

# INCT para Mudanças Climáticas Fase 2

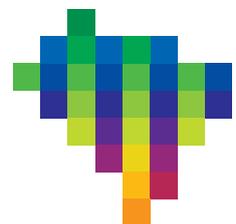


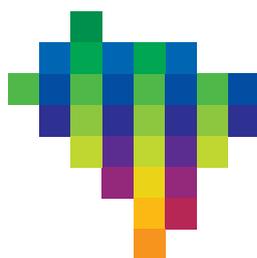
INCT PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS FASE 2  
2020.2023 | RELATÓRIO DE ATIVIDADES | BRASIL

Agosto 2023

FAPESP 2014/50848-9  
CNPq 465501/2014-1  
CAPES 88887.136402/2017-00  
INCTMCTI/CNPq/CAPES/FAPs 16/204

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





**INCTMC2**  
INCT para Mudanças  
Climáticas · Fase 2

## INCT para Mudanças Climáticas Fase 2 – Relatório de Atividades 2020-2023

### Coordenação Geral

Jose A. Marengo

### Vice-coordenação Geral

Tercio Ambrizzi

### Pesquisadores Líderes

Jose A. Marengo, CEMADEN  
Tercio Ambrizzi, IAG USP  
Alexandre Szklo, COPPE UFRJ  
Antonio Amorim, UNICAMP  
Eduardo Assad, EMBRAPA  
Eduardo Mendiondo, EESC USP  
Eduardo Haddad, FEA USP  
Elizabeth Rangel, FIOCRUZ  
Ênio B. Pereira, CCST INPE  
Jose Feres, IPEA  
Marta Barata, UFMG  
Mercedes Bustamante, UnB  
Paulo Artaxo, IF USP  
Paulo Nobre, CPTEC INPE  
Roberto Schaeffer, COPPE UFRJ  
Regina Alvala, CEMADEN  
Regina Rodrigues, UFSC  
Sergio Margulis, IPEA, Way Carbon  
Sin C. Chou, CPTEC INPE  
Susana Dias, UNICAMP  
Ulisses Confalonieri, UFMG, FIOCRUZ

### Organização, elaboração, revisão e didática de textos

Josiane Rosa

### Revisão ortográfica e gramatical

Ana Paula Soares

### Editoração eletrônica

Gabriel Sá / Magno Studio

### Fotos da capa

No sentido horário: Parque Solar São Gonçalo (PI)/Enel Green Power; Lutzomyia longipalpis/site da Prefeitura de Bragança Paulista (SP); Urbanização precária da RMSP com enxurradas e deslizamentos e flash floods atuais, onde antigamente habitavam tribos etnias Pankararé, Pankararú, Atkum, Xucurú-Kariri, Xacriabá, Wassu Cocal e Guarani/ (C) 2020 E M Mendiondo; Agricultura familiar/Embrapa.

### Sede

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN

Estrada Dr. Altino Bondesan, 500  
Distrito de Eugênio de Melo  
São José dos Campos, SP  
CEP 12247-016  
Tel.: 55 12 3205-0112  
[www.cemaden.gov.br](http://www.cemaden.gov.br)

### Apoio



### Parcerias



# INCT para Mudanças Climáticas Fase 2

2020.2023 | RELATÓRIO DE ATIVIDADES, BRASIL

FAPESP 2014/50848-9  
CNPQ 465501/2014-1  
CAPES 88887.136402/2017-00  
INCTMCTI/CNPQ/CAPES/FAPS 16/204



# Apresentação

O Brasil tem grande parte de sua economia dependente dos recursos naturais (agricultura, recursos hídricos, biodiversidade, energias renováveis, áreas costeiras, saúde, megacidades etc.), que de forma direta ou indireta vão ser afetados pelas mudanças do clima, particularmente dos extremos. As mudanças ambientais globais, consequência das mudanças climáticas, podem impor ameaça significativa ao desenvolvimento sustentável do país e à sua segurança pública. O Brasil tem como objetivo de longo prazo o desenvolvimento social-econômico- político-ambiental, assim como o de reduzir injustiças sociais e regionais. Isso gera uma série de desafios sobre como gerenciar os abundantes recursos naturais e o que deve ser distribuído à população em forma sustentável, mesmo em situações ambientais extremas.

O estabelecimento de uma agenda científica em mudanças globais, relevante para o Brasil e América do Sul, mas com ramificações regionais, faz parte dos objetivos da Rede Clima, do Programa Fapesp de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG) e também deste INCT para Mudanças Climáticas FASE 2 (INCT-MC2). Esses programas constituem os pilares científicos do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e de planos similares dos estados, e irão prover os fundamentos do conhecimento científico e das inovações tecnológicas para lidar com problemas complexos da governança do sistema terrestre, sendo que esta agenda se aplica na interface das mudanças ambientais e desenvolvimento regional.

Consideramos que este projeto é e será um pilar da implementação de uma agenda científica ambiental com aplicações práticas na definição de políticas públicas ambientais. Um resultado central deste projeto será aumentar o entendimento dos

impactos e riscos das mudanças climáticas para o presente e futuro, fazendo uso do estado da arte em modelagem climática para geração de cenários futuros de clima.

Até o momento, a agenda científica do INCT-MC2 foi desenvolvida conforme planejado, começando em 2017 e a terminar em 2025. Esta agenda proporciona excelência científica em várias áreas das mudanças ambientais globais e suas implicações para o desenvolvimento sustentável. A ênfase nos impactos das mudanças climáticas globais 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, ao setor acadêmico, indústria, negócios e governo, pode contribuir para manter a excelência nas atividades em Ciência, Tecnologia e Inovação como eixo do desenvolvimento ambiental sustentável, com caráter integrador e inovador.

Este projeto inclui a transferência de conhecimento utilizando instrumentos que vão além dos artigos científicos, produzindo materiais audiovisuais, ferramentas baseadas na web e outros meios que fomentam a educação e cultura científica da população, melhorando o impacto da ciência brasileira e possibilitando maior integração internacional do Brasil nas negociações ambientais.

## **Jose A. Marengo**

Coordenador, INCT para Mudanças Climáticas  
Fase 2  
Cemaden

## **Tercio Ambrizzi**

Coordenador, INCT para Mudanças Climáticas  
Fase 2  
IAG USP



# Índice

INCT PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS FASE 2  
RELATÓRIO DE ATIVIDADES

# 2020.2023

Apresentação.....	05
Introdução.....	08
Objetivos e metas.....	10
Coordenação.....	11
Coordenadores das componentes do INCT-MC2.....	12
Estrutura organizacional.....	14
Contextualização e importância do projeto.....	16
Integração entre as componentes do projeto.....	18
Contribuições científicas e análise da situação ambiental atual e pretendida.....	19
Formação de Recursos Humanos.....	23
Principais resultados do INCT-MC2 por componente, de 2020 a 2023.....	25
Segurança alimentar.....	26
Segurança hídrica.....	30
Saúde e mudanças climáticas.....	34
Segurança energética.....	42
Desastres naturais, impactos na infraestrutura física em áreas urbanas e desenvolvimento urbano.....	46
Economia e impactos em setores-chave.....	54
Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários climáticos futuros para estudos de Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação.....	56
Comunicação, disseminação do conhecimento e educação para a sustentabilidade.....	60
Impactos nos ecossistemas brasileiros frente às mudanças no uso da terra e na biodiversidade para a sustentabilidade.....	64
Fase de síntese e integração e resultados das componentes.....	68
Interação com outros INCTs e programas nacionais e internacionais.....	70
Instituições participantes.....	71
Conclusões e recomendações.....	73
O INCT-MC2 2020-2023 em números.....	74

# Introdução

O INCT-MC2 visa implementar e desenvolver uma abrangente rede de pesquisas interdisciplinares sobre mudanças globais e sustentabilidade. Baseia-se na cooperação entre aproximadamente 40 grupos de pesquisa de todas as regiões do Brasil, além de 20 grupos internacionais, envolvendo em sua totalidade cerca de 350 pesquisadores, estudantes e colaboradores, constituindo-se em uma das maiores redes de pesquisa ambiental no Brasil.

A agenda científica do INCT-MC2 fornece condições ótimas para que o país desenvolva excelência científica em várias áreas de pesquisas relacionadas às mudanças ambientais globais e suas implicações para o desenvolvimento sustentável, principalmente considerando-se que a economia dos países em desenvolvimento está fortemente associada a recursos naturais renováveis, como é o caso do Brasil. A ênfase nos impactos das mudanças climáticas globais na segurança hídrica, energética, alimentar, saúde, extremos climáticos, desenvolvimento urbano e desastres naturais como temas centrais, integrados à modelagem ambiental, à economia e à comunicação desses impactos à sociedade, comunidade científica e setor acadêmico, empresas e governo, pode contribuir para manter a excelência das atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação como eixo de desenvolvimento ambiental sustentável, com caráter integrador.

Assim, o INCT-MC2 permite que os impactos das mudanças ambientais globais possam ser

avaliados do ponto de vista econômico, usando projeções de clima futuro. Possibilita também que todos os resultados dessas pesquisas possam ser apresentados e comunicados à sociedade e governos de uma forma clara e objetiva, possibilitando maior compreensão pelos tomadores de decisão, visando à elaboração de políticas públicas para enfrentar os desafios presentes e futuros.

A estrutura do INCT-MC2 foi pensada de modo a facilitar a articulação entre um grande número de universidades, instituições de pesquisa e instituições operacionais nacionais e mesmo internacionais, buscando formar uma rede virtual. Essa decisão é de cunho orçamentário. Considerando que os recursos financeiros a serem utilizados por um considerável número de projetos são finitos, a maior parte do orçamento vem sendo utilizada para maximizar as interações entre grupos e instituições, fomentando atividades integradas entre as componentes de pesquisa do projeto.

O programa do INCT-MC2 baseia-se nos resultados científicos e tecnológicos do INCT para Mudanças Climáticas (INCT-MC) que, no período de 2008 a 2014, abordou e desenvolveu estudos de: base científica das mudanças ambientais globais; impactos, adaptação, vulnerabilidade; mitigação; e esforços de inovação tecnológica em modelos do sistema climático, geo-sensores e sistema de prevenção de desastres naturais. O INCT-MC teve a participação de mais de 400 pesquisadores do Brasil e de 18 países, e interagiu com vários outros INCTs.

O INCT-MC2 possibilita uma grande contribuição científica para diversos órgãos nacionais e internacionais, tais como: os relatórios do IPCC AR7, a Quinta Comunicação do Brasil à UNFCCC(5CN), o Painel Científico da Amazônia (SPA), o State of Climate 2022, preparado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO), entre outras iniciativas científicas em andamento em nível estadual, federal e internacional.

O INCT-MC2 apoia diretamente a Rede Clima, (redeclima.ccst.inpe.br) - um programa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação -, cobrindo cobrindo os aspectos científicos e tecnológicos de interesse dessa Rede, e vincula-se estreitamente a outras redes de pesquisa em mudanças climáticas de abrangência nacional e regional. e estadual. Ele igualmente está associado a vários programas de pesquisa em mudanças climáticas, em particular ao Programa FAPESP de Pesquisas em Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG), e às redes de pesquisa em São Paulo INCLINE (Núcleo de Apoio a Pesquisa em Mudanças Climáticas) e CEPED (Centro de Estudos e Pesquisas sobre Desastres), coordenadas pela USP.

Em 2022, uma nova componente foi criada para apoiar a integração de resultados de todas as componentes, tanto dos temas principais como os temas transversais. Essa integração está sendo feita por meio da metodologia NEXUS+, usada na Quarta Comunicação do Brasil com

à UNFCCC(4CN), sempre considerando a aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS-12 (Agricultura sustentável), ODS-3 (Assegurar uma 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 global do clima), ODS-15 (Vida terrestre: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres), entre outros. Até o início de 2023, centenas de publicações haviam sido geradas pela colaboração entre as várias componentes do INCT-MC2, assim como inúmeras palestras, seminários, podcasts, entrevistas nas redes sociais, em revistas e jornais do Brasil e do exterior, destacando o tema de mudanças climáticas e a sua característica transversal e integradora. Até o momento, cinco relatórios já foram gerados e aprovados pela FAPESP e pelo CNPq.

A extensão do projeto até 2025 beneficiará a inclusão de temas que não foram contemplados quando a proposta foi elaborada em 2015, e que foram sendo inseridos gradativamente na agenda de pesquisa atual. Estudos relacionadas a extremos climáticos observados no Brasil e reflexões sobre a relação entre a Covid-19 e as mudanças climáticas são dois exemplos, embora este último ainda seja um tema controverso, sem consenso na comunidade científica sobre suas associações.

# Objetivos e metas

- Implementar e desenvolver uma abrangente rede de pesquisas interdisciplinares sobre mudanças ambientais globais e sustentabilidade.
- Desenvolver ações visando avaliar a adaptação às mudanças ambientais globais e à transição para a sustentabilidade, representando as trajetórias de vulnerabilidade e resiliência, e propondo formas de adaptação a essas mudanças, principalmente no âmbito das decisões na esfera política.
- Integrar a ciência com a educação, desde o ensino fundamental até a pós-graduação.
- Proporcionar uma visão geral das questões relacionadas à sustentabilidade e à responsabilidade socioambiental e corporativa, a fim de facilitar a participação ou mesmo a implementação de atividades em diferentes áreas de gestão de instituições públicas e privadas e seu relacionamento com os tomadores de decisão e governantes.
- Manter a excelência das atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação como eixo estrutural do desenvolvimento ambiental sustentável, com caráter integrador e inovador.
- Transferir conhecimento utilizando instrumentos que não se limitam a artigos científicos, mas preveem também a produção de material audiovisual, ferramentas web e outras soluções que permitam o desenvolvimento de uma cultura científica na sociedade, aumentando o impacto da ciência brasileira e possibilitando maior inserção internacional do Brasil em negociações ambientais.
- Desenvolver uma agenda de pesquisa em mudanças ambientais globais para identificar e entender os impactos atuais da variabilidade climática nos sistemas naturais e humanos no Brasil.
- Ampliar e expandir o escopo dos estudos sobre mudanças ambientais globais e seus impactos em setores importantes para a economia do Brasil.
- Engajar e educar a sociedade, visando aumentar a resiliência nos seus diversos setores.
- Sensibilizar a percepção pública da ciência e tecnologia em relação às mudanças ambientais globais e impactos na sociedade.
- Contribuir de forma proeminente para a pesquisa e desenvolvimento do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, o Plano Nacional de Adaptação as Mudanças Climáticas, e do Plano de Ação Nacional de Combate à Seca e à Desertificação, em parceria com programas de pesquisa federais, estaduais e internacionais sobre mudanças ambientais globais.
- Produzir publicações e modelar dados e cenários que possam ser usados para fornecer contribuições científicas para grandes iniciativas científicas, tais como o IPCC AR7, relatórios especiais do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, a Quinta Comunicação Nacional do Brasil (5CN) à UNFCCC e estudos internacionais, internacionais, e para os acordos institucionais com a NOAA e NASA, dos Estados Unidos, JRC, da União Europeia, com a Rede de Oficinas de Cambio Climático RIOCC e para a colaboração com países do Mercosul e BRICS.

# Coordenação

**Coordenador:** José A. Marengo, Pesquisador  
Cemaden,, São José dos Campos, SP

**Vice-coordenador:** Tercio Ambrizzi, Pesquisador  
IAG USP, São Paulo, SP

## Comitê Gestor

NOME	ÁREA DE ATUAÇÃO	INSTITUIÇÃO	E-MAIL
José Antonio Marengo	Coordenador do projeto  Modelagem climática, avaliações de impactos e vulnerabilidade e estudos de extremos climáticos  Síntese e integração entre resultados das componentes do projeto	CEMADEN	jose.marengo@cemaden.gov.br
Tercio Ambrizzi	Vice-coordenador  Climatologia, estudos climáticos, segurança hídrica, e estudos de extremos climáticos  Síntese e integração entre resultados das componentes do projeto	IAG-USP	ambrizzi@model.iag.usp.br
Paulo Nobre	Modelagem oceânica e acoplada oceano-atmosfera	CPTEC- INPE	pnobre@cptec.inpe.br
Roberto Schaeffer	Energia e mudanças climáticas	COPPE- UFRJ	roberto@ppe.ufrj.br
Paulo Eduardo Artaxo Neto	Física ambiental, Amazônia, mudanças climáticas	IF-USP	artaxo@if.usp.br
Eduardo Mario Mendiõdo	Hidrologia e segurança hídrica	EESC-USP	emm@sc.usp.br
Ulisses E C Confalonieri	Saúde e mudanças climáticas	FIOCRUZ MG	uconfalonieri@gmail.com
Eduardo Haddad	Economia das mudanças climáticas	FEA- USP	ehaddad@usp.br

Todos os membros do Comitê Gestor (CG) também são coordenadores dos Laboratórios Associados. A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) são também Laboratórios Associados. Estes constituem-se em centros cujos membros

fazem parte do CG, mas não integram o grupo que submeteu a proposta. O desenvolvimento do projeto é monitorado por um Comitê Científico (CC), constituído pelos coordenadores das componentes (temas) e das atividades transversais e de síntese e integração.

# Coordenadores de cada componente do INCT-MC Fase 2

CARGOS	COORDENADORES (INSTITUIÇÃO, ESTADO)	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO
Coordenador	J. Marengo (Cemaden, SP)	Coordenação do projeto, modelagem climática, avaliações de impactos e vulnerabilidade, extremos, adaptação, líder do CG e CC. Síntese e Integração dos restados do projeto.
Vice-coordenador	T.Ambrizzi (IAG-USP, SP)	Vice-coordenador do projeto, climatologia, estudos climáticos, segurança hídrica, membro do CG e CC. Síntese e Integração dos restados do projeto.

SUBCOMPONENTES OU TEMAS INTEGRATIVOS/ TRANSVERSAIS	COORDENADORES (INSTITUIÇÃO, ESTADO)	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO
Segurança hídrica	E. Mendiondo (EESC-USP, SP)	Hidrologia, segurança hídrica, avaliações de risco, coordenador de subcomponente, membro do CG.
	S. Montenegro (UFPE, PE)	Modelagem hidrológica em áreas urbanas e rurais no semiárido brasileiro, coordenador de subcomponente.
Segurança alimentar	E. D. Assad (EMBRAPA, SP)	Segurança alimentar, modelagem agrícola, coordenador de subcomponente.
Segurança energética	R. Schaeffer (COPPE UFRJ, RJ)	Energia e mudanças climáticas, coordenador de subcomponente e membro do CG.
	E. B. Pereira (CCST-INPE, SP)	Energias renováveis, energia e mudanças climáticas. Cenários de energia eólica e potencial solar, coordenador de subcomponente.
	A. Szklo (COPPE-UFRJ, RJ)	Energia e mudanças climáticas, coordenador de subcomponente.
Saúde	U. Confalonieri (UFMG-FIOCRUZ, MG)	Saúde e mudanças climáticas, vulnerabilidade e saúde climática, coordenador de subcomponente, membro do CG.
	E. Rangel (FIOCRUZ, RJ)	Saúde e comunicação social, educação, coordenador de subcomponente.
Economia e impactos em setores-chave	E. Haddad (FEA-USP, SP),	Economia das mudanças climáticas, coordenador de tema integrativo, membro do CG.
	S. Margulis (IPEA, DF; Way Carbon, MG)	Economia das mudanças climáticas, coordenador de tema integrativo.
	J. Feres (IPEA, DF),	Economia das mudanças climáticas, coordenador de tema integrativo.

COMPONENTES OU TEMAS INTEGRATIVOS/ TRANSVERSAIS	COORDENADORES (INSTITUIÇÃO, ESTADO)	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO
Comunicação, difusão de conhecimento e educação para sustentabilidade	A. Amorim (Unicamp, SP)	Linguagens, comunicação científica, coordenador de tema integrativo.
	S. Dias (Unicamp, SP)	Educação – conhecimento e arte, coordenador de tema integrativo.
Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários futuros de clima para estudos de vulnerabilidade, impactos, adaptação e resiliência	P. Nobre (CPTEC-INPE, SP)	Desenvolvimento de modelo oceânico e acoplado oceano-atmosfera, BESM – Brazilian Earth System Model, coordenador de tema integrativo, membro do CG.
	S. Chou (CPTEC-INPE, SP)	Modelagem climática regional, cenários futuros de mudanças climáticas de alta resolução, coordenador de tema integrativo.
Desastres naturais, áreas urbanas, infraestrutura física e desenvolvimento urbano	R. Alvalá (Cemaden, SP)	Desastres naturais, avaliações de impactos e riscos, coordenador de tema integrativo.
	R. Rodrigues (UFSC, SC)	Desastres naturais, zonas costeiras, coordenador de tema integrativo.
	M. Barata (FIOCRUZ, RJ)	Mudanças climáticas e desenvolvimento urbano, cidades resilientes, coordenador de tema integrativo.
Impactos nos ecossistemas brasileiros frente às mudanças do uso da terra e à biodiversidade	P. Artaxo (IF-USP, SP)	Física ambiental, Amazônia, coordenador de tema integrativo, membro do CG.
	M. Bustamante (UNB, DF)	Inventários de emissões de gases de efeito estufa, estudos na região do Cerrado, coordenador de subcomponente.

