <p><b>Calor em 2024 bateu recordes e superou previsões</b></p> <p>Centro de agronegócio e vitivinicultura no sul de São Paulo registra a primeira e segunda ondas de 1,5°C de aumento de temperatura</p>  <p><b>AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL DO SULESTE DO SU-1°C ALIADO DA MESA PARA O FORTALECIMENTO DE MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO</b></p> <p>Em 2024, o aumento da temperatura média global do sudeste do Brasil foi de 1,5°C, superando as previsões. Este aumento é atribuído a uma combinação de fatores, incluindo o efeito estufa e a redução da cobertura florestal. O aumento da temperatura média global do sudeste do Brasil foi de 1,5°C, superando as previsões.</p>  <p><b>CONCLUSÃO</b> O aumento da temperatura média global do sudeste do Brasil em 2024 é um sinal de alerta para o futuro. Este aumento é atribuído a uma combinação de fatores, incluindo o efeito estufa e a redução da cobertura florestal. O aumento da temperatura média global do sudeste do Brasil em 2024 é um sinal de alerta para o futuro.</p>	 <p><b>CONCLUSÃO GERAL</b> A COP16 em Riad, Arábia Saudita, foi um marco importante na luta contra as mudanças climáticas. O encontro reuniu líderes mundiais para discutir estratégias de redução de emissões e adaptação às mudanças climáticas. A COP16 em Riad, Arábia Saudita, foi um marco importante na luta contra as mudanças climáticas.</p>
<p><b>Sustentabilidade e a sobrevivência dos negócios e do planeta</b></p> <p><b>Mudanças climáticas e sustentabilidade na agricultura brasileira</b></p> <p><b>Flávio Assaf</b> Professor de Economia em Agronegócio na FAPESP. Coordenador de projetos de pesquisa em sustentabilidade e agricultura.</p> <p><b>Henrique Ribeiro</b> Autor do livro 'Sustentabilidade e Negócios' e fundador da empresa de consultoria em sustentabilidade.</p> <p>ABQ   FAPESP   FEN   MINISTÉRIO NI   FNQ</p>	

<p>Science and Technology at the Service of Disaster Risk Management Associated with Droughts in Brazil</p> <p>10 DEC 2024 11:00-12:30AM</p> <p>Brazil Pavilion, D14 Cemaden UNCC COP16 Rio+20 2024</p>	
<p>CONVITE</p> <p><b>GEORISK</b> SISTEMA DE PREVISÃO DE RISCO DE DESLIZAMENTOS DE TERRA</p> <p>LANÇAMENTO 17/02/2025 14h00 Horário de Brasília</p> <p>Local: Cemaden   Formato: Híbrido Estr. Dr. Altino Bandeira, 500 - Proj. Tecnológico Bairro de Melo, São José do Campestre/SP</p> <p>Transmissão pelo YouTube @comunicacao@cemaden.gov.br</p> <p>mais informações www.cemaden.gov.br</p> <p>Cemaden MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO GOVERNO FEDERAL</p>	<p>Climate Resilience &amp; Sustainability Part II - Lecture 11-21 Feb., 2024 Part II - Final exam (10:00-12:00 Feb., 2024) Instituto de Física de São Carlos - IFSC/USP Av. Trabalhador São-Carlense, 401 - Jd. Santa Luzia - São Carlos - SP - 13560-970 Contato: (51) 3301-1441   <a href="mailto:comunicacao@usp.br">comunicacao@usp.br</a>   <a href="mailto:comunicacao@usp.br">comunicacao@usp.br</a></p> <p>USP Academy</p> <p>Coordinators and Invited Scientific Trainers:</p> <p>Support: </p>
<p>LIVE SBAGRO</p> <p>Eventos climáticos extremos na agricultura Dia 26/06, às 14h</p> <p>Jose A. Marengo CEMADEN <a href="mailto:jose.marengo@cemaden.gov.br">jose.marengo@cemaden.gov.br</a></p> <p>INCT MC</p>	<p>SBAGRO AGRIBUSINESS FORUM 2025/GAF 2025</p> <p>FRANCA 11A: MEGA TENDÊNCIAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS</p> <p>Jose A. Marengo CEMADEN <a href="mailto:jose.marengo@cemaden.gov.br">jose.marengo@cemaden.gov.br</a></p> <p>INCT MC</p>