FASE DE SÍNTESE E INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS	COORDENADORES (INSTITUIÇÃO, ESTADO)	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO
Síntese de resultados de integração entre componentes	J. Marengo (Cemaden, SP) T. Ambrizzi (IAG-USP, SP) S. Viggiani (USP)	Preparação de dossiês e artigos de integração entre as diferentes componentes do projeto usando NEXUS+.

# Estrutura organizacional

O INCT-MC2 tem a sua Secretaria sediada no Cemaden, em São José dos Campos. Considerando os objetivos do INCT-MC2, foi montada uma estrutura que consiste em seis linhas temáticas ou componentes (Figura 1):

- Segurança alimentar
- Segurança hídrica
- Segurança energética
- Saúde
- Desastres naturais, áreas urbanas, infraestrutura física e desenvolvimento urbano
- Impactos nos ecossistemas brasileiros frente às mudanças de uso da terra e à biodiversidade

Essas componentes estão conectadas por três temas transversais:

- Economia e impactos em setores-chave
- Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários futuros de clima
- Comunicação de risco, divulgação de conhecimento científico e educação para sustentabilidade

Em 2022 foi implementada uma nova fase:

- Síntese e integração entre os resultados das componentes

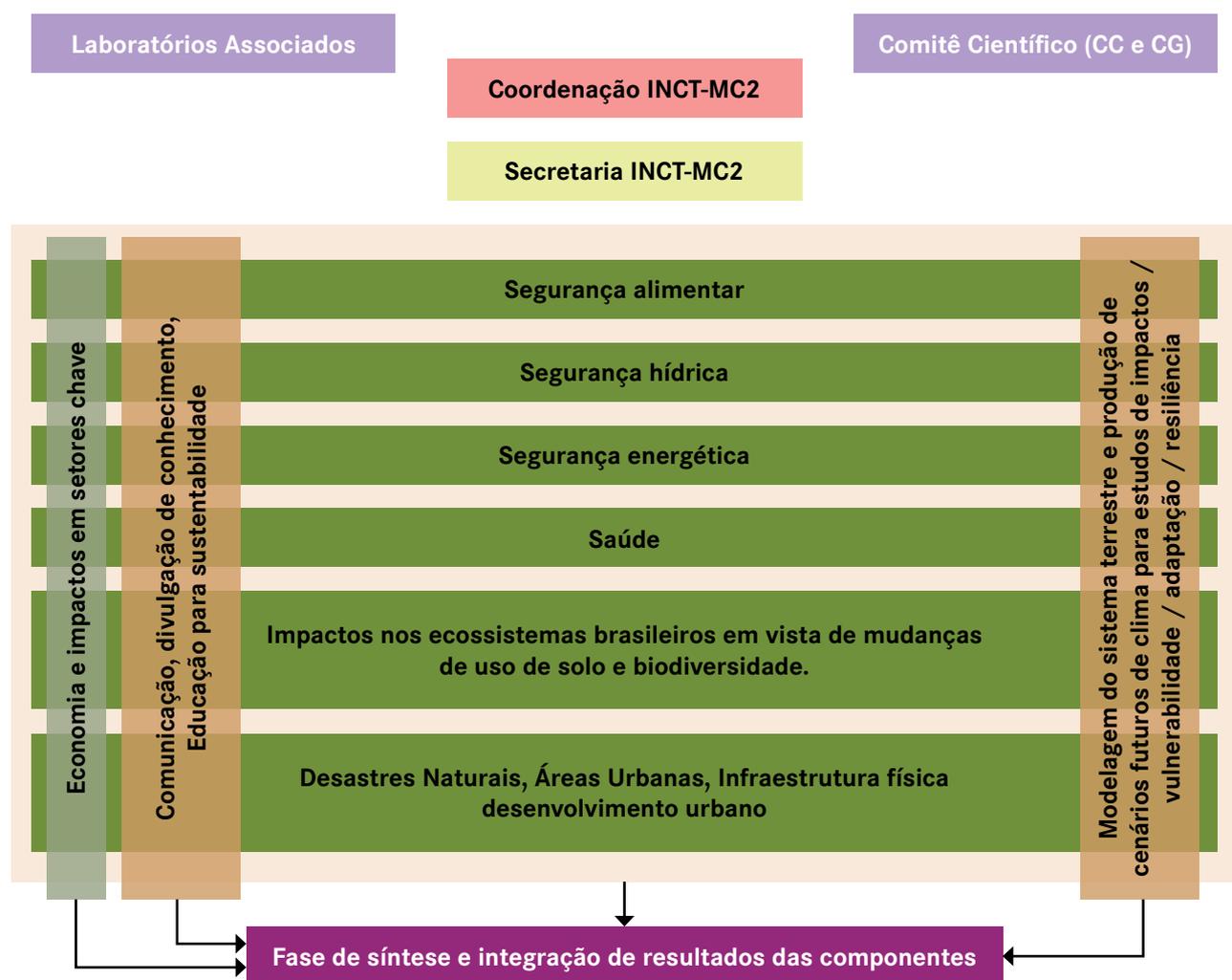


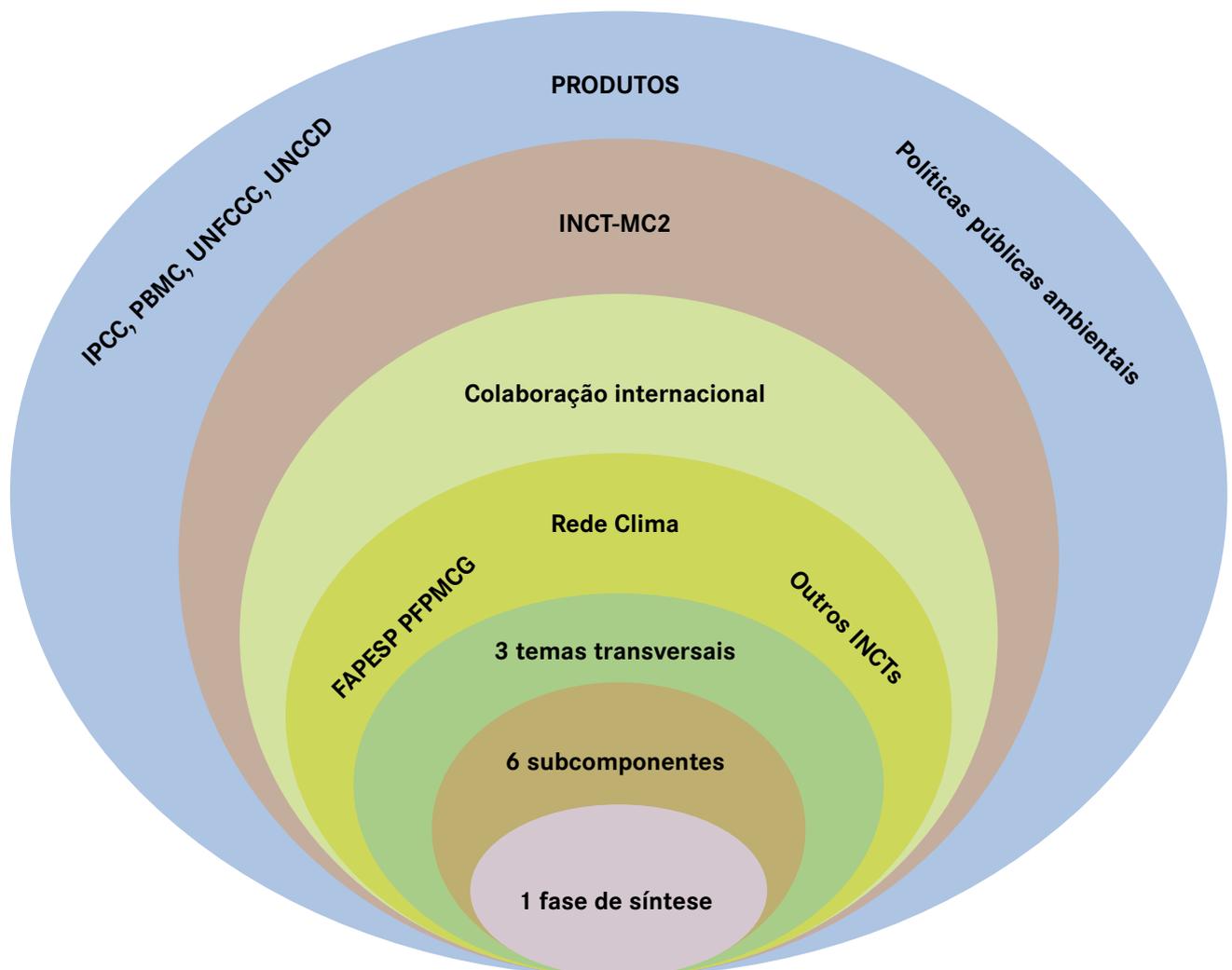
Figura 1 - Estrutura do INCT-MC Fase 2

A Figura 2 exibe a abrangência nacional e internacional do projeto e mostra que há vários grupos de pesquisa consolidados e não consolidados que se beneficiarão da participação nessa rede de pesquisa. O projeto tem estreita colaboração com outros INCTs e redes de pesquisa nacional e internacional ligados aos temas de mudanças ambientais globais e sustentabilidade, e espera gerar produtos científicos que possam ajudar em estudos de grande porte como os do IPCC e PBMC, e também nas negociações ambientais internacionais.

A ciência das mudanças globais é internacional por natureza, atuando nas análises de impactos,

vulnerabilidade e adaptação, com o objetivo de formar e criar resiliência às mudanças ambientais globais e extremos e permitir um desenvolvimento sustentável.

O INCT-MC2 busca conhecimento científico, envolvendo um número significativo de pesquisadores de altíssima qualificação, provenientes de centros internacionais de excelência científica e que trabalham em mudanças ambientais globais, impactos-vulnerabilidade-adaptação-transformação, resiliência e desenvolvimento sustentável em vários países, alguns da América do Sul e outros da América do Norte e Europa.



**Figura 2** - Abrangência nacional e internacional do projeto

# Contextualização e importância do projeto

O INCT-MC Fase 2 se encaixa nas diretrizes IV, V, VI, XI e XII da Política Nacional sobre Mudança de Clima (PNMC) (<http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobremudanca-do-clima>). A PNMC foi instituída pela Lei N<sup>o</sup> 12.187, de 2009:

*IV. Estratégias integradas de mitigação e adaptação à mudança de clima nos âmbitos local, regional e nacional.*

*V. Estímulo e apoio à participação dos governos federal, estadual, distrital e municipal, assim como do setor produtivo, do meio acadêmico e da sociedade civil organizada, no desenvolvimento e na execução de políticas, planos, programas e ações relacionados a mudanças de clima.*

*VI. Promoção e desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas e difusão de tecnologias, processos e práticas orientados a: a) mitigar a mudança do clima por meio da redução de emissões antrópicas por fontes e do fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa; b) reduzir as incertezas nas projeções nacionais e regionais futuras de clima; c) identificar vulnerabilidades e adotar medidas de adaptação.*

*XI. Aperfeiçoamento da observação sistemática e precisa do clima e as suas manifestações no território nacional e nas áreas oceânicas contíguas.*

*XII. Promoção da disseminação de informações, da educação, da capacitação e conscientização pública sobre mudança de clima.*

*XIII. O projeto permite ainda que os impactos das mudanças globais sejam analisados a partir do ponto de vista econômico, usando projeções de clima futuro, além de possibilitar que todos os resultados dessas pesquisas possam ser apresentados e comunicados à sociedade e aos governos de uma forma clara, objetiva e precisa. Uma comunicação eficiente possibilitará uma melhor compreensão pelos tomadores de decisão para que elaborem políticas públicas para enfrentar os desafios presentes e futuros das mudanças globais.*

As componentes e os temas transversais estão integrados pelas ações voltadas à avaliação da adaptação às mudanças ambientais e à transformação para a sustentabilidade, de forma a refletir as vulnerabilidades e resiliências e propor trajetórias e caminhos em adaptação a tais mudanças, principalmente no que se refere à tomada de decisão na esfera política. Também propomos um “casamento” da ciência gerada por este projeto com a educação, desde o nível básico até a pós-graduação.

A definição mais aceita para os termos sustentabilidade e desenvolvimento sustentável é a seguinte: um desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da sociedade atual, sem comprometer a capacidade de atender às futuras gerações. Para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento e do reconhecimento de que os recursos naturais são finitos. Esse conceito representa uma nova forma de desenvolvimento



econômico que leva em conta o meio ambiente. O projeto do INCT-MC2 oferece uma visão geral sobre os temas relacionados à sustentabilidade e responsabilidade social-ambiental-empresarial.

Compete ao coordenador e ao vice-coordenador, juntamente com os membros do CC e CG e alguns pesquisadores convidados nacionais e internacionais, trabalhar com os coordenadores para a realização das análises integradas das componentes e temas transversais, sugerir processos de tomada de decisão e políticas públicas, a fim de apresentar trajetórias e estratégias em adaptação-resiliência-sustentabilidade.

Essa coordenação visa, especificamente, à construção de mecanismos e operacionalização de base científica das diferentes componentes, temas transversais e cenários e modelos, para subsidiar a elaboração de estratégias e trajetórias de adaptação, resiliência às mudanças ambientais globais e caminhos para a sustentabilidade no Brasil. A integração é incentivada por meio de workshops específicos com os coordenadores de cada componente e de cada tema transversal e cenários, juntamente com a esfera política (quando

apropriado), visando à construção conjunta e de forma participativa pelos diferentes atores envolvidos, por exemplo, a comunidade científica e os tomadores de decisão da esfera política.

As mudanças ambientais globais incluem o aumento da ocorrência de fenômenos climáticos extremos, como secas, ondas de calor, chuvas intensas, inundações, tempestades etc. Essa variabilidade climática coloca um grande desafio para a sociedade, uma vez que os impactos inevitáveis atingem mais duramente as pessoas menos favorecidas, que vivem em encostas ou áreas de risco e que possuem menor capacidade de adaptação. Experiências de pesquisa em eventos extremos (seca e cheia) junto a comunidades tradicionais caboclas na Amazônia evidenciaram a vulnerabilidade dessa população, exacerbada pelo aumento da variabilidade climática e incerteza sobre continuidade de sobrevivência e manutenção das atividades cotidianas. Além disso, estudos na escala local e regional evidenciam a distância ainda existente entre os modelos climatológicos e hidrológicos, os impactos na população e recursos naturais, e ações políticas em extremos e mudanças ambientais.

# Integração entre as componentes do projeto

O caráter integrador do projeto visa, através do trabalho realizado junto às diferentes componentes, temas transversais, modelos e cenários, e informações científicas sobre os impactos das mudanças ambientais globais em setores-chave, atingir, ao longo do projeto, as metas de:

- (1) Prover opções de ações adaptativas;
- (2) Apontar áreas em setores onde decisões políticas precisam considerar as mudanças climáticas de forma mais urgente;
- (3) Propor trajetórias de adaptação em diferentes setores, com foco na construção e/ou otimização de resiliência;
- (4) Apontar ou mapear prioridades para ações adaptativas, subsidiando o país em setores-chave para trajetórias mais resilientes e adaptadas às mudanças climáticas, de forma a promover sustentabilidade em escala nacional.

A componente integração do projeto do INCT-MC2 conta com a coordenação técnico-científica dos pesquisadores José Marengo (Cemaden) e Tercio Ambrizzi (IAG/USP). Os pesquisadores líderes das componentes têm trabalhado no âmbito das dinâmicas socioecológicas das mudanças climáticas, através da elaboração de metodologias com indicadores de vulnerabilidades ambientais e socioeconômicos e projeções de riscos climáticos, apontando aspectos de fortalecimento das resiliências em diferentes setores-chave, a fim de propor alternativas de adaptação às mudanças ambientais globais. O trabalho também se reflete sobre a forma como as informações integradas das dinâmicas socioecológicas podem ser incorporadas e trabalhadas na esfera política, facilitando o desenvolvimento de arranjos institucionais mais

robustos e eficazes, visando à elaboração de planos e estratégias adaptativas.

Conforme detalhado nas componentes e nos temas integrativos, há evidências convincentes de que o nosso clima está mudando e que os gases de efeito estufa emitidos pelas atividades humanas são parcialmente responsáveis por essas mudanças e decisões em diferentes setores da sociedade. A economia precisará levar em conta e gerenciar os riscos associados às mudanças climáticas. Também é sabido que as mudanças climáticas são uma fonte de incerteza para os tomadores de decisão, devido às limitações do nosso conhecimento científico sobre a dinâmica do sistema terrestre e como o clima responderá às forças antropogênicas em diferentes escalas.

Assim, o desafio do INCT-MC2 é possibilitar uma integração entre as seis componentes, três temas transversais e um tema de síntese e integração de resultados, por meio de diálogos e workshops, visando à melhor compreensão dos impactos e benefícios decorrentes da variabilidade climática atual, e ajudar a pensar formas de reduzir a incerteza em torno das consequências dos cenários futuros de mudanças climáticas.

As novas observações e projeções de modelos climáticos e cenários futuros de mudanças climáticas deverão ser inseridas no contexto desses limites estabelecidos e da avaliação integrada de opções e caminhos de adaptação.

Esta tarefa de coordenação pode ajudar os tomadores de decisão a reconhecer e avaliar os riscos decorrentes de uma mudança no clima, fazendo o melhor uso das informações disponíveis sobre as mudanças climáticas, seus impactos e respostas adaptativas apropriadas, como um projeto efetivo de integração.

# Contribuições científicas e análise da situação atual e pretendida

O tema “mudanças climáticas” é amplo e inclui várias componentes, como a ciência das mudanças climáticas, análises de impactos-vulnerabilidade-adaptação, e ações de mitigação. Os objetivos do INCT-MC e do atual INCT-MC2, assim como da Rede Clima, buscam propiciar o desenvolvimento científico e tecnológico, com a intenção de comunicar a sociedade e tomadores de decisões, novos conhecimentos sobre à mudança climática.

O Brasil tem grande parte de sua economia dependente dos recursos naturais, ou seja, agricultura, recursos hídricos, biodiversidade, energias renováveis, áreas costeiras, saúde, megacidades etc., que de forma direta ou indireta vão ser afetados pelas mudanças do clima, particularmente seus extremos. As mudanças ambientais globais, especialmente mudanças climáticas, podem impor ameaça significativa ao desenvolvimento sustentável do país e à sua segurança pública.

O país tem como objetivo de longo prazo o desenvolvimento social-econômico-político-ambiental, assim como o de reduzir injustiças sociais e regionais. Isso gera uma série de desafios sobre como gerenciar os abundantes recursos naturais e o que deve ser distribuído à população de forma sustentável, mesmo em situações ambientais extremas. O estabelecimento de uma agenda científica relevante em mudanças ambientais globais para o Brasil e América do Sul, mas com ramificações regionais, representam os

objetivos da Rede Clima e do Programa FAPESP para Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG), além do INCT-MC2.

Consideramos que INCT-MC2 já é um pilar para a implementação de uma agenda científica ambiental com aplicações práticas na definição de políticas públicas ambientais. Um resultado central deste projeto será aumentar o entendimento dos impactos e riscos das mudanças climáticas para o presente e futuro, fazendo uso do estado da arte em modelagem climática para geração de cenários futuros de clima. O desenvolvimento e a implementação de modelos do sistema terrestre e os seus complexos componentes, assim como as suas aplicações científicas e tecnológicas vão atrair o interesse de jovens cientistas à área de modelagem e observações do sistema climático e irão prover o ambiente de trabalho para produção de ciência em nível internacional.

O INCT-MC2 estimula o desenvolvimento da educação em nível de pós-graduação em mudanças ambientais globais no Brasil. Estima-se que durante seus 6 anos de duração, o projeto irá apoiar dezenas de estudantes de doutorado e mestrado, na maior parte das instituições participantes, e inclusive capacitar novos programas. Em termos de relevância social, o projeto irá contribuir para o estabelecimento de políticas de mitigação e adaptação para enfrentar as mudanças climáticas no Brasil, uma vez que é reconhecido que tais políticas devem ser guiadas por informações científicas de alta qualidade. Em

associação com programas estaduais e federais de pesquisas em mudanças climáticas, espera-se que estas iniciativas se constituam nos pilares da pesquisa e desenvolvimento (P&D) do Plano Nacional de Mudanças Climáticas.

O INCT-MC2 cria um sistema incisivo para disseminação e comunicação de seus resultados, acompanhado de um plano de educação para sustentabilidade. De fato, reconhecendo as dificuldades históricas em se comunicar ciência para os processos de geração de políticas públicas e para a sociedade em geral, o projeto tem uma atividade de pesquisa especificamente direcionada ao estudo das interfaces entre política/ciência ambiental e climática/comunicação e divulgação no Brasil.

Similar a outras importantes iniciativas científicas do passado, este projeto tem uma política de compartilhamento e disponibilização de dados, visando maximizar os benefícios da troca de informações entre os participantes da proposta, outros cientistas, governo e o público interessado. O projeto tem entre seus líderes muitos cientistas que vêm balizando o debate sobre mudanças ambientais globais no Brasil. Isto é uma vantagem considerável quando se busca comunicar os resultados aos tomadores de decisão, à mídia e à sociedade.

Em colaboração com a Rede Clima, PFPMCG FAPESP, INCLINE, outros INCTs e outros programas de pesquisa nacionais e internacionais, o INCT-MC2 contribuiu com a implementação de um profundo levantamento de questões incluídas no IPCC AR6 de 2021 e 2022 e nos relatórios especiais publicados em 2018 e 2019 (Report on Global Warming of 1.5°C, Special Report on the Ocean and Cryosphere, Climate Change and Land,) e do PBMC (Cidades costeiras, biodiversidade), publicados em 2019.

Os produtos deste projeto estão gerando informações e fornecendo subsídios científicos para as negociações ambientais de grande

relevância, como a Conferência das Partes (COPs). O Acordo de Paris, assinado durante a COP-21 de Paris, em 2015, teve como principal objetivo iniciar o planejamento do novo tratado que substitui o Protocolo de Kyoto, criado em 1997, que tornou obrigatório para as nações desenvolvidas reduzir suas emissões em 5,2%, entre 2008 e 2012, em relação aos níveis de 1990.

O Acordo de Paris é outro instrumento de pacto global para a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE), de modo que o aumento da temperatura global não ultrapasse de 1,5° C acima dos níveis pré-industriais, até 2050. Por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, sigla em inglês), o Brasil se comprometeu nos esforços internacionais do Acordo de Paris a reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e 43% até 2030 (em relação aos níveis de 2005). Sendo assim, a NDC brasileira está diretamente associada às mudanças no uso da terra, através da redução do desmatamento ilegal na Amazônia, e propõe restaurar 12 milhões de hectares degradados, além de ampliação da escala de sistemas de manejo sustentável de florestas nativas e planos de Adaptação Baseada em Ecossistemas.

Foram propostas ações mais ambiciosas para conter o aquecimento global (redução de gases de efeito estufa) e promover medidas de adaptação e mitigação para cumprir a meta de limitar a elevação da temperatura global a 2°C até 2100.

Um aspecto inovador do INCT-MC Fase 2 é o tema transversal sobre Comunicação, difusão de conhecimento e educação para sustentabilidade, que trata das ações de transferência de conhecimento à sociedade dos resultados do projeto. Este tema atua próximo aos outros temas transversais e componentes do projeto. Informações sobre mudanças climáticas muitas vezes são consideradas pessimistas ou catastróficas. A partir de um melhor conhecimento sobre o tema, a sociedade e os governos terão

mais condições de repensar suas estratégias de adaptação, ou implementá-las, caso já haja planos nessa direção.

Os resultados das pesquisas em mudanças climáticas globais impõem a urgência de se repensar modelos e padrões de gestão do modo de vida atual, tendo em vista a necessidade premente de investir na segurança alimentar, hídrica e energética da população; na preservação dos recursos naturais; na adaptação dos sistemas sociais, econômicos e naturais às mudanças climáticas; na redução de risco de desastres naturais, entre outras medidas.

Alguns dos grandes desafios que colocam são é o de potencializar os estudos de impacto, adaptação e mitigação, os produtos tecnológicos desenvolvidos e de engajar a sociedade nessa temática. Entre os problemas verificados atualmente na divulgação das mudanças climáticas pela imprensa podemos citar:

- Catastrofismo, alarmismo e sensacionalismo;
- A infantilização da opinião pública;
- A relação entre ciência e realidade apresentada insistentemente em termos de crença e determinação;
- A criminalização dos comportamentos;
- A adoção de mecanismos indutivos de mudanças de comportamento unilaterais e consensuais;
- A compreensão superficial dos fenômenos estudados;
- A incapacidade da imprensa de pautar decisões políticas a respeito das mudanças climáticas;
- A postura normativa da comunicação;
- Um funcionamento da informação em termos de falta de interesse, analfabetismo e déficit de conhecimento;
- A representação de uma ciência fantástica

e do culto à ciência, da qual se esperam soluções do tipo “passes de mágica” ou o alcance de curas milagrosas;

- As narrativas saturadas de clichês e marcadas por oposições entre humano-natureza, sujeito-objeto, ciência-política, moralizações e julgamentos, e pelo desejo de conter e acomodar a vida na escrita;
- O ceticismo e negacionismo em relação ao tema de mudanças climáticas, tanto na população como no governo (*climatismo*).

O problema da comunicação-divulgação das mudanças climáticas não é de acesso a uma maior quantidade de informações, mas uma questão de qualidade, tanto das informações, quanto do acesso. É preciso aliar ações de divulgação-comunicação à pesquisa e renovar nossas metodologias de pesquisa, e a forma como olhamos e interpretamos os dados das pesquisas de percepção pública da ciência e tecnologia. Ou seja, explorar a divulgação-comunicação não na lógica de transmissão linear de conteúdos das ciências para a população, mas como possibilidade de constituição de uma efetiva cultura científica.

Assim, o INCT-MC2 atua em três frentes:

1. Pesquisa (diagnósticos/cartografias conceituais/estudos de percepção pública/ realização de eventos científicos/pesquisas de iniciação, mestrado, doutorado e pós-doutorado);
2. Comunicação (produção de notícias, reportagens, entrevistas, resenhas/geração de um arquivo de textos, imagens e sons);
3. Educação (curso de formação de profissionais de divulgação/criação e disponibilização ampla de materiais, revista, vídeos, jogos, instalações interativas, publicações/ realização de encontros/oficinas/workshops).

Parcerias envolvem pesquisadores deste tema

transversal e da Rede Clima, que têm se dedicado a problematizar as dimensões humanas das mudanças climáticas e as configurações do humano, natureza, ciência, cultura e política nas imagens, palavras, sons, signos e sintaxes que promovem uma intensa circulação da temática nos mais diversos espaços-tempos e artefactos culturais.

A transferência de conhecimento à sociedade ve ser desenvolvida a partir de um sistema de investigação, gerenciamento e experimentação de informação na área de mudanças climáticas, permitindo:

- O fortalecimento teórico dos estudos que embasam ações que investem na comunicação e divulgação científica;
- A geração de análises das relações entre ciências, tecnologias e sociedade;
- A criação de novas abordagens metodológicas que permitam a experimentação das mídias sociais e

linguagens;

- A investigação das potencialidades educacionais dos artefactos 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 como ferramentas para gestores públicos e organizações da sociedade civil na avaliação, formulação e implementação de políticas públicas.

Neste projeto, queremos que a comunidade científica em mudanças ambientais globais seja ouvida, não só para legitimar o que já foi decidido pelos governos, mas para influenciar os processos que estão em curso na administração pública em relação a políticas ambientais e grandes empreendimentos que possam afetar o meio ambiente.

# Formação de Recursos Humanos

O INCT-MC2 se apoia fortemente em um grande número de universidades e instituições de pesquisa e operacionais. A maioria deles possui programas de pós-graduação consolidados ou em consolidação. Lista-se abaixo, de forma não exaustiva, vários cursos de pós-graduação cujos docentes são participantes do projeto e que são beneficiados diretamente pelas pesquisas propostas. O projeto tem contribuído para o fortalecimento da formação de pesquisa interdisciplinar em todo o país, um campo de grande crescimento mundial. Reconhece-se que a efetividade científica da pesquisa ambiental integrada rapidamente se aproxima da pesquisa disciplinar e, juntas, elas podem contribuir para resolver os grandes problemas ambientais e participar dos debates nacionais ambientais, assim como ajudar a enfrentar o problema das mudanças ambientais globais, criando cidades mais resilientes aos desastres naturais, populações com segurança de saúde, alimentar, energética e hídrica, num ambiente mais sustentável.

- Programa de Pós-graduação em Meteorologia – INPE
- Programa de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre – INPE
- Programa de Pós-graduação em Meteorologia – IAG-USP
- Programa de Pós-graduação do Instituto de Física – USP
- Programa de Pós-graduação de Engenharia Hidráulica e Saneamento – EESC/USP
- Programas de Pós-graduação em Economia IPE-FEA-USP
- Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais-Cemaden/Unesp
- Programa de Pós-graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente – Fiocruz
- Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético – Coppe/UFRJ
- Programa de Pós-graduação em Ambiente e Sociedade da Unicamp
- Programa de Pós-graduação em Demografia da Unicamp
- Programa de Pós-graduação em Divulgação Científica e Cultural da Unicamp
- Programa de Pós-graduação em Meteorologia da UFSM
- Programa de Pós-graduação em Economia da UFMG
- PPGEA/USP da Esalq
- Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas-FGV
- Mestrado em Engenharia Ambiental, Geografia, Oceanografia, Desastres Naturais (UFSC)
- Programa de Pós-graduação em Meteorologia agrícola da UFV
- Programa de Pós-graduação em Ecologia da Universidade de Brasília
- Programa de Mestrado em Meteorologia – IGEO/UFRJ
- Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente – INPA
- Programa de Pós-graduação em Ciências da Saúde – Centro de Pesquisas René Rachou (CPqRR)/Fiocruz/MG

Até 2018, não existia um programa de pós-graduação em desastres naturais. No entanto, o Cemaden oferece facilidades tecnológicas para treinamento *in situ* e a distância em temas relevantes a desastres naturais e monitoramento de risco de desastres naturais. Sua linha de ação prioritária está associada a monitoramento e pesquisa em áreas de risco relacionadas a escorregamento de encostas, enxurradas e inundações e outros tipos de desastres naturais associados com secas e chuvas intensas no país. O Cemaden tem como estratégia principal o estabelecimento de parcerias com instituições estaduais e federais (regionais e estaduais) em todo o Brasil, possibilitando maior agilidade na disseminação das informações e o detalhamento das análises para solução de problemas. Assim, a partir de 2019 foi criado o Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais, em uma parceria entre Cemaden e Unesp, em nível de mestrado e doutorado. O INCT-MC2 promoveu a formação de algumas dezenas de mestres e doutores em suas componentes e temas transversais, no intervalo de seis anos. Espera-se que a geração de novos conhecimentos e a

capacitação de recursos humanos nos níveis de graduação, pós-graduação e pós-doutorado reforcem o corpo docente de muitos dos programas de pós-graduação já listados e também o papel do Brasil nas negociações internacionais e da agenda ambiental em âmbito global, tais como as COPs, as negociações da UNFCCC e UNCCD, assim como as reuniões internacionais sobre desmatamento, energia, serviços ambientais, entre outras.

Outrossim, o INCT-MC2 tem gerado conhecimentos e informações científicas cada vez mais qualificadas para que as ações de desenvolvimento social e econômico do país ocorram de forma ambientalmente sustentáveis, dirigidas ao bem-estar da população e em harmonia com o meio ambiente. Isto tem sido alcançado por meio de seminários, workshops, cursos especializados, webinars, conferências, assim como a produção de material científico desde o nível de ensino básico, material audiovisual online, bases de dados, artigos científicos e relatórios que cada componente produziu durante os seis anos do projeto.



# Principais resultados do INCT-MC Fase 2 por componente de 2020 a 2023

Este Sumário Executivo apresenta os resultados de 2020 a 2023 do INCT-MC2. Tendo em vista que o projeto foi submetido em 2014 e aprovado em 2017, alguns objetivos foram alterados ou novos objetivos foram incluídos. Além disso, algumas novas parcerias também foram estabelecidas e novos membros, entre pesquisadores, estudantes e colaboradores, foram integrados ao projeto.

# Segurança alimentar

De 1960 a 2020, a pauta de exportação do agronegócio alcançou mais de 350 itens. Em 2020, as exportações do agronegócio foram da ordem de US\$ 100,7 bilhões, alta de 3,98% em relação aos US\$ 96,8 bilhões obtidos em 2019. Basicamente, o Brasil tornou-se um exportador de commodities, onde grande parte dessas exportações não se reflete na alimentação do brasileiro. O que se observou foi o aumento da fome no país, que se reflete principalmente nos itens da cesta básica. O que se observa é que o consumo médio diminuiu. Esses números mostram necessidades de estratégias de produção para garantir a segurança alimentar no país.

## Variabilidade da produtividade e da produção agropecuária na bacia do São Francisco de 2005 a 2017

Entre 2005 e 2017 houve aumentos significativos na produtividade e na produção agropecuária na bacia do São Francisco, o que é importante para ajudar a garantir a segurança alimentar da região. No entanto, espera-se que o aumento na frequência de ocorrência e intensidade de eventos extremos devido às mudanças climáticas seja um desafio para a região. As secas atingiram a região nordeste de forma mais intensa nos anos de 2010, 2012, 2014 e 2017, havendo reduções nas chuvas, variando de 15% a 70%. A Figura 3 apresenta os resultados dos índices de perdas, do plantio à pré-colheita, das principais culturas presentes na bacia entre 2005 e 2017. Os resultados mostram que os índices de perdas podem atingir níveis próximos ou acima de 30%, como ocorreu nas lavouras de feijão, mandioca e milho, o que obviamente impacta significativamente toda a cadeia produtiva. Observou-se também que os anos de 2012 e 2015 a 2017 foram os mais críticos para quase todas as safras. O ano de 2012 teve perdas elevadas em todas as culturas (exceto soja), enquanto o período entre 2015 e 2017 foi marcado por perdas significativas, por exemplo, em arroz, feijão e milho. Dentre as culturas avaliadas, a cana-de-açúcar foi a menos suscetível a perdas até a pré-colheita. Alguns resultados sobre indicadores de produtividade das lavouras e pastagens agrícolas, bem como as projeções da pecuária aparecem na Figura 4.

## Cenários de mudanças climáticas e produtividade das lavouras na bacia do São Francisco

Considerando os dados médios de todos os municípios da bacia do São Francisco, as simulações com cenários de mudanças climáticas apontam para um aumento de produtividade para a maioria das lavouras da região, onde apenas a cultura do arroz apresentou redução. Por exemplo, comparando o período 2041-2050 com 2017 (ano base), estimou-se uma redução média de 3,4%. As demais culturas devem apresentar ganhos de produtividade de 5,9%, 10,8%, 8,2%, 14,7% e 21,1% para cana-de-açúcar, feijão, mandioca, milho e soja, respectivamente.

As plantas possuem uma adaptação própria às condições climáticas predominantes em seu ambiente, permitindo um desenvolvimento tecnológico que indica novas acomodações de cultivo frente ao novo clima, por meio do zoneamento de risco climático para a agricultura na região da bacia do São Francisco. Já as pastagens apresentaram tendência de aumento da produtividade de biomassa no período 2031-40, com mediana indicando produtividade de 11.159,31 kg ha<sup>-1</sup>, com pequena redução no período 2041-50. A maior variabilidade na produtividade de biomassa da pastagem é observada no período 2021-30, porém apresentando a menor mediana entre os períodos (8.527,83 kg ha<sup>-1</sup>). Com as mudanças na biomassa das pastagens simuladas em diferentes cenários de mudanças climáticas, estimou-se que no período 2041-50 o rebanho poderia ser de 36,7 milhões de cabeças, um aumento de 24,6% em relação a 2017. As maiores altas foram observadas para bovinos de corte (+36,8%), bovinos de leite (+33,0%) e bubalinos (+33,3%), enquanto ovinos, caprinos e equinos terão seus rebanhos aumentados em 6,1%, 10,4% e 19,7%, respectivamente.

## Impacto na produção de forragem

Para avaliar o impacto na produção de forragem no Brasil e, conseqüentemente, no potencial produtivo da pecuária, foi utilizado um modelo desenvolvido pela Embrapa-Pecuária Sudeste. Efeitos de eventos climáticos na taxa de acúmulo de matéria seca de

*Panicum maximum*, cv. Tanzânia, e a *Bachiaria Brizantha* foram quantificados com parâmetros agrometeorológicos. Os resultados são dos anos de 2010 a 2040, utilizando como parâmetros de entrada os resultados do cenário RCP 8.5 do modelo HADgem2-ES. Nesse caso não foi possível simular com o modelo HadGEM3-GC31-MM. As análises mostraram o efeito do clima na taxa de acúmulo de forragem, principalmente no que diz respeito aos parâmetros térmicos e hídricos em conjunto. Os resultados são apresentados na Figura 5, onde observa-se que não houve impacto significativo na produção de forragem no Brasil nos próximos anos. Um estudo mais detalhado é desejável para identificar possíveis impactos ao longo do ciclo anual das pastagens. Os principais parceiros são EMBRAPA, UNICAMP / CEPAGRI, FGV, INPE, UNICAMP / IE, LAPIG / UFG e UFV.

### Estimativa de perdas de produtividade de grãos nos biomas brasileiros nas próximas décadas

A estimativa feita com os modelos de produtividade indica para todos os biomas que haverá redução de produtividade para todas as culturas. A produtividade do milho apresenta redução de mais de 30% na próxima década. De acordo com os resultados simulados, haverá forte redução da produtividade

nos próximos dez anos, o que poderá ser amenizado no período 2031-2040. Nessa etapa específica desta pesquisa, não apresentamos os dados tabulados para o período 2041-2050. Para efeito de metodologia, nas próximas etapas, os resultados dos modelos CMIP5 serão comparados com os modelos CMIP6. Em todos os casos, o cenário escolhido foi o RCP 8.5. Em termos de abastecimento de alimentos, se os sistemas de produção não forem alterados, para sistemas de produção agrícola sustentáveis, o abastecimento de alimentos pode ter uma redução significativa no que diz respeito ao milho (redução de 39%), arroz (28% no Cerrado e 17% na Mata Atlântica - na área de maior produção, a região sul não sofrerá alteração, pois o arroz é irrigado) e feijão (38% no Cerrado e 17% na Mata Atlântica). No caso específico da Caatinga, não foram consideradas as projeções para a soja, pois os municípios produtores de soja naquele bioma (14), representam 1,2% do total, o que não é significativo. A abordagem adotada até agora é oferecer comida. Trata-se de apresentar possíveis riscos, como já foi feito no passado. Em 2007, após analisar os cenários de mudanças climáticas para 2020, eram esperadas perdas de mais de R\$ 5 bilhões devido a eventos extremos. Na safra 2019/2020 o valor perdido foi de R\$ 15 bilhões (Tabela 1). Todas as perdas podem ser reduzidas ou minimizadas com a adoção de sistemas integrados de produção agrícola.

**Tabela 1** - Estimativa de perdas de produtividade de culturas nos biomas brasileiros nas próximas décadas.

Biome		Productivity kg/ha				
		2011/2020	2021/2030	Difference	(%)	2031/2040
Amazon	Soy	3.078	2.815	264	9	2.968
	Maize	2.543	2.465	78	3	2.495
	Rice	1.917	1.849	68	4	1.893
	Bean	678	671	7	1	674
Savanna	Soy	3.244	2.202	1.043	32	2.923
	Maize	4.331	2.630	1.701	39	4.152
	Rice	2.105	1.525	580	28	1.748
	Bean	1.179	733	446	38	942
Atlantic Forest	Soy	3.349	2.377	972	29	3.066
	Maize	4.818	3.051	1.768	37	4.597
	Rice	3.542	2.926	617	17	3.169
	Bean	1.171	972	199	17	1.051
Pampa	Soy	2.458	2.122	336	14	2.397
	Maize	3.812	2.538	1.274	33	3.670
	Rice	7.337	7.331	6	0	7.337
	Bean	1.030	1.030	-	-	1.030
Caatinga	Soy	-	-	-	-	-
	Maize	660	699	39	6	686
	Rice	1.604	1.648	43	3	1.265
	Bean	321	338	17	5	272

Os fenômenos extremos e seus impactos no aumento de deficiência hídrica na região sul corroboram os resultados observados nos primeiros cenários observados já no ano de

2007, indicando como uma região extremamente vulnerável. Figura 6 indica, a partir dos dados do IBGE, a extensão das perdas de produtividade de soja no estado do Rio Grande do Sul.

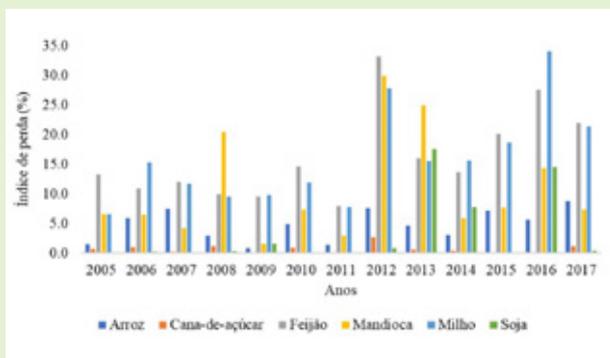


Figura 3 – Taxas de perdas do plantio à pré-colheita das principais culturas presentes na bacia do Rio São Francisco entre 2005 e 2017.

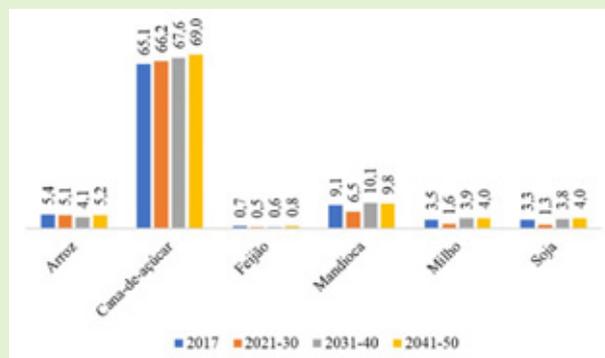
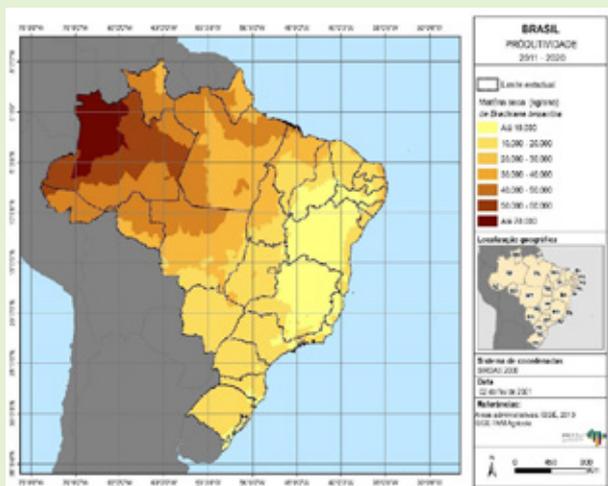


Figura 4 – Produtividade agrícola atual e projetada (t ha<sup>-1</sup>) das principais culturas do BESF em 2017 e com base em cenários de mudanças climáticas.



Brachiaria produtividade 2011-2020



Brachiaria produtividade 2041-2050

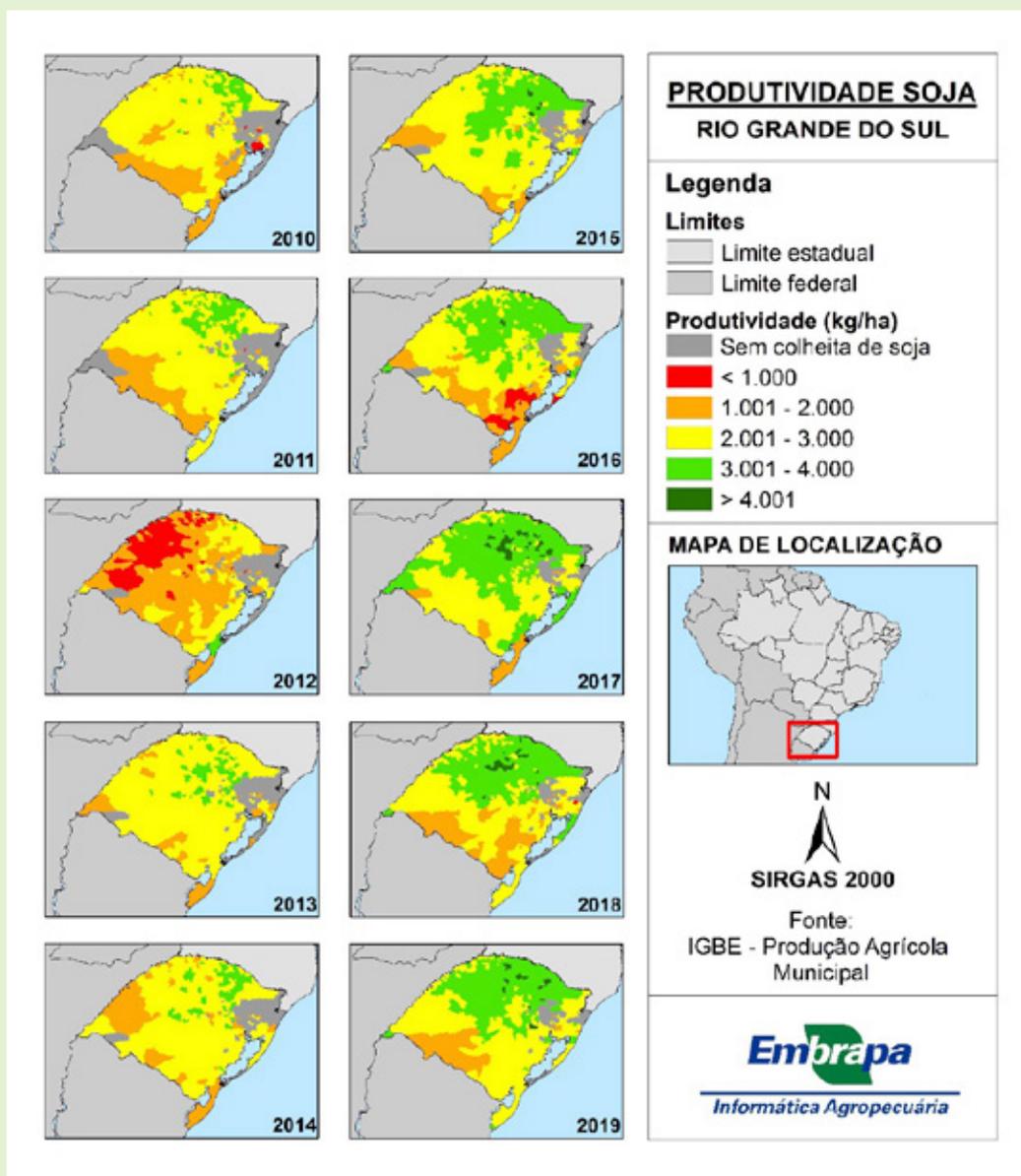


Panicum produtividade 2011-2020



Panicum produtividade 2041-2050

Figura 5 – Produtividade de Brachiaria e Panicum observada 2011-2020 e projetada para 2041-50



**Figura 6** – Perdas de produtividade de soja no estado do RS entre 2019 a 2016.  
 Fonte de dados: EMBRAPA, IBGE

### PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

1. ASSAD, E.D.; VICTORIA, D. C.; CUADRA, S. V; PUGLIERO, V.S; ZANETTI, M. Potencialidades para expansão e diversificação agrícola do Cerrado. In: BOLFE, E.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Org.). Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções. 1ed.Brasília, D.F.: EMBRAPA, 2020, v. 1, p. 1-312.
2. SANTOS, MARCIO A. S. ; ASSAD, Eduardo D. ; GURGEL, ANGELO C. ; OMAR, NIZAM . Similarity Metrics Enforcement in Seasonal Agriculture Areas Classification. Remote Sensing, v. 12, p. 1791, 2020.
3. PEROSA, B. B. ; MANZATTO, C. V. ; VICENTE, L. E. ; SKORUPA, L. A. ; ASSAD, E. D. ; GURGEL, ANGELO C. . A. Emissões de gases do efeito estufa pela agricultura de baixa emissão de carbono. AGROANALYSIS (FGV), v. 40, p. 29-31, 2020.
4. CUADRA, S. V. ; HEINEMANN, A. B. ; MADARI, B. ; ASSAD, E. D. ; VICTORIA, D. C. ; HIGA, R. . Climate change and Brazilian agriculture.. In: : CUADRA, S. V.; HEINEMANN, A. B.; BARIONI, L. G.; MOZZER, G. B.; BERGIER, I. (Org.). Climate action: contributions of Embrapa. 1ed.Brasília: Embrapa, 2020, v. 1, p. 21-29.
5. MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. de S.; SANTOS, T. C. dos; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. Soil & Tillage Research, v. 220, 105368, 2022.

# Segurança hídrica

No início de 2022, a primeira tese de doutorado brasileira sobre conjuntos de dados, previsões e avaliação pós-processamento de vazões fluviais em bacias hidrográficas da América do Sul foi defendida sob a banca examinadora da cientistas da componente Segurança hídrica do INCT-MC2. Para mapas de resiliência hídrica de curto prazo, Siqueira et al. (2021, doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126520) usam os mapas do Índice de Confiabilidade (RI) representando regionalmente o desvio da planicidade, o Ensemble Model Output Statistics (EMOS) e o Ensemble Copula Coupling “vestígios” (ECC-T) (Figura 7).

## Gestão de risco para seca e inundações

Cientistas da componente INCT-MC2-Segurança hídrica participaram de um estudo comparativo global publicado na revista científica *Nature* (Kreibich et al. (2022), The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management, *Nature*, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>). O trabalho demonstrou que direcionar as medidas de gestão de risco para o pior caso vivenciado até o momento não é suficiente para reduzir os impactos de eventos sem precedentes. Apesar de o impacto de tais perigos naturais poder ser reduzido por meio de uma gestão de riscos adequada, se as causas dos danos crescentes forem conhecidas, até o momento isso foi dificultado pela falta de dados empíricos. Um conjunto único de dados de dois eventos extremos sucessivos de inundação ou seca na mesma área foi compilado e estudado. Foram estudadas regiões com grandes diferenças na estrutura populacional, condições socioeconômicas, climáticas e hidrológicas em todos os continentes. As análises confirmaram a suposição de que o gerenciamento adequado de riscos geralmente ajuda a reduzir os danos. No entanto, por outro lado, é particularmente difícil reduzir o impacto de eventos extremos cuja magnitude não foi vista no passado na área afetada devido a dois fatores. Em primeiro lugar, infraestruturas como barragens e reservatórios têm um limite superior de projeto até

o qual são eficazes, mas uma vez que um limite é excedido, elas se tornam ineficazes. Em segundo lugar, a gestão de risco é geralmente introduzida ou ajustada de forma reativa após grandes inundações e secas, enquanto estratégias proativas e antecipatórias são raras. Esse documento com a contribuição do INCT-MC2 afirma a abordagem mundial de que a aplicação desses fatores de sucesso pode neutralizar a tendência atual de aumentar os danos causados por eventos extremos sob condições de mudança climática.

A componente de Segurança Hídrica promoveu fortemente a divulgação da ciência aberta e uma ampla popularização de webinars internacionais e interdisciplinares por meio do site do CEPED/SP ([www.ceped.eesc.usp.br](http://www.ceped.eesc.usp.br)). Com os pesquisadores do INCT-MC2 e convidados internacionais por meio de iniciativas de parceria, os cientistas de segurança da água do INCT-MC2 seguiram as recomendações da Escola de Estudos Avançados sobre Água e Segurança sob Mudança e a nova Cátedra UNESCO de Águas, com um repositório aberto de programas de estudos, conhecimento e evolução do pensamento disponível para apoiar a alfabetização da água, empoderamento e formulação de políticas para uma sociedade de baixo carbono, mais sustentável e resiliente.

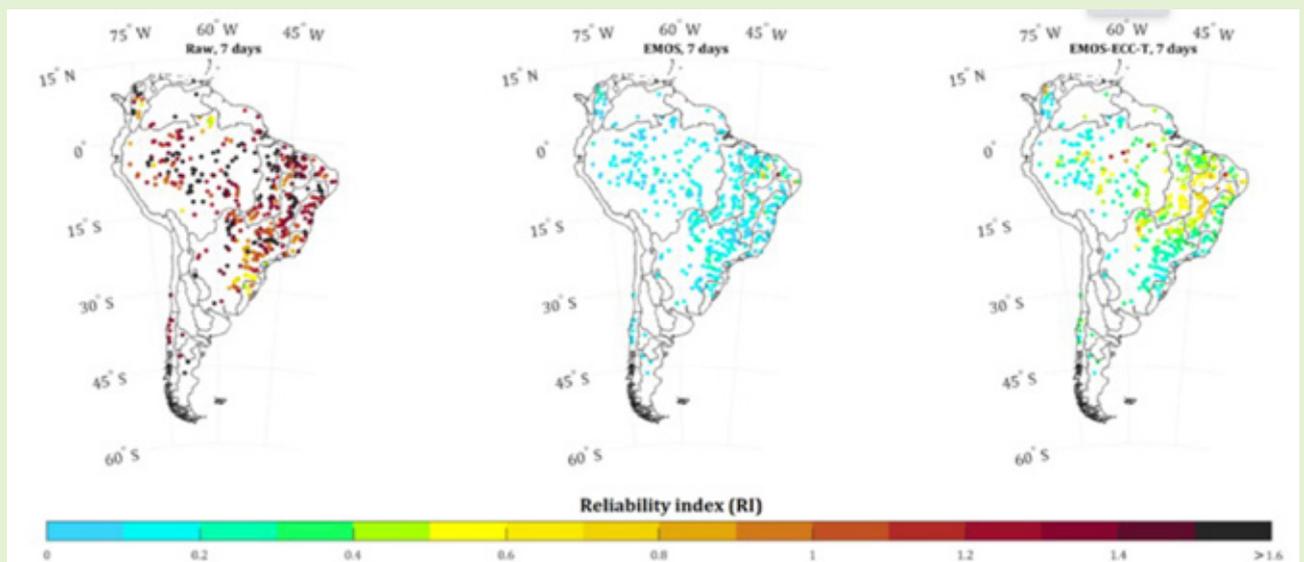
## Percursos adaptativos ao cidadão e soluções baseadas na natureza

Dessa forma, a Lei Federal de Pagamento por Serviços Ecossistêmicos (nº 14.119, Art. 4º, inciso X) postula: “assegurar a prestação de contas das informações relativas aos serviços ambientais com a participação da sociedade”. Quanto mais frequentes os extremos meteorológicos/climáticos e os impactos da Covid-19, maior a percepção dos cidadãos sobre a segurança hídrica e possíveis soluções, sejam elas proativas ou mesmo reativas. Desta forma, os métodos ecoidrológicos participativos do INCT-MC2 usando dados de sensoriamento da água dos cidadãos requerem conhecimento alternativo sobre valores sociais empíricos, crenças e normas,

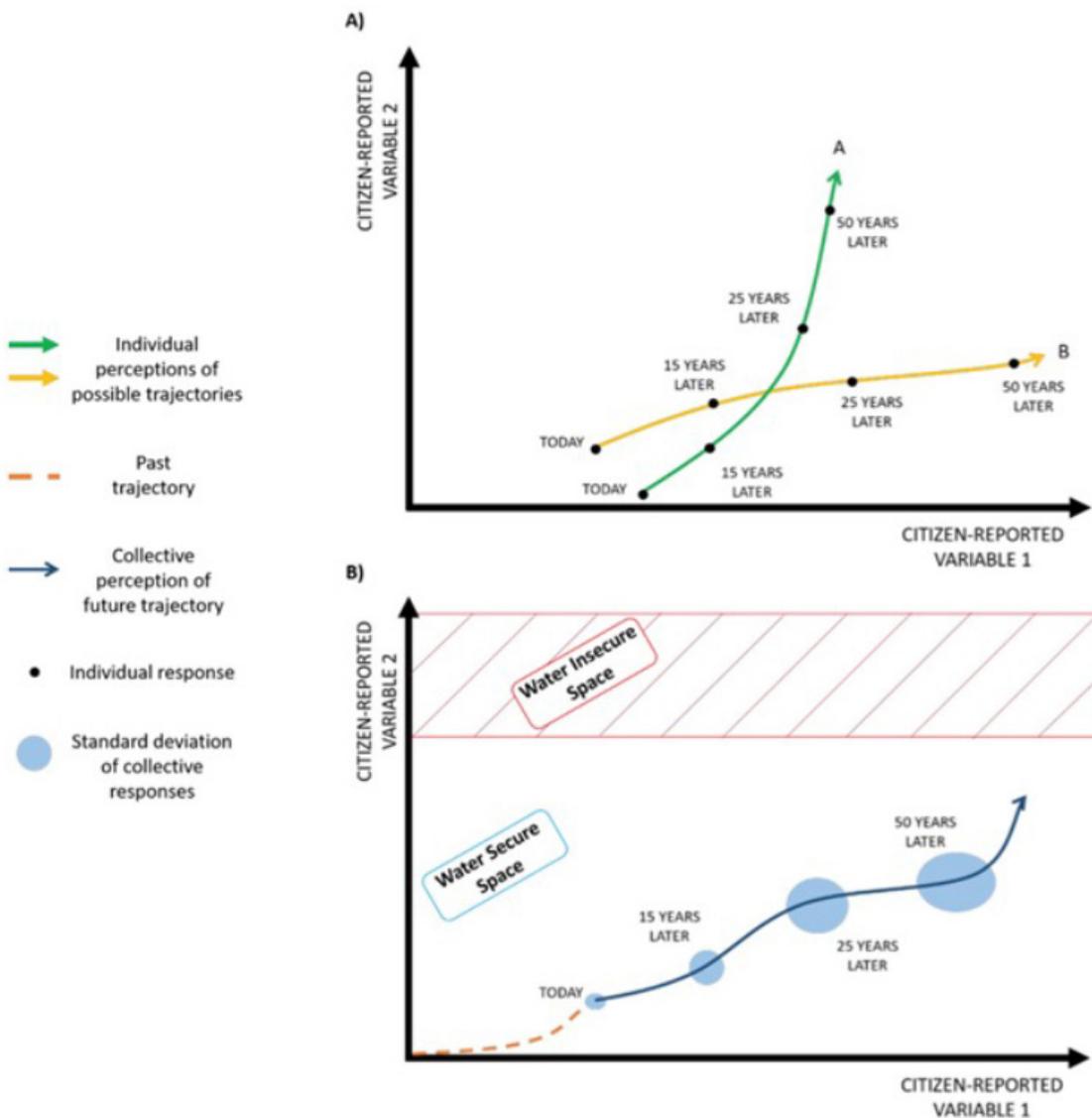
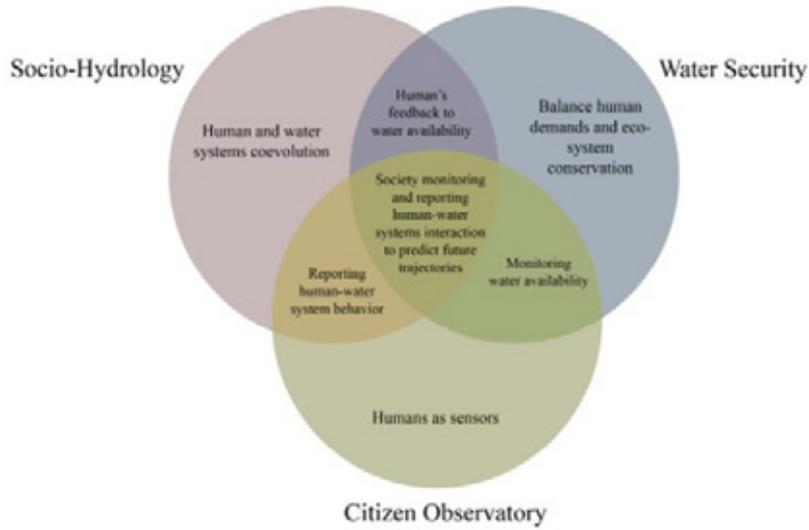
implícitos tanto na Sócio-Hidrologia (SH) quanto nas Soluções baseadas na Natureza (NbS) para sistemas hídricos (NbS-água). No entanto, SH e NbS emergentes ligados à ciência cidadã ainda lutam quando grupos sub-representados mal participam. Portanto, o INCT-MC2 apresentou um método de coevolução, por meio de SH e NbS-água, que entrelaça as histórias das crenças dos cidadãos em relação à sustentabilidade da bacia hidrográfica em cenários de mudança climática. Da mesma forma, especialistas induzidos pelo INCT-MC2 racionalizam novas métricas viáveis com percepções ecohidrológicas participativas, a partir da elucidação de desigualdades de valores de água cidadã. Assim, este método de baixo para cima de assistir tanto SH quanto NbS-água sistematiza as respostas dos voluntários em variáveis mensuráveis de métricas baseadas no cidadão para delinear caminhos adaptativos. Aplicações em bacias urbanas revelam perspectivas, paradoxos, normas e preferências em mudança dos cidadãos sobre segurança hídrica, tecnologia e economia verde (ver Figura 8). Ao admitir igualmente diversas percepções ecohidrológicas, esse método de baixo para cima desvenda ecossistemas coevolutivos e barreiras para uma governança robusta da água. Portanto, facilita políticas de cima para baixo, interfaces de SH, água NbS acessível e potenciais empregos ecohidrológicos.

### Alternativas de segurança hídrica em bacias hidrográficas de médio porte

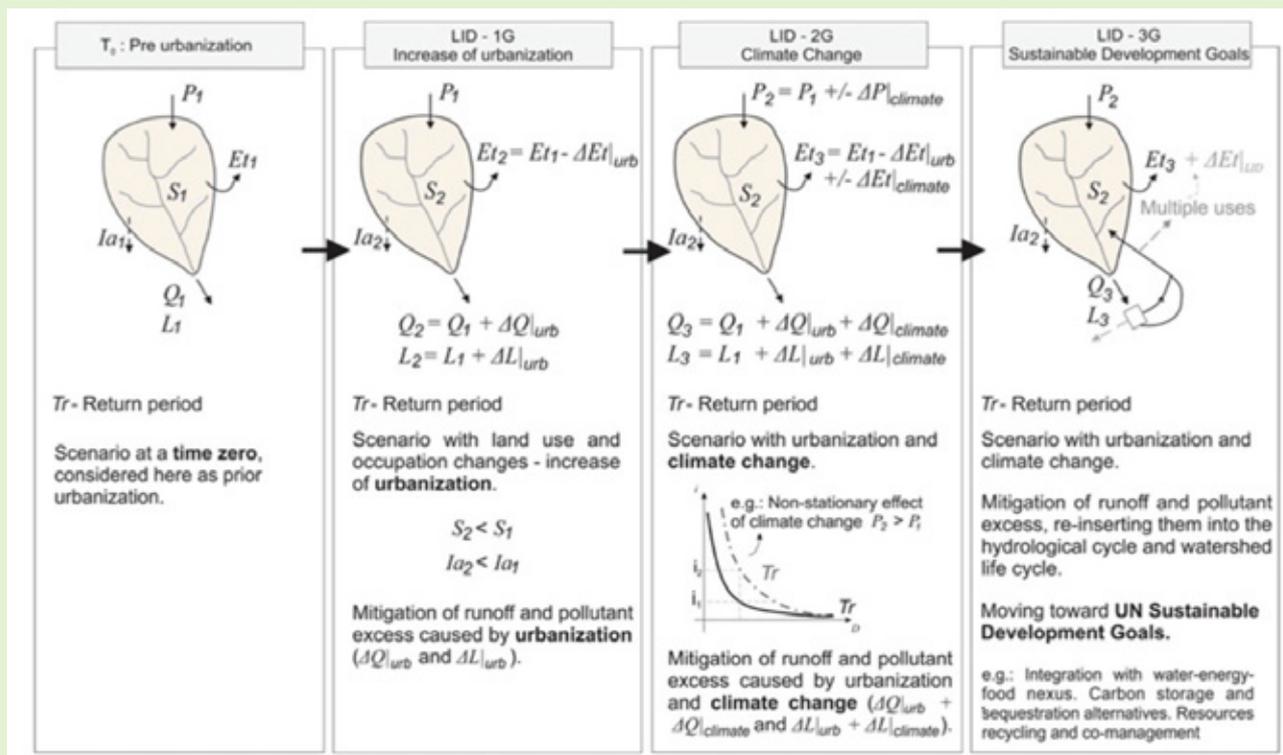
As métricas de segurança hídrica são dependentes de escala, altamente não estacionárias e correlacionadas com políticas com o quadro legal brasileiro em mudança, progressivamente redefinidas pelas promulgações nº 9433 (ano 1997), nº 11445 (ano 2007), nº 14026 (ano 2020) e recentemente com nº 14119 (ano 2021). Assim, o INCT-MC2 explorou como as métricas de segurança hídrica dependem de práticas de desenvolvimento de baixo impacto no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, por meio de um novo conceito (Figura 9), lições aprendidas e desafios para bacias hidrográficas de médio porte. Para contribuir com o aumento da resiliência nos centros urbanos, práticas sustentáveis têm sido utilizadas como uma nova abordagem de mitigação e adaptação nos sistemas de drenagem urbana, visando à retenção do escoamento, atenuação do pico de vazão, remoção de poluentes e restauração de serviços ecossistêmicos (por exemplo, reciclagem de recursos, sequestro de carbono, conforto térmico e integração paisagística).



**Figura 7** – Mapas RI (Reliability Index) de previsões de fluxo de fluxo de conjunto para um tempo de espera de sete dias. Os resultados são mostrados para o ensemble bruto (esquerda), pós-processamento univariado EMOS (centro) e pós-processamento multivariado EMOS-ECC-T (direita). Fonte: Siqueira et al. (2021).



**Figura 8** – Parte Superior: Relações Sócio-Hidrologia (círculo esquerdo), Segurança Hídrica (círculo direito) e Observatório Cidadão (círculo inferior). Parte Inferior: trajetórias individuais (linhas) e coletivas (linhas com elipses de incertezas) de variáveis sociohidrológicas.  
 Fonte: Souza (2020) <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-22052019-101145>



**Figura 9** – Conceito e evolução das gerações de práticas sustentáveis em termos de variáveis de balanço hídrico e finalidade de mitigação e adaptação. Na figura,  $P_1$ ,  $Et_1$ ,  $Q_1$ ,  $L_1$ ,  $S_1$ ,  $Ia_1$  e  $Tr$  representam, respectivamente, precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, carga poluente, capacidade de armazenamento do solo, infiltração e período de retorno ao cenário base de pré-urbanização.

Fonte: Macedo et al. (2021), <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1886889>

## PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

1. KREIBICH, H, VAN LOON, A, SCHRÖTER, K, et al. 2022, The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management, Nature, 608, 4 August 2022, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>.
2. SIQUEIRA VA, ALBRECHT W, KLEIN, V, et al. (2021) Postprocessing continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts in South America using Ensemble Model Output Statistics and Ensemble Copula Coupling, Journal of Hydrology, 600, September 2021, 126520.
3. CUARTAS, L A; CUNHA, A P M A; ALVES, J A; PARRA, L M P; DEUSDARÁ-LEAL, K; COSTA, L C O; MOLINA, R D; AMORE, D; BROEDEL, E; SELUCHI, M E; CUNNINGHAM, C; ALVALÁ, R C S; MARENGO, J A. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. Water, v. 14, p. 601, 2022.
4. KREIBICH, H., SOUZA, F. A. A.; ARIAS, D. A. G.; MOHOR, G. S.; MENDIONDO, E M, et al. 2023, Panta Rhei benchmark dataset: socio-hydrological data of paired events of floods and droughts, Earth System Science Data 15(5), <https://doi.org/10.5194/essd-15-2009-2023>.
5. MACEDO, M B; GOMES JÚNIOR, M N; et al. Modular Design of Bioretention Systems for Sustainable Stormwater Management under Drivers of Urbanization and Climate Change. Sustainability, v. 14, p. 6799, 2022.
6. SONE, J. S.; ARAUJO, T. F.; GESUALDO, G. C.; BALLARIN, A. S.; CARVALHO, G. A.; OLIVEIRA, P.T. S.; WENDLAND, E. C. . Water Security in an Uncertain Future: Contrasting Realities from an Availability-Demand Perspective. WATER RESOURCES MANAGEMENT, v. xx, p. 1-17, 2022.
7. SOUZA, F. A. A.; MOHOR, G. S; GUZMÁN ARIAS, D. A; BUARQUE, A. C. S; TAFFARELLO, D; MENDIONDO, E. M. Droughts in São Paulo: challenges and lessons for a water-adaptive society. Urban Water Journal, v. 19, p. 1-13, 2022.

# Saúde e mudanças climáticas

## Fluxo de informações de saúde em desastres decorrentes de inundações e enxurradas no estado de Minas Gerais

Os resultados apontaram para a ausência de um fluxo de informações sobre desastres previamente estabelecido na maioria das instituições e municípios pesquisados, onde a troca de informações acontece apenas na etapa de resposta. Não há comunicação prévia de risco nas etapas que antecedem o evento, o que poderia contribuir para minimizar os impactos à população.

Embora o Vigidesastres tenha começado a ser discutido há quase duas décadas, ainda é uma área incomum entre os trabalhadores do setor. Reitera-se que o envolvimento da vigilância em saúde na gestão de riscos é de suma importância em todas as etapas do processo e deve ocorrer de forma mais incisiva, articulada com os diversos níveis de atenção à saúde, inter e intraorganizacional, a fim de reduzir e controlar os impactos de desastres na saúde pública.

As principais limitações elencadas estão relacionadas ao capital humano e poderiam ser mitigadas com ações não estruturais que estimulem o trabalho em equipe, a qualificação das pessoas envolvidas na coleta, armazenamento, processamento e disseminação das informações. Tais limitações estão resumidas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Limitações e estratégias na gestão de riscos.

Limitações	Estratégias
<ul style="list-style-type: none"><li>• Imprecisão sobre o que é um desastre;</li><li>• A falta de informação sobre o tema;</li><li>• A falta de coordenação entre as instituições envolvidas em uma situação de desastre;</li><li>• Interferência de questões políticas;</li><li>• A falta de profissionais capacitados para os cargos que ocupam;</li><li>• A falta de integração entre a defesa civil e a comunidade;</li><li>• A visão da saúde no sentido biomédico;</li><li>• Ausência de rede de transmissão de informações previamente estabelecida.</li></ul>	<p>Avanços na discussão do campo teórico para as práticas institucionais;</p> <p>A formação de profissionais;</p> <p>Melhorar a articulação intra e interinstitucional;</p> <p>Espaços de discussão para troca de informações - (por exemplo, reuniões periódicas com grupos de gestores);</p> <p>Estimular a participação popular nas ações de defesa e proteção civil por meio de campanhas nas escolas e criação de núcleos de defesa civil na comunidade;</p> <p>Integração de diferentes sistemas de informação.</p>

## A saúde em situações de seca para o Semiárido brasileiro – a proposta de um índice de vulnerabilidade da saúde em situações de seca

Os resultados indicaram quatro principais fatores emergentes da relação saúde-seca no Semiárido: saúde e seus determinantes, economia rural e acesso à água, resultados e infraestrutura de saúde e estrutura rural e capital social. De modo geral, observou-se uma diferenciação entre os municípios ruralizados, nos quais predominavam as condições de agricultura familiar, baixo acesso à água encanada, baixa renda, secas recorrentes e mão de obra agrícola, enquanto os municípios com agricultura comercial (mais urbanizada) tinham renda média mais alta, maior distribuição de leitos e profissionais de saúde, menos períodos de seca e maior acesso a água e saneamento.

O agrupamento dessas características em um índice, denominado Índice de Vulnerabilidade em Saúde (IVS), permitiu a identificação de focos no Semiárido onde as condições de vida e saúde são menos desenvolvidas, exigindo maior aplicação de recursos humanos e financeiros para capacitar os municípios a mitigar os efeitos adversos das secas. O HVI representa o agrupamento dos quatro fatores observados para a região, variando de 0 (menos vulnerável) a 1 (mais vulnerável) (Figura 10). Houve um agrupamento de maiores valores do índice na porção centro-oeste e outros aglomerados nas porções nordeste e sul da região. Esses são os locais que mais precisam de atenção na relação seca-saúde no Semiárido e que podem se tornar ainda mais vulneráveis diante das intempéries climáticas atuais/futuras. Isso porque as mudanças na temperatura média anual são projetadas mais para o Nordeste brasileiro do que para outras partes do mundo, demonstrando que os impactos locais podem ser muito mais fortes, o que pode agravar cenários de vulnerabilidade em um futuro próximo.

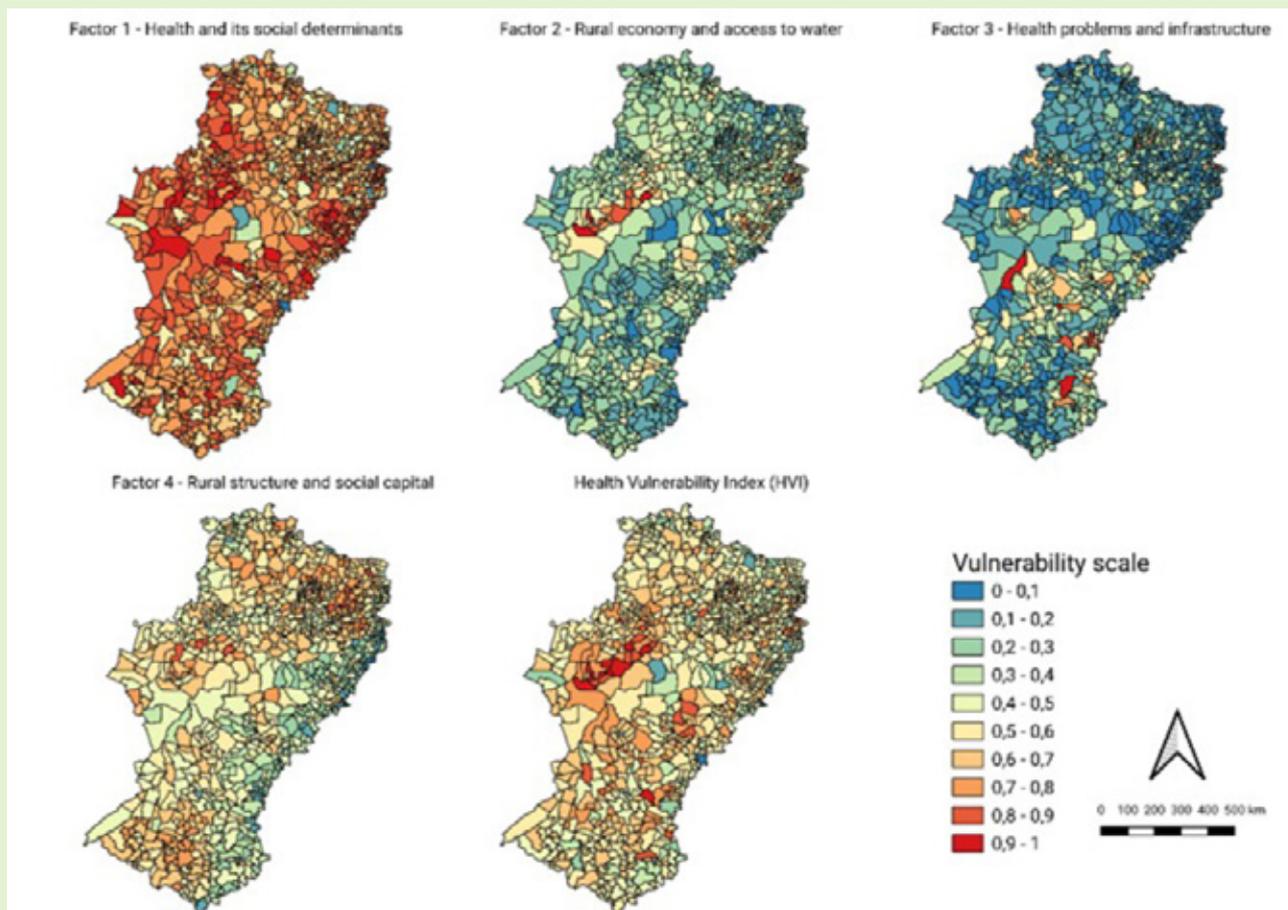


Figura 10. Distribuição das vulnerabilidades do Semiárido para cada fator identificado.

### Analizando a epidemia de Sars-Cov 2 sob uma perspectiva socioclimática

Os resultados mostraram que as macrorregiões de Minas Gerais apresentaram diversidade de condições habitacionais e demográficas. O Vale do Aço é a macrorregião com maior percentual de pessoas em situação de vulnerabilidade devido às condições de saneamento, seguida pela macrorregião Leste. A macro Norte apresentou o maior percentual de domicílios com alta densidade de mais de duas pessoas por dormitório. O percentual de mulheres foi semelhante entre as doze macrorregiões.

A incidência cumulativa de Covid-19 no período analisado foi maior, respectivamente, nas macrorregiões Triângulo do Norte e Vale do Aço, enquanto a menor incidência cumulativa foi identificada em Jequitinhonha. A incidência média no período foi maior na macrorregião Centro, seguida do Vale do Aço.

A macrorregião Leste apresentou as maiores temperaturas mínimas, máximas e médias. A menor temperatura mínima foi identificada na macrorregião Sul, enquanto a menor temperatura máxima foi na macrorregião Centro-Sul. Foi identificada correlação estatisticamente significativa e muito fraca entre a incidência diária de Covid-19 e a temperatura mínima nas macrorregiões Centro-Sul, Leste, Noroeste, Oeste, Sul, Triângulo Norte e Vale do Aço. Com as temperaturas médias, as correlações foram estatisticamente significativas e muito fracas no Centro, Leste, Sudeste, Nordeste, Noroeste, Sudeste, Sul e Triângulo Sul. Com as temperaturas máximas, foi identificada correlação estatisticamente significativa e muito fraca nas macrorregiões Centro, Leste, Sudeste, Nordeste, Sudeste e Triângulo Norte. (Tabelas 3, 4, 5).

**Tabela 3** - Modelo de regressão linear múltipla considerando a incidência cumulativa de Covid-19 como desfecho e variáveis sociodemográficas e de saúde como independentes.

Variáveis	Erro padrão	Coefficiente	Valor de p	IC95%
Percentual em vulnerabilidade por condições de saneamento	0,442	0,352	0,572	-5,272; 5,977
Percentual de domicílios com alta densidade	0,729	-0,478	0,631	-9,749; 8,793
Estimativa populacional de zero a quatro anos	0,050	0,017	0,790	-0,624; 0,650
Percentual de mulheres	555.7976	232,569	0,748	-6829,508; 7294,648
População residente	0,002	-0,001	0,709	-0,032; 0,0304
Densidade populacional	0,054	-0,029	0,688	-0,732; 0,665
População residente com 65 ou mais	0,007	0,008	0,477	-0,088; 0,104
Auxílio emergencial	0,001	-0,0006	0,784	-0,023; 0,021
Famílias beneficiadas pelo Bolsa Família	0,009	0,005	0,651	-0,114; 0,125
IFDM emprego e Renda	44.6340	11.360	0,841	-555,768; 578,489
Proporção da população atendida pela ESF	0,493	-0,189	0,767	-6,463; 6,084
Gasto per capita com atividades de saúde	0,015	0,006	0,755	-0,186; 0,198
Constante	208,3161	-99,804	0,716	-2746,711; 2547,102

**Tabela 4** - Correlação entre variáveis de temperatura e incidência diária de Covid-19 nas macrorregiões de Minas Gerais entre 01/03/2020 e 08/04/2021.

Macrorregiões	Temperatura mínima		Temperatura média		Temperatura máxima	
	R	Valor de p <sup>†</sup>	r	Valor de p <sup>†</sup>	r	Valor de p <sup>†</sup>
Centro	-0,002	0,968	0,099	0,048	0,126	0,011
Centro Sul	0,122	0,014	0,076	0,129	0,065	0,195
Jequitinhonha	0,025	0,620	0,087	0,082	0,092	0,067
Leste	0,103	0,040	0,114	0,022	0,100	0,045
Leste do Sul	0,076	0,128	0,126	0,011	0,115	0,022
Nordeste	0,073	0,144	0,134	0,007	0,144	0,004
Noroeste	0,101	0,043	0,101	0,043	0,044	0,379
Norte	0,050	0,318	0,043	0,318	0,076	0,131
Oeste	0,103	0,040	0,068	0,172	0,019	0,703
Sudeste	0,075	0,136	0,106	0,033	0,113	0,024
Sul	0,178	<0,001	0,140	0,005	0,029	0,560
Triângulo do Norte	0,105	0,035	0,047	0,351	0,115	0,021
Triângulo do Sul	0,047	0,346	0,102	0,040	0,026	0,595
Vale do aço	0,099	0,048	0,079	0,115	0,083	0,098

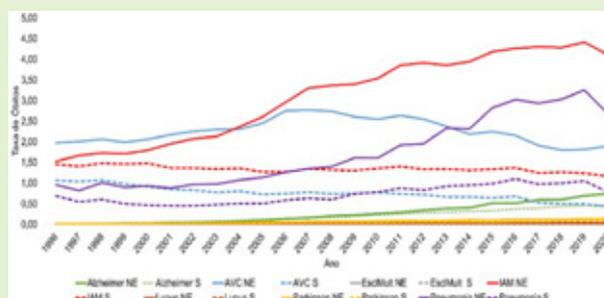
<sup>†</sup> Teste de correlação de Pearson.

**Tabela 5** - Correlação entre variáveis de temperatura e incidência diária de Covid-19 nas macrorregiões de Minas Gerais entre 01/03/2020 e 08/04/2021.

Macrorregiões	Temperatura mínima		Temperatura média		Temperatura máxima	
	R	Valor de p†	r	Valor de p†	r	Valor de p†
Centro	-0,002	0,968	0,099	0,048	0,126	0,011
Centro Sul	0,122	0,014	0,076	0,129	0,065	0,195
Jequitinhonha	0,025	0,620	0,087	0,082	0,092	0,067
Leste	0,103	0,040	0,114	0,022	0,100	0,045
Leste do Sul	0,076	0,128	0,126	0,011	0,115	0,022
Nordeste	0,073	0,144	0,134	0,007	0,144	0,004
Noroeste	0,101	0,043	0,101	0,043	0,044	0,379
Norte	0,050	0,318	0,043	0,318	0,076	0,131
Oeste	0,103	0,040	0,068	0,172	0,019	0,703
Sudeste	0,075	0,136	0,106	0,033	0,113	0,024
Sul	0,178	<0,001	0,140	0,005	0,029	0,560
Triângulo do Norte	0,105	0,035	0,047	0,351	0,115	0,021
Triângulo do Sul	0,047	0,346	0,102	0,040	0,026	0,595
Vale do aço	0,099	0,048	0,079	0,115	0,083	0,098

### Análise da variabilidade espacial e temporal da taxa de mortalidade no Brasil associada a variações do eletromagnetismo atmosférico

Análises da evolução dos óbitos através das taxas para as regiões Nordeste e Sul são apresentadas a partir da Figura 11. O período corresponde ao intervalo entre os anos de janeiro/1996 e dezembro/2020. Nota-se que, em 2020, as três maiores taxas de óbitos são encontradas na região Nordeste com destaque para Infarto Agudo do Miocárdio (IAM) com a maior taxa de óbitos sobre todos os demais óbitos em ambas regiões, seguido por Pneumonia e Acidente Vascular Cerebral (AVC). Embora com taxa bem menor, IAM destaca-se também na região sul como a maior taxa de óbitos da região, porém, esses óbitos parecem diminuir com o passar dos anos. Doenças como Esclerose Múltipla, Lúpus e Parkinson apresentam taxas de óbitos abaixo de 0,3% e sobrepõem-se no gráfico.

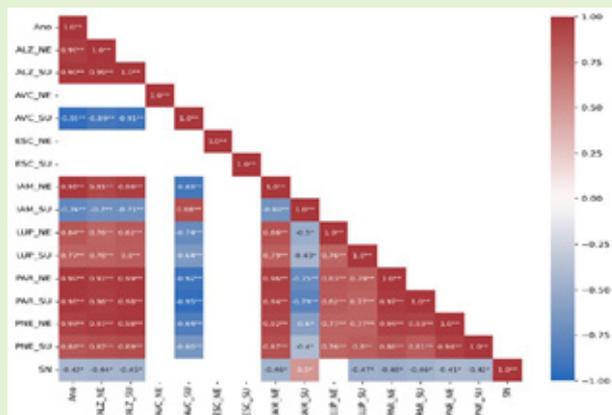


**Figura 11** - Taxas de óbitos por Alzheimer (verde), AVC (azul), Esclerose Múltipla (azul escuro), Infarto Agudo do Miocárdio (vermelho), Lúpus (marrom), Parkinson (amarelo), Pneumonia (roxo) classificadas por regiões, sendo NE (linha cheia) e S (linha tracejada).

A partir do “mapa de calor” para combinações de médias anuais de taxas de óbitos por doenças e o número de manchas solares (SN) para a região NE e região S, apresentado na Figura 12, é possível verificar que doenças como Acidente Vascular Cerebral (AVC) e Esclerose Múltipla (ESC) não possuem significância estatística e também Lúpus na região Nordeste (LUP\_NE). Por outro lado, todas as demais doenças analisadas apresentaram significância estatística ao nível de 95% ( $p < 0,05$ ) nas regiões Nordeste e Sul rejeitando-se a hipótese

nula, para todos os casos, e pode-se afirmar ter encontrado uma diferença estatisticamente significativa.

Importante notar que dentre as doenças analisadas, as correlações apresentam-se negativas, ou seja, aumentam quando reduzem o nº de manchas solares, exceto para Infarto Agudo do Miocárdio na região Sul (IAM\_SU), que apresenta correlação direta. Quando as doenças são comparadas com a ordem crescente dos anos no “mapa de calor” (Figura 12), pode-se notar que em sua maior parte elas apresentam correlações positivas, relacionadas ao crescimento de número de óbitos por essas doenças ao passar dos anos. Somente o IAM na região Sul e AVC também na região Sul mostraram correlações inversas, ou seja, essas doenças parecem diminuir com o passar do tempo.



**Figura 12** – “Mapa de calor” para combinações de médias anuais de taxas de óbitos por doenças e o número de manchas solares (SN) para a região NE e região S. As caixas brancas indicam ausência de significância estatística, enquanto (\*) p<0,1 e (\*\*) p<0,005. Doenças analisadas: ALZ (Alzheimer), AVC (acidente vascular cerebral), ESC (esclerose múltipla), IAM (infarto agudo do miocárdio), LUP (Lúpus), PAR (Parkinson), PNE (pneumonia) e atividade geomagnética: SN (número de manchas solares), cada doença tem sua legenda seguida da região de análise, sendo a região Nordeste (NE) e a região Sul (SU).

No mesmo período houve ocorrência em média de 1.577,9 manchas solares e dois máximos solares 23 e 24. As análises das tendências mostram claramente o aumento das taxas de óbitos para as doenças exceto na região Sul para AVC, Esclerose Múltipla, Infarto Agudo do Miocárdio as quais mostram uma tendência negativa para taxa de óbitos. Esses resultados são mais bem analisados em conjunto com a Tabela 6 onde apresenta-se a Equação da Tendência e Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para as taxas de óbitos para cada região.

As análises das tendências mostram claramente que as maiores tendências de aumento são apresentadas para IAM e Pneumonia, principalmente na região Nordeste. Os maiores coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) foram encontrados na região Nordeste para Alzheimer (R<sup>2</sup>=0.925), IAM (R<sup>2</sup>=0.951) e para Parkinson (R<sup>2</sup>=0.976) e para a região Sul para Alzheimer (R<sup>2</sup>=0.971) sendo estes os modelos lineares mais explicativos e com maior correlação direta com as Manchas Solares.

**Tabela 6** - Equação da Tendência e Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para a taxa de óbitos entre os anos de 1996 e 2020 para as regiões NE e S.

Taxa de óbitos	Região NE		Região S	
	Eq. da Tendência	R <sup>2</sup>	Eq. da Tendência	R <sup>2</sup>
Alzheimer	y = 0,031x - 0,1449	0,9258	y = 0,0198x - 0,0558	0,9715
AVC	y = -0,0032x + 2,3035	0,0006	y = -0,022x + 1,0424	0,8951
Esclerose Múltipla	y = 0,0002x + 0,0066	0,2557	y = -2e <sup>-5</sup> x + 0,0073	0,0158
IAM	y = 0,1357x + 1,3250	0,9518	y = 0,0081x + 1,4494	0,5737
Lúpus	y = 0,001x + 0,0020	0,8318	y = 0,0002x + 0,0093	0,5889
Parkinson	y = 0,0055x - 0,0001	0,9764	y = 0,0031x + 0,0105	0,9703
Pneumonia	y = 0,1062x + 0,3471	0,8910	y = 0,0245x + 0,4031	0,7122

## Cenários futuros de risco para surtos epidêmicos das leishmanioses no Brasil

Dada a complexidade e o desafio do controle das leishmanioses, tanto a Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA) como a Leishmaniose Visceral Americana (LVA), a indicação de cenários futuros de risco para surtos epidêmicos pode otimizar custos e facilitar o planejamento de ações bem direcionadas com foco no monitoramento e vigilância dos impactos ambientais no Brasil.

O país, de clima tropical, é particularmente vulnerável ao aumento da incidência de doenças transmitidas por vetores, no contexto das mudanças climáticas globais. Estima-se que tais eventos possam impactar em especial a distribuição geográfica, densidade populacional, sazonalidade, prevalência da infecção e carga parasitária de vetores. A ecoepidemiologia das

leishmanioses apresenta-se como extremamente complexa, considerando que participam do ciclo de transmissão diferentes espécies de vetores, parasitos e hospedeiros, em nichos ecológicos restritos.

Devido aos novos e complexos cenários epidemiológicos, as transmissões focais e dinâmicas das leishmanioses ocorrem em diferentes padrões, dependendo da localização no Brasil. Com relação à LTA, observa-se um exemplo importante desse fenômeno através da ampla distribuição e vários padrões de comportamento de *Lutzomyia whitmani*, seu principal vetor, presente em quase todos os tipos de vegetação. Essa ampla presença reforça a hipótese de que a espécie é notável e que pode se adaptar facilmente a diferentes ambientes. Seus cenários para 2050 indicam aumento de sua área de adequabilidade climática, principalmente nas porções norte e sul de sua atual área de distribuição. Os mesmos cenários indicam um potencial de expansão deste vetor para o interior da Amazônia. *Lutzomyia flaviscutellata* tem atualmente distribuição ampla no país, com registros de ocorrência na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. Cenários para 2050 indicam aumento de sua área de adequabilidade climática, especialmente na região Sudeste e na Amazônia ocidental. *Lutzomyia intermedia* e *Lutzomyia neivai* são espécies que se distribuem essencialmente em áreas de Mata Atlântica, com alguns poucos registros no Cerrado. Para a primeira, cenários futuros indicam redução de sua área de adequabilidade climática, com potencial deslocamento em direção à região Nordeste a partir de sua distribuição atual mais concentrada no Sudeste. Já para a segunda espécie, os cenários indicam aumento da área climaticamente favorável à sua ocorrência, com potencial expansão em direção a região Sul. Ao combinar os cenários de ambas espécies, foi possível perceber que a atual área de simpatria das duas espécies (interior de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul) pode ser reduzida sob impacto das mudanças climáticas. Em relação à *Lutzomyia wellcomei* e *Lutzomyia complexa*, espécies evolutivamente próximas de vetores da doença, o clima e outras mudanças ambientais podem afetar seus papéis como vetores. A segunda

espécie mostra tolerância a uma faixa mais ampla de temperaturas em relação a primeira espécie, enquanto esta ocorre em áreas com menor precipitação que as áreas de ocorrência de *L. complexa*. Resultados preliminares dos modelos de nicho ecológico em cenário de mudanças climáticas para 2050, apontam uma expansão das áreas de adequabilidade climática de *L. complexa* em direção ao oeste amazônico, enquanto *L. wellcomei* terá condições climáticas mais favoráveis em direção ao litoral norte e nordeste do país. *Lutzomyia umbratilis*, vetor de LTA no Norte do Brasil, observa-se sua expansão para a Região Centro-Oeste. *Lutzomyia migonei* vetor secundário de LTA na região Sudeste, mas também um importante vetor de LVA no Brasil, tem distribuição por vários Estados, e os cenários para 2050 indicam um ligeiro aumento de sua área de adequabilidade climática para a região Sul (Figura 13).

O principal vetor de LVA é *Lutzomyia longipalpis*, que possui ampla distribuição, presente em todas as regiões do Brasil. Cenários para 2050 indicam que sua área de adequabilidade climática se manterá estável na maior parte do país, com expansão principalmente na região Sul e contração na Amazônia ocidental. A distribuição potencial de *Lutzomyia cruzi*, vetor secundário de LVA, foi também avaliada, através de modelos combinando clima e cobertura vegetal em múltiplas escalas espaciais. A espécie restrita à região Centro-Oeste, observa-se para os cenários para 2050 uma pequena expansão para as regiões Norte e Sudeste do país (Figura 14).

### **Vulnerabilidade dos municípios do estado do Rio de Janeiro em relação à Leishmaniose Visceral Americana**

Com relação ao estado do Rio de Janeiro, foram identificados 62 (67%) municípios vulneráveis, sendo 09 (8%) receptivos, e apenas um município foi classificado como silencioso e não vulnerável (Aperibé). O Rio de Janeiro possui apenas 17 (18%) municípios com levantamento entomológico e registros do vetor. A transmissão da LVA atualmente ocorre em 32% do Estado e classificada como esporádica. Aproximadamente 82% de todo o Estado, e dentre os municípios vulneráveis, 85%

dos municípios não possuem informações sobre flebotomíneos, o que mostra uma clara necessidade de estudos entomológicos.

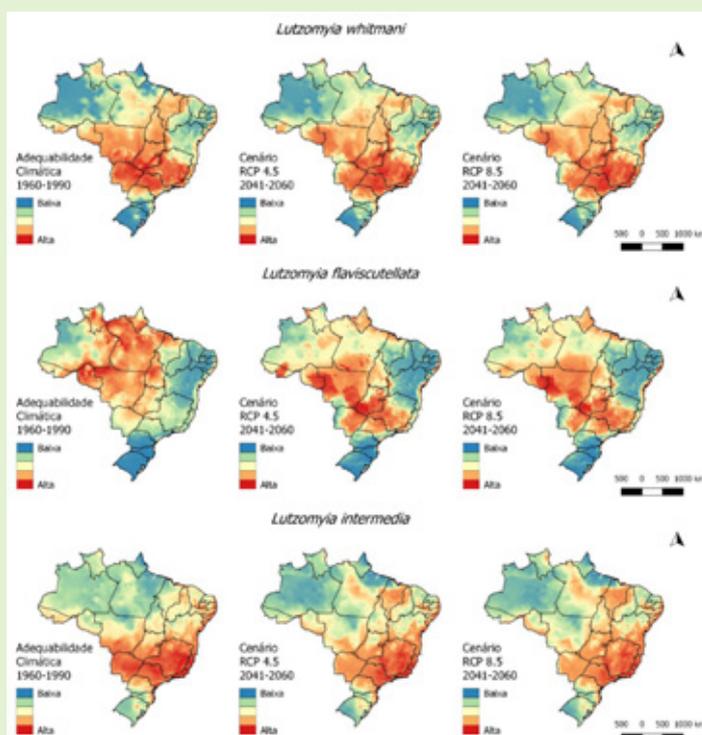
Sabe-se que as notificações de casos humanos e caninos de LVA ainda são precárias, fato que precisa ser revisto, pois são dados essenciais para que as ações de vigilância e controle sejam implementadas de forma eficiente no Estado e nos municípios. Após a detecção do vetor em municípios vulneráveis, as ações de controle recomendadas são: ações de educação em saúde, gestão ambiental e investigação canina, visando à detecção precoce dos casos de LVA.

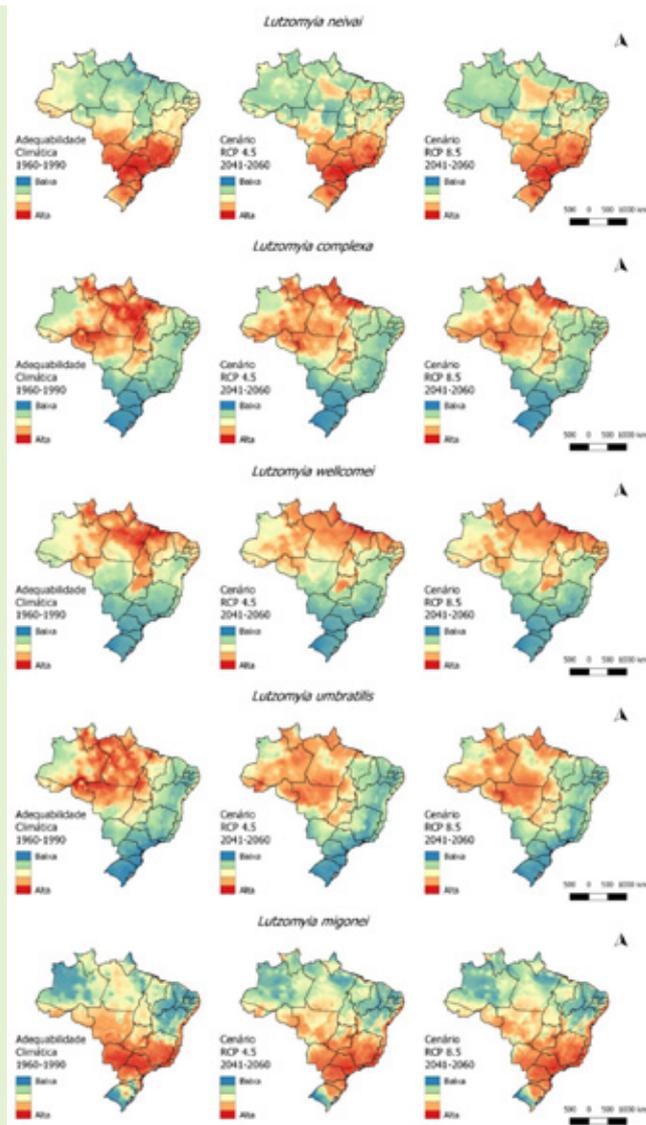
### Incidência de SARS-CoV-2 e influência de características ambientais

O estudo visa modelar a distribuição espacial de doenças transmissíveis em diferentes cenários de aquecimento global e entender como isso impactará a probabilidade de surgimento de novos casos. Embora o conhecimento etiológico, clínico e epidemiológico esteja evoluindo, alguns estudos sugerem que a incidência de SARS-CoV-2 pode ser influenciada por características ambientais, como diferenças climáticas regionais. Além das condições climáticas, a poluição do ar foi estudada como um cofator para a letalidade da Covid-19, pois a maioria das condições pré-existentes que aumentam o risco de morte por SARS-CoV-2 também podem ser afetadas pelo longo prazo da exposição à poluição do ar. Aqui, investigamos as características climáticas regionais na distribuição dos casos de Covid-19 no Brasil e os possíveis efeitos da poluição do ar na letalidade do SARS-CoV-2 no Brasil. Este é um estudo ecológico que busca estimar a probabilidade de condições climáticas favoráveis para a ocorrência de casos de Covid-19 e leishmaniose tegumentar americana utilizando casos georreferenciados para o período de 2020-2021; e, em segundo lugar, as taxas de letalidade da Covid-19 em 2020/2021 para cada município do Brasil serão relacionadas às concentrações médias de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) extraídas do período 2003-2020. Para a construção de modelos para prever cenários futuros de aquecimento para doenças, será utilizado um modelo de distribuição de espécies (proposto para prever distribuições de espécies

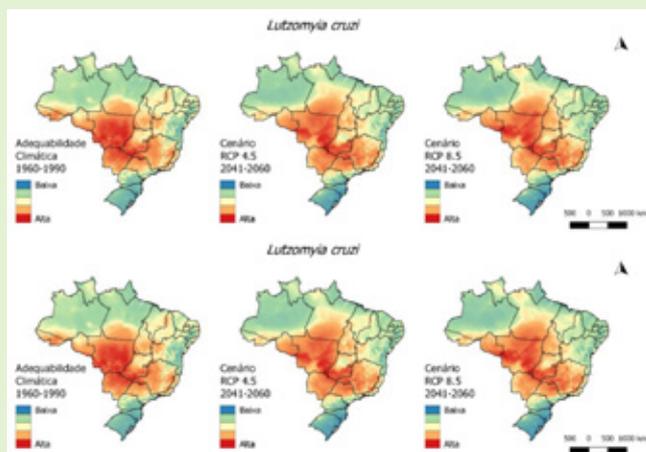
com base em covariáveis ambientais para cada ponto de grade do modelo. As variáveis ambientais foram extraídas do banco de dados gerado a partir do modelo climático regionalizado do IPCC Eta-HadGEM2 ES RCP 8.5, para os cenários de aquecimento global IPCC 1,5°C, 2,0°C e 4,0°C, para os anos de 2020 a 2100.

Como resultados preliminares, a análise da adequação e contribuição da variável bioclimática para a modelagem de alta incidência cumulativa de Covid-19 indicou que as variáveis: temperatura média anual, sazonalidade da temperatura, amplitude térmica anual, precipitação anual e sazonalidade da precipitação apontam para uma maior contribuição para o modelo geral em relação às demais variáveis utilizadas. Das cinco variáveis selecionadas, o intervalo de temperatura anual teve a melhor contribuição relativa para os sete modelos selecionados para a modelagem e a temperatura média anual foi a variável que deu a menor contribuição para a modelagem. As áreas destacadas em vermelho no mapa apresentaram pontos de alta adequação climática (ou seja, maior probabilidade de fatores climáticos estarem contribuindo para os altos indicadores de saúde investigados), principalmente nas regiões Norte e Sul e em alguns pontos da região Centro-Oeste (Figura 15).

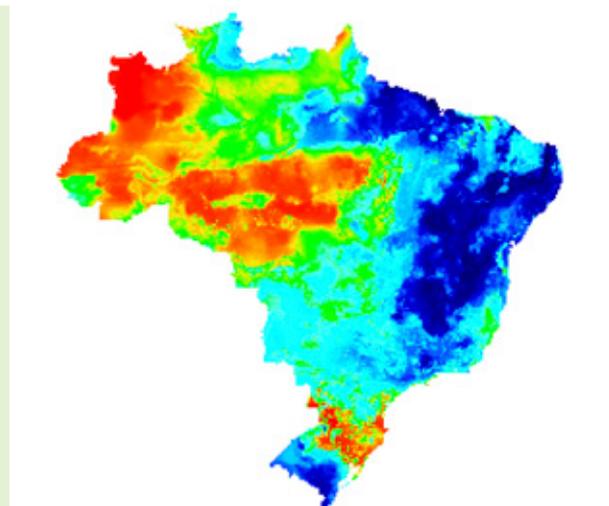




**Figura 13** – Adequabilidade climática de *Lutzomyia whitmani*, *L. flaviscutellata*, *L. intermedia*, *L. neivai*, *L. complexa*, *L. wellcomei*, *L. umbratilis* e *L. migonei* no Brasil nos cortes temporal atual (1960-1990) e futuro (2041-2060) nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (estabilização) e RCP 8.5 (alto aumento).



**Figura 14** – Adequabilidade climática de *Lutzomyia longipalpis* e *L. cruzi* no Brasil nos cortes temporal atual (1960-1990) e futuro (2041-2060) nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (estabilização) e RCP 8.5 (alto aumento).



**Figura 15** – Previsão de condições ambientais adequadas para a alta incidência cumulativa de Covid-19 nos anos de 2020 e 2021, Brasil. As áreas destacadas em vermelho no mapa apresentaram pontos de alta adequação climática (ou seja, maior probabilidade de fatores climáticos estarem contribuindo para os altos indicadores de saúde investigados), principalmente nas regiões Norte e Sul e em alguns pontos da região Centro-Oeste.

### PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

- SANTOS, R. B.; MENEZES, J. A. , CONFALONIERI, U. E. C. Early Stages of the Coronavirus disease (COVID-19) Pandemic in Brazil: National and Regional Contexts. In: Rais Akhtar. (Org.). Coronavirus (COVID-19) Outbreaks, Environment and Human Behaviour. SNED.Suiça: Springer Nature, 2021, p. 387-404.
- Rangel EF, Afonso MMS, Sotero-Martins A, Campos A, Coelho WN, Gama EL, Flores GL, Siqueira MM, Aguiar-Oliveira ML (2021). Can Climate and Environmental Factors Putatively Increase SARS-Cov2 Transmission Risks? American Journal of Biomedical Science & Research, v. 11, p. 294-299. ISSN: 2642-1747 Mini Review. <http://dx.doi.org/10.34297/AJBSR.2021.11.001647>
- Costa SM, Magalhães MAFM, Gracie RSG, Rangel EF (2021). Using geoprocessing techniques to analyze the geographic distribution of Nyssomyia whitmani (Diptera: Phlebotominae) associated with vegetation cover, and the impacts on the expansion of American Cutaneous Leishmaniasis (ACL) in Brazil. Parasites & Vector. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-276492/v1>
- Menezes, Júlia Alves; Madureira, Ana Paula; Santos, Rhavena Barbosa dos; Duval, Isabela de Brito; REGOTO, PEDRO; Margonari, Carina; Barata, Martha Macêdo de Lima; Confalonieri, Ulisses. 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.
- Castellanos, E. J.; Lemos, M. F.; Astigarraga, L.; Chacon, N.; Cuvl, N.; HuggeL, C.; Miranda, L.; Vale, M. M.; Ometto, J. P.; Peri, P. L.; Postigo, J. C.; Ramajo, L.; Roco, L.; Rusticucci, M.; Menezes, Júlia Alves. Central and South America. In: H.-O. Pörtner; D.C. Roberts; M. Tignor; E.S. Poloczanska; K. Mintenbeck; A. Alegria; M. Craig; S. Langsdorf; S. Lösckhe; V. Möller; A. Okem; B. Rama. (Org.). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022, p. 1689-1816.

# Segurança energética

O Brasil possui um vasto potencial de recursos de energia solar e experimentou um aumento na implantação de energia fotovoltaica nos últimos anos devido a incentivos governamentais e avanços tecnológicos. Em particular, as tecnologias de energia solar concentrada (CSP) têm mostrado um potencial notável para o Brasil em cenários de mitigação de mudanças climáticas, especialmente como fonte de calor complementar para processos industriais ou geração híbrida de energia. Deve-se notar, no entanto, que algumas áreas potenciais para o desenvolvimento de CSP, como as regiões Centro-Oeste e Sudeste, são frequentemente afetadas pela névoa de queima de biomassa durante a estação seca. Os dados de irradiância solar estão disponíveis apenas em algumas localidades do Brasil e são distribuídos de forma esparsa e heterogênea. As medições do componente direto da irradiação são ainda mais escassas, o que dificulta a avaliação do potencial dessa tecnologia. Os modelos numéricos surgiram como uma ferramenta útil para melhorar o monitoramento espacial da irradiância solar.

## **Geração de energia híbrida para aumentar a segurança hídrica e energética durante as secas**

A hidrelétrica de Sobradinho é um caso emblemático e vem sendo estudada pelo INPE desde 2018 sob a perspectiva do NEXUS de Água-Energia-Alimentos. O reservatório de 34 bilhões de m<sup>3</sup> está localizado próximo a Petrolina-Juazeiro, no Semiárido brasileiro, e é alimentado pela vazão do rio São Francisco. Nessa região semiárida, o déficit hídrico é estimado em 1.000 mm e os períodos de estiagem duram de 7 a 8 meses. Durante a última estiagem severa (2010-2016), o controle da água para geração de energia elétrica em Sobradinho não era mais possível. O volume de água caiu para menos de 2% da capacidade em dezembro de 2015 e novembro de 2017. Com a redução gradual das tomadas ao longo dos anos, a geração de eletricidade caiu de 5.113 GWh em 2007 para 1.162 GWh em 2017. Nesse contexto, combinar geração hidrelétrica e solar é

uma alternativa para fornecer energia elétrica e reduzir a dependência hídrica do setor energético nessa região crítica para os recursos hídricos. Em um dos estudos desenvolvidos nesse projeto do LABREN-INPE, simulamos o uso de energia solar na faixa de 50 a 1000 MW para substituir parcialmente a geração hidrelétrica e gerenciar a alocação de água entre três reservatórios de grande porte em cascata, visando reduzir a escassez de água durante uma forte seca na região semiárida do Brasil. As simulações revelaram a influência dos sistemas fotovoltaicos nos recursos hídricos e energéticos em Sobradinho e no rio São Francisco em 2009-2018.

Os resultados mostram que a energia solar fotovoltaica adicionada a uma usina hidrelétrica pode preservar a segurança hídrica e energética durante eventos de seca. No Brasil, o rio São Francisco fornece água para atividades humanas na parte semiárida da bacia, enquanto os reservatórios que o rio alimenta representam cerca de 15% da capacidade de armazenamento de água da rede elétrica nacional. Para atender a demanda de abastecimento de água e energia, a operação foi realizada independente dos aspectos ecológicos. O estudo demonstrou que um PV em grande escala poderia desempenhar um papel significativo em áreas de alta demanda de água dependentes, como a região Nordeste do Brasil durante eventos de seca severa. A segurança hídrica foi melhorada no reservatório de 34 bilhões de metros cúbicos de Sobradinho, adotando usinas fotovoltaicas flutuantes na faixa de 250 a 1.000 MW. A reserva de água atingiu 0,7-2,3 anos da demanda de água no ano mais crítico, enquanto os despachos de eletricidade aumentaram 17%-63%, em média. Além da segurança local em água e energia, a medida pode produzir melhorias colaterais em aspectos sociais, ambientais e econômicos, como qualidade da água dos rios, conservação ecológica, geração de empregos e renda e otimização da infraestrutura existente de abastecimento de água e energia. No entanto, em escala regional, como Sobradinho faz parte de um sistema de cinco usinas hidrelétricas em cascata, a produção

total de eletricidade foi reduzida em 4,4%. Essa perda de energia contrabalançava a produção de energia solar em 50% a 60%. Apesar desta perda global, foi quantificado um incremento de geração de energia nos anos críticos da estiagem prolongada, o que teria contribuído para a quota renovável da rede. De fato, cenários de PV > 500 MW superaram a hidreletricidade fornecida por Sobradinho nos meses críticos de seca. Como se espera que o potencial da complementaridade solar e hidrelétrica seja aprimorado em condições climáticas futuras, a pesquisa fornece informações aos atores responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água e energia para compreender as interligações entre os setores. Os resultados subsidiam os atores para a atuação conjunta e a proposição de políticas públicas adequadas. (Figura 16).

### **Melhorias e avanços nas ferramentas de Modelagem de Avaliação Integrada**

A equipe da componente Segurança energética da COPPE continuou a aprimorar seus Modelos de Avaliação Integrada (IAMs), para aprofundar a exploração de cenários e tecnologias. O modelo Brasil Land-Use and Energy Systems (modelo BLUES), o modelo Total Economy Assessment (modelo TEA) e o modelo Computable Framework for Energy and the Environment (modelo COFFEE) estão constantemente incorporando novos recursos para melhor representar diferentes dimensões da economia, o meio ambiente e a sociedade. Esses avanços permitem a exploração de novos cenários e suposições, abrindo a avaliação de todo um novo conjunto de caminhos possíveis para a sociedade no futuro próximo e de longo prazo (Figura 17). Novas melhorias foram feitas no link entre os modelos COPPE IAM. Os modelos TEA, COFFEE e BLUES trocam informações para produzir resultados melhores e mais consistentes em relação às trajetórias dos cenários e variáveis econômicas e tornar o processo menos manual. O processo completo inclui a definição de cenários macroeconômicos e premissas seguindo a narrativa do cenário do estudo de caso que servirá de entrada para o modelo TEA. Em seguida, os resultados do TEA são usados para alimentar o modelo COFFEE que define a condição de contorno do modelo BLUES que, em última

análise respeitará, principalmente, o cenário macroeconômico global definido.

O IAM nacional, BLUES, melhorou significativamente durante o 4º ano do projeto INCT-MC2. Muito esforço tem sido feito para melhor representar o nexo água-energia-uso da terra no modelo, bem como as sinergias e compensações das estratégias locais e globais de mitigação da poluição. Também foram alcançados avanços na representação de tecnologias setoriais específicas, como biomateriais, combustíveis para transporte marítimo e produção agrícola. A partir dessas novas características de modelagem, originaram-se novos estudos explorando formas inovadoras para que os setores contribuam com as metas climáticas do Brasil.

### **Downscaling das projeções climáticas para avaliação solar e eólica no Brasil**

Uma nova avaliação de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos energéticos foi iniciada em 2021 pelo INPE em colaboração com a Unifesp, aproveitando o recente lançamento dos conjuntos de dados CMIP6. A tarefa “Redução estatística das projeções climáticas para recursos eólicos e solares no Brasil” apoiada por bolsa Fapesp começou com a atualização de verificações de qualidade de um novo banco de dados observacional para medições eólicas e solares de diferentes redes como SONDA, dados aeroportuários (METAR), INMET e estações meteorológicas automatizadas do INPE. Esses dados ajudarão a avaliar as incertezas associadas às estimativas produzidas pelos modelos climáticos. Este banco de dados observacional está sendo mesclado a um modelo espacial fisicamente consistente para permitir comparações de grade par a par. Essa grade é obtida a partir de uma combinação de conjuntos de dados de reanálise do clima, consolidados em escalas mensais, diárias e horárias. Esta base de dados conterá a distribuição de frequência das variáveis de velocidade do vento e irradiação solar, geradas a partir de dados em resolução original (horária) em resolução espacial compatível com as saídas de modelos climáticos refinados. Todos os dados de reanálise já foram baixados e estão em processamento. As próximas etapas deste trabalho envolvem a avaliação e seleção de experimentos e modelos

CMIP6 apropriados, definição de cenários futuros e correção sistemática de erros por meio de mapeamento de quantis (Figura 18). Os resultados da avaliação de impacto são esperados para os próximos 12 meses.

### Projeções futuras de disponibilidade e variabilidade dos recursos eólicos e solares avaliadas por meio de conjuntos de dados

As energias renováveis estão no centro da atual transição energética, contribuindo para reduzir as emissões de GEE, mas podem estar expostas ao impacto das mudanças climáticas. A futura disponibilidade e variabilidade dos recursos eólicos e solares está sendo avaliada por meio dos conjuntos de dados CMIP6. Os modelos do sistema terrestre fornecem informações valiosas sobre a resposta do clima às mudanças ambientais globais, mas os resultados devem ser avaliados com cuidado devido às altas incertezas inerentes a esses modelos. Neste trabalho, um procedimento de downscaling estatístico é usado para ajustar modelos às observações e produzir projeções mais confiáveis, especialmente para eventos extremos. Uma análise de incerteza, usando modelos de grande conjunto é desenvolvida para definir intervalos de confiança e para classificar os modelos de melhor desempenho para construir um conjunto multimodelo inteligente. Para tanto, as atividades abaixo resumem as realizações do último ano do LABREN/INPE em parceria com a Universidade Federal de São Paulo:

Desenvolvimento de um algoritmo de validação para dados de radiação solar observada do INMET e da rede SONDA; Comparação de dados de reanálise (CFSR, MERRA-2 e ERA5) com dados observados para identificar os melhores conjuntos de dados para representar recursos eólicos e solares; Correção de viés de reanálises selecionadas para obter bancos de dados refinados para vento de 100m e irradiação solar; Desenvolvimento de códigos para downloads mais rápidos de conjuntos de dados CMIP6; Definição de três áreas-alvo no Brasil para subsidiar comparações entre os modelos (Semiárido, Centro e Sul do Brasil). Avaliação do desempenho dos modelos CMIP6 através da análise da correlação espacial entre as médias históricas de longo prazo dos modelos e observações para cada área-alvo.

Avaliação do desempenho da capacidade dos modelos CMIP6 em simular o ciclo sazonal, através do cálculo de médias mensais dentro de cada área-alvo.

Para uma avaliação preliminar, os resultados do modelo climático ECMWF-IFS-L - que apresentou uma das melhores correlações espaciais nas três áreas de interesse - são apresentados nos cenários SSP otimista e pessimista. Os cenários foram divididos em fatias de tempo, que compreendem os períodos 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Da mesma forma, a Figura 19 apresenta o cenário SSP585, com impactos potencialmente grandes das mudanças climáticas. Os mapas dos cenários do SSP585 mostram um aumento significativo da radiação solar global em diversas áreas do Brasil e em todos os períodos, chegando a ultrapassar 3%. Observa-se, em ambos os cenários, que o norte do Nordeste e o sul do Brasil não apresentaram altos ganhos de potencial solar.

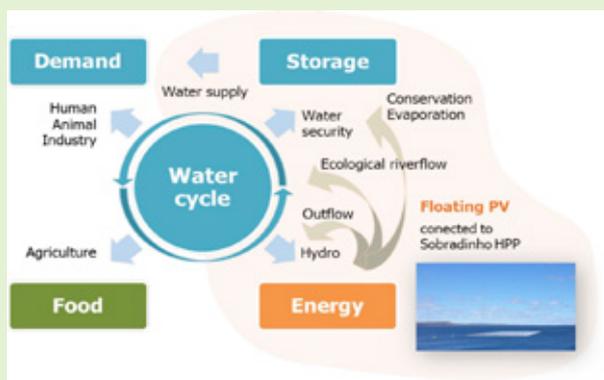


Figura 16 - Geração híbrida de energia para aumentar a segurança hídrica e energética durante a estiagem na bacia do rio S. Francisco.

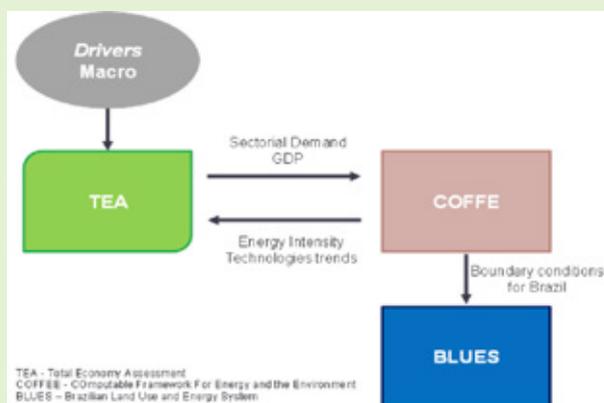
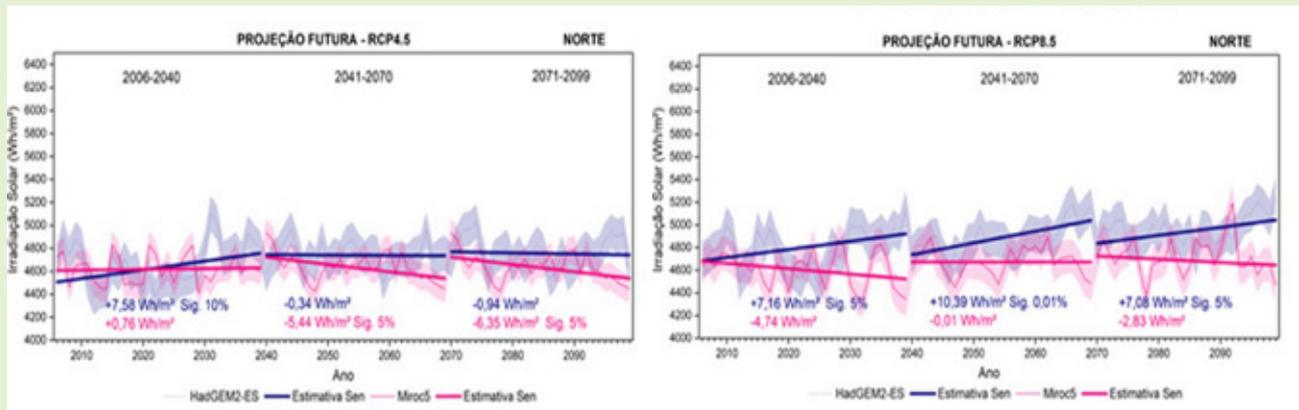
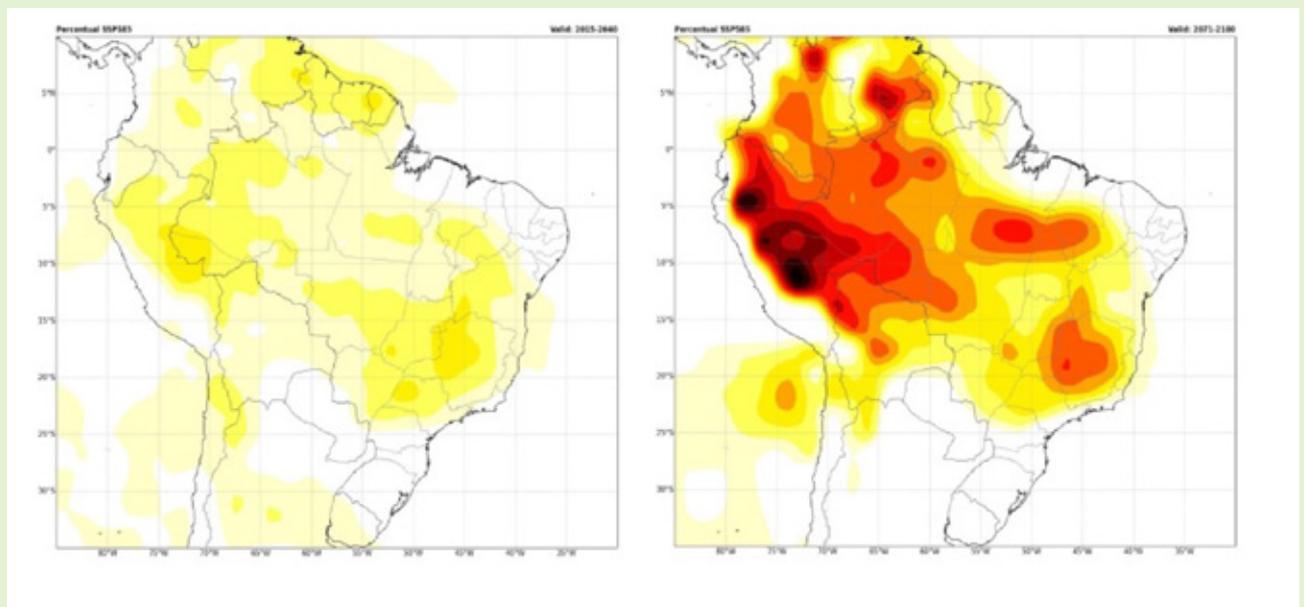


Figura 17 - Link entre diferentes modelos IAM desenvolvidos pelo componente COPPE.



**Figura 18** – Projeções futuras de irradiação solar para a região Norte do Brasil, RCP 45 (a) e RCP 8.5 (b) simuladas pelos modelos Eta-HADGEM2-ES (curva azul) e Eta-MIROC5 (curva vermelha).



**Figura 19** – Mapas de diferença de irradiação global para o cenário SSP585 em três diferentes fatias de tempo. 2015-40 (esquerda) e 2071-2100 (direita).

### PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

1. BEZERRA, PAULA ; DA SILVA, FABIO ; Cruz, Talita ; MISTRY, MALCOLM ; VASQUEZ-ARROYO, EVELINE ; Magalar, Leticia ; DE CIAN, ENRICA ; Lucena, André F.P. ; SCHAEFFER, ROBERTO . Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. ENERGY AND BUILDINGS, v. 234, p. 110696, 2020.
2. PAVANELLO, FILIPPO ; DE CIAN, ENRICA ; DAVIDE, MARINELLA ; MISTRY, MALCOLM ; Cruz, Talita ; BEZERRA, PAULA ; JAGU, DATTAKIRAN ; RENNER, SEBASTIAN ; SCHAEFFER, ROBERTO ; LUCENA, ANDRÉ F. P. . Air-conditioning and the adaptation cooling deficit in emerging economies. Nature Communications, v. 12, p. 6460, 2021.
3. YALEW, SELESHI G. ; VAN VLIET, MICHELLE T. H. ; GERNAAT, DAVID E. H. J. ; LUDWIG, FULCO ; MIARA, ARIEL ; PARK, CHAN ; Byers, Edward ; DE CIAN, ENRICA ; PIONTEK, FRANZISKA ; IYER, GOKUL ; MOURATIADOU, IOANNA ; GLYNN, JAMES ; HEJAZI, MOHAMAD ; DESSENS, OLIVIER ; ROCHEDO, PEDRO ; PIETZCKER, ROBERT ; SCHAEFFER, ROBERTO ; FUJIMORI, SHINICHIRO ; DASGUPTA, SHOURO ; MIMA, SILVANA ; DA SILVA, SILVIA R. SANTOS ; CHATURVEDI, VAIBHAV ; VAUTARD, ROBERT ; VAN VUUREN, DETLEF P. . Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. Nature Energy, v. 5, p. 1-9, 2020.
4. CAMPOS, E. F. ; PEREIRA, E. B. ; OEL, P. V. ; MARTINS, F. R. ; GONÇALVES, A. R. ; COSTA, R. S. . 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, v. 294, p. 112989, 2021.
5. DA ROCHA, VINICIUS ROGGÉRIO ; COSTA, RODRIGO SANTOS ; MARTINS, FERNANDO RAMOS ; GONÇALVES, ANDRÉ RODRIGUES ; PEREIRA, Enio Bueno . Variability index of solar resource based on data from surface and satellite. RENEWABLE ENERGY, p. 354-378, 2022.

# Desastres naturais, áreas urbanas, infraestrutura física e desenvolvimento urbano

O termo risco climático tem sido adotado na agenda climática global, e é definido como o possível impacto negativo que eventos hidroclimáticos podem causar a um bem, sociedade ou bioma. Ele não é necessariamente causado apenas pelas mudanças climáticas, mas pode estar associado a outros aspectos como urbanização, em que moradias e infraestruturas podem ser construídas sobre áreas expostas e vulneráveis às ameaças climáticas (chuvas intensas). Portanto, com extremos mais frequentes e intensos, o risco climático pode evoluir para risco de desastres, que por sua vez depende da ameaça (chuva intensa), exposição (pessoas, infraestruturas, habitações, capacidades de produção e outros ativos humanos tangíveis localizados em áreas propensas a riscos de desastres), e vulnerabilidades (condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, uma comunidade, ativos ou sistemas aos impactos das ameaças).

## **Índice de vulnerabilidade relacionado a populações em risco de deslizamentos de terra no Sistema Brasileiro de Alerta Prévio (BEWS)**

Índices de vulnerabilidade são ferramentas valiosas para apoiar a gestão de risco de desastres e são usados principalmente para reduzir perdas de vidas humanas. Apesar dos avanços relevantes no desenvolvimento de ferramentas e métricas para identificar populações vulneráveis, um desafio atual é a incorporação de informações socioeconômicas em um sistema de alerta precoce para desastres. Neste escopo, propôs-se e avaliou-se um índice de vulnerabilidade populacional para apoiar o monitoramento e a emissão de alertas precoces de risco de desastres no Brasil. Utilizando indicadores que caracterizam a exposição física e a capacidade de resposta da população, foi desenvolvido o Índice Operacional para Análise de Vulnerabilidade (InOV) para 443 municípios brasileiros. Este estudo avançou o entendimento atual sobre o tema por meio da utilização de dados em escala intraurbana,

o que permitiu uma análise relacional das áreas de risco dentro de cada município. Com base em um total de 6.227.740 de pessoas vulneráveis em áreas de risco de deslizamentos, quase 42% foram classificadas como de vulnerabilidade muito alta, 35% como alta e 23% como média vulnerabilidade. Dados sobre as vítimas e populações afetadas por deslizamentos foram usados para validar o índice. Foi verificada a correlação entre as incidências de perdas humanas nas áreas classificadas como classe de vulnerabilidade muito alta (ver detalhes em Assis Dias et al., 2020). O desenvolvimento e a validação do InOV demonstraram o potencial de incorporação de informações socioeconômicas ao contexto do Sistema Brasileiro de Alerta Precoce (BEWS) (Figura 20). Este índice pode apoiar a identificação de áreas prioritárias, fornecendo informações adicionais sobre as populações vulneráveis a serem incluídas nos alertas iniciais de risco de desastres. Ressalta-se que o InOV foi também validado para desastres ocorridos em 2022 (ver Marengo et al., 2023).

## **Perdas econômicas relacionadas a desastres ocorridos de dezembro de 2021 a abril de 2022**

Durante a última temporada de verão, entre dezembro de 2021 e abril de 2022, foram comunicadas à Defesa Civil 817 ocorrências de desastres (emergências ou estado de calamidade pública) relacionadas a eventos de precipitação intensa, em 626 municípios dos estados da Bahia (BA), Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG) e Rio de Janeiro (RJ). A distribuição espacial desses municípios é apresentada na Figura 20. De acordo com o Relatório de Danos do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres, S2iD, os desastres analisados resultaram em perdas totais de R\$12.832.571.014,77. Três municípios do estado de Minas Gerais foram responsáveis por 68% dessas perdas (Bom Despacho, 32%; Monte Azul, 25,3%; e Itabirito, 11,1%). Duas cidades do estado do Rio de Janeiro foram responsáveis por 68% das mortes registradas (Petrópolis, 61% e Angra dos Reis, 7%). Três municípios foram responsáveis por mais de

50% das lesões (Petrópolis, RJ, 35%; Itabirito, MG, 10%; e Itabuna, BA, 7%). Embora o estado do Espírito Santo não tenha apresentado impactos significativos em relação aos demais estados, observou-se que 30% dos municípios do ES relataram ocorrências de Tempestade Convectiva Local, entre os quais o município de Bom Jesus do Norte se destaca entre os 20 primeiros por frequência de ocorrências, com quatro ocorrências registradas, e Muniz Freire também com três. Este último município também se destaca por ter um número significativo de pessoas afetadas (1.560) em relação à sua densidade populacional (27,15 hab/km<sup>2</sup>). É interessante observar que Itapetinga e Bom Jesus do Norte, com alto IDH, não registraram afetados e não estão no Top 20 no contexto das demais variáveis analisadas. Três municípios mineiros foram responsáveis por 68% dessas perdas (Bom Despacho, 32%; Monte Azul, 25,3%; e Itabirito, 11,1%). Duas cidades do estado do Rio de Janeiro foram responsáveis por 68% das mortes registradas (Petrópolis, 61%, Angra dos Reis, 7%). Três municípios foram responsáveis por mais de 50% das lesões (Petrópolis, RJ, 35%; Itabirito, MG, 10%; e Itabuna, BA, 7%). (Figura 21).

### **Eventos compostos de seca e calor extremo**

No contexto da intensificação dos impactos da seca devido ao calor extremo, também foram avaliadas a ocorrência de eventos compostos de seca-calor na América do Sul Central (ver detalhes em Marengo et al., 2021). Para esta análise composta, os dados diários de temperatura máxima e precipitação do Climate Prediction Center (CPC) da NOAA foram usados para estimar a onda de calor (Warm Spell Duration Index - WSDI) e o SPI (Índice de Precipitação Padronizada). Eventos compostos de seca e calor foram identificados em setembro-novembro de 2020 na América do Sul Central, principalmente no Pantanal. Nessas regiões, o SPI mostra condições excepcionais de seca em áreas onde o WSDI atingiu o percentil 95 ou 99 por uma janela de 7 dias ou mais. Para setembro-outubro de 2020, a Figura 21 mostra regiões onde o WSDI e as condições para seca excepcional SPI  $3 < -2,0$ . A área afetada pelo composto seca-calor foi identificada no centro-oeste do Brasil, norte e leste da Bolívia, norte da Argentina e Paraguai, que cobrem o Pantanal. Este evento composto foi associado a riscos específicos, como alto risco de incêndio (Figura 22).

### **Avaliação dos impactos socioeconômicos da seca no Semiárido, 2002 a 2020.**

Nesta etapa do projeto, os dados de desastres relacionados à seca relativos aos municípios localizados nos estados do Ceará e Pernambuco, de 2002 a 2020, organizados e usados para avaliar os impactos socioeconômicos das secas. Historicamente, a região Nordeste é marcada por secas que podem ser entendidas como um extremo climático causado pelo déficit de precipitação, que resulta em baixa disponibilidade hídrica para diversas atividades humanas. Os efeitos da seca aumentam durante um longo período e continuam por vários anos após o término do evento. Portanto, a seca pode causar sérios impactos nos setores agrícola, ambiental, social e de saúde. Vários métodos e indicadores foram desenvolvidos para identificar eventos de seca. Entre os indicadores, o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) é um dos mais comumente usados para monitoramento de secas (Figura 23). No presente estudo (em andamento) pretende-se avaliar qualitativa e quantitativamente eventos de seca no estado do Ceará, identificando início e fim, duração, intensidade e severidade, bem como investigar dados socioambientais para encontrar padrões de impactos associados. Para a análise das secas, serão utilizados dados de precipitação, vazão e nível de armazenamento nos reservatórios. Visando investigar a correlação dos impactos associados, serão analisados dados sobre doenças de veiculação hídrica, saneamento, agricultura e turismo conforme ilustrado na Figura 24. Entre os resultados esperados estão a identificação de eventos de seca e a associação de possíveis impactos no saneamento, sociais e de saúde. Os resultados serão divulgados em eventos técnico-científicos.

### **Secas hidrológicas recentes no Brasil e seus impactos na geração de energia hidrelétrica**

O Brasil sofreu as piores secas registradas na história na última década, o que resultou em graves impactos socioeconômicos e ambientais. O país é fortemente dependente de recursos hídricos, com 77,7% da água consumida pela agricultura (irrigação e pecuária), 9,7% pela indústria e 11,4% no abastecimento humano. As usinas hidrelétricas geram aproximadamente 64% de toda a eletricidade consumida. Neste escopo, padrões de secas

hidrológicas que afetam bacias prioritárias para geração hidrelétrica, distribuídas em todas as regiões do país, foram investigados. Em geral, a análise de frequência por décadas mostrou que a última década (2010-2021) registrou a maior recorrência de secas severas (valores dos índices  $\leq -1,3$ ) desde 1981 (Figura 24) em diferentes escalas de tempo (12, 24, 36, e 48 meses). Particularmente na última década (2010-2021), as secas também ocorreram concomitantemente em várias regiões do país, com impactos perceptíveis em diversos setores socioeconômicos, que ainda hoje são vivenciados. Na maioria das bacias, o teste de tendência Mann-Kendall mostrou uma tendência de queda nas séries temporais SPI (Índice estandardizado de precipitação), SPEI (Índice estandardizado de evapotranspiração) e SSFI (Índice estandardizado de vazão natural de rios) de 1981 a 2021, indicando um aumento na frequência de eventos de seca. Essa situação evidencia que as bacias podem ser consideradas com situações críticas quanto à disponibilidade hídrica e, portanto, a necessidade urgente de estabelecer um plano de preparação para mitigar os efeitos da seca nessas regiões. Os resultados sugerem também que as secas são mais intensas e frequentes devido ao efeito composto de diminuição da precipitação e aumento da temperatura, provavelmente associada ao cenário de aquecimento global. De acordo com o IPCC, a diminuição da precipitação e o aumento da temperatura da superfície resultam em aumento da evapotranspiração e diminuição da umidade do solo, levando a processos de retroalimentação negativa que exacerbam os eventos de seca. Embora o Brasil tenha aumentado sua capacidade hidrelétrica após a crise energética de 2001, de 75.570 MW em janeiro de 2006 para 108.739 MW em novembro de 2021, os intensos e severos eventos de seca na última década impactaram substancialmente a geração hidrelétrica em todas as regiões brasileiras, exceto para a região Norte (Cuartas et al., 2022).

### **Análise de eventos extremos, projeções futuras sob mudanças climáticas e consequências para áreas urbanas**

A projeção gerada por um modelo climático é a principal entrada para modelos hidrológicos na avaliação de risco de mudança climática. No entanto, alguns aspectos da precipitação (por exemplo, frequência, sazonalidade e extremos) geralmente não são bem representados por modelos climáticos,

especialmente em escala regional e nos trópicos. É importante avaliar os aspectos marginais, temporais e espaciais da precipitação geradas pelo CMIP5 e CMIP6 para serem usados como entrada para estudos de redução de escala e avaliações de risco. Isso é feito para o sul do Brasil, uma das áreas de estudo do projeto. Esta região está na transição entre climas tropicais e subtropicais com diversos mecanismos de geração de chuvas e topografia complexa. Comparamos a média do conjunto de modelos múltiplos (MME) e um conjunto restrito (CE) de CMIP5 e CMIP6 contra uma grade de dados de precipitação de alta resolução. O conjunto restrito é obtido usando uma abordagem de ponderação que minimiza a diferença entre as funções de distribuição cumulativas simuladas e observadas. Encontramos que o CMIP6 supera o CMIP5 para a maioria das métricas, especialmente na simulação do ciclo sazonal e na distribuição espacial da precipitação. A precipitação simulada é mais sazonal e mais espacialmente dependente do que as observações, com um viés seco caracterizado por menores quantidades de precipitação e maiores dias secos consecutivos. Nossa análise sugere que os modelos não são capazes de reproduzir a transição entre climas tropicais e subtropicais nesta região, bem como a passagem de sistemas frontais. Nossas recomendações são de que estudos futuros usando CMIP6 devem se concentrar nesses mecanismos regionais de variabilidade da precipitação. No entanto, uma análise mais aprofundada dos resultados do CMIP6 mostra que o bloqueio atmosférico se intensificará no sudeste da América do Sul, levando a secas mais frequentes, intensas e prolongadas, ondas de calor terrestres e marinhas nesta região.

Outro aspecto importante é identificar a co-ocorrência de inundações e umidade do solo. Uma coincidência no tempo das cheias e dos seus causadores pode ser usada como um proxy para a causalidade da geração das cheias. A relação entre a sazonalidade das cheias, a precipitação anual máxima e os dados anuais máximos de umidade do solo de 886 bacias no Brasil para 1980-2015 podem auxiliar nos controles do processo de geração de enchentes. As inundações tendem a ocorrer na mesma época do ano que os picos de umidade do solo e ficam 3 semanas atrás dos picos de chuva (Figura 25). Na Amazônia, centro e norte do Brasil, o tempo de inundação está mais correlacionado com o tempo de picos de umidade do solo do que

com a chuva, que é interpretada como resultado de altas capacidades de armazenamento de água no subsolo. No sul e sudeste do Brasil, por outro lado, o tempo de inundação está altamente correlacionado com a umidade do solo e a precipitação, devido à baixa capacidade de armazenamento de água no subsolo. Essas descobertas podem apoiar a previsão de enchentes e estudos de impactos climáticos. Finalmente, muitas das informações climáticas, como os resultados do CMIP5 e CMIP6, são apresentadas de uma forma que não pode ser usada pelas partes interessadas e pelos usuários finais. Existe uma lacuna amplamente aceita entre a produção e o uso de informações climáticas. Também é amplamente aceito que pelo menos parte da razão para esta situação reside no desafio de fazer a ponte entre o que pode ser caracterizado como abordagens “de cima para baixo” para informações climáticas em escala global e contextos de decisão locais, que necessariamente adotem uma perspectiva “de baixo para cima”, na qual a mudança climática é apenas um fator entre muitos a serem considerados. Depois de refletir sobre como a informação climática para adaptação pode estar mais amplamente disponível, foi definido um conjunto de recomendações. Uma delas é a necessidade de lidar com a complexidade das situações locais, que podem ser abordadas expressando o conhecimento do clima de forma condicional. A segunda é a importância da simplicidade ao lidar com incertezas profundas, que podem ser abordadas por meio do uso de histórias climáticas físicas usando redes bayesianas. Uma terceira é a necessidade de capacitar as comunidades locais para entender sua própria situação, que pode ser abordada pelo desenvolvimento de “tecnologias intermediárias” que constroem confiança e transparência.

### **SisVUclima**

No âmbito desta pesquisa está sendo desenvolvido o SisCuClimaCidade para a cidade de Blumenau. Esta tecnologia adapta para a cidade o princípio do SisVuClima ([sisvuclima.mma.gov.br/sobre](http://sisvuclima.mma.gov.br/sobre)). Esta tecnologia elabora um sistema de indicadores, em escala intramunicipal, para avaliar a vulnerabilidade da cidade de Blumenau ao risco de desastres associados a precipitação. Esta iniciativa conta com o apoio da Secretaria de Desastres Naturais da cidade de Blumenau e tem como objetivo elaborar um sistema de indicadores, em escala municipal, capaz

de gerar os índices e construir de maneira automática, mapas temáticos utilizando a base cartográfica da cidade, que possibilitem a identificação dos setores que necessitem de prioridades na elaboração, implementação e acompanhamento de ações de políticas públicas voltadas para a adaptação da cidade à mudança do clima e seu desenvolvimento. A apresentação do sistema para a cidade será realizada em março 2023.

### **Inundações, enxurradas e deslizamentos de terra na cidade de Recife, nordeste do Brasil, após fortes chuvas de 25 a 28 de maio de 2022: causas, impactos e preparação para desastres**

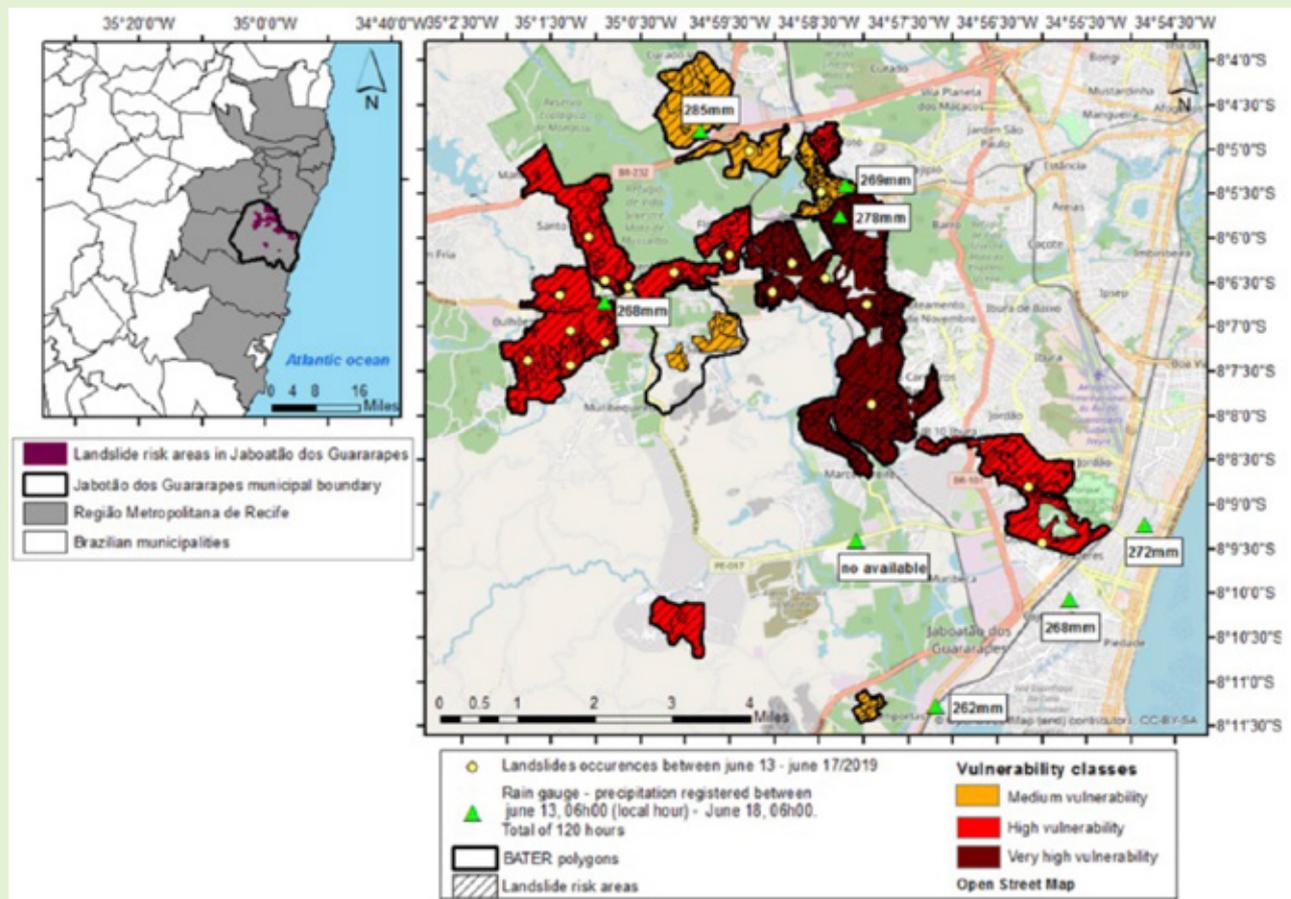
Do final de maio ao início de junho de 2022, 130 pessoas morreram em decorrência de deslizamentos de terra catastróficos e inundações repentinas desencadeadas por chuvas excepcionalmente fortes nos estados de Pernambuco, Alagoas e Paraíba, ao longo da costa do nordeste do Brasil. A precipitação total na cidade do Recife entre os dias 25 e 30 de maio foi de 551 mm, 140 mm acima da média do mês de maio. A chuva foi mais intensa nos dias 25 e 28 de maio, com 100–200 mm e 151–250 mm, respectivamente. Isso coincidiu com distúrbios de ondas de leste. O dia 28 de maio foi o que mais choveu, devido a uma frente fria intensa. Neste período, 14 municípios da região metropolitana do Recife declararam estado de emergência. De acordo com a Defesa Civil de Pernambuco, a chuva impactou 130 mil pessoas no local. A maior parte da forte precipitação caiu sobre áreas com vulnerabilidade geológica média a muito alta a deslizamentos de terra e eventos hidrológicos extremos. A perda de vidas e impactos econômicos substanciais em Recife, causados pelas fortes chuvas de maio de 2022 e pelos desastres induzidos por ela mostram que esta cidade, como muitas outras ao redor do mundo, tem capacidade limitada para lidar com os extremos climáticos.

Entre a última semana de maio e o início de junho de 2022, deslizamentos de terra e inundações repentinas provocadas por chuvas intensas afetaram Recife e os estados vizinhos de Alagoas e Paraíba, todos localizados ao longo da costa do nordeste do Brasil. A Figura 25 mostra chuvas intensas durante o mês de maio, e com maior intensidade nos dias 23 e 28 de maio, sobre os estados de Alagoas, Paraíba

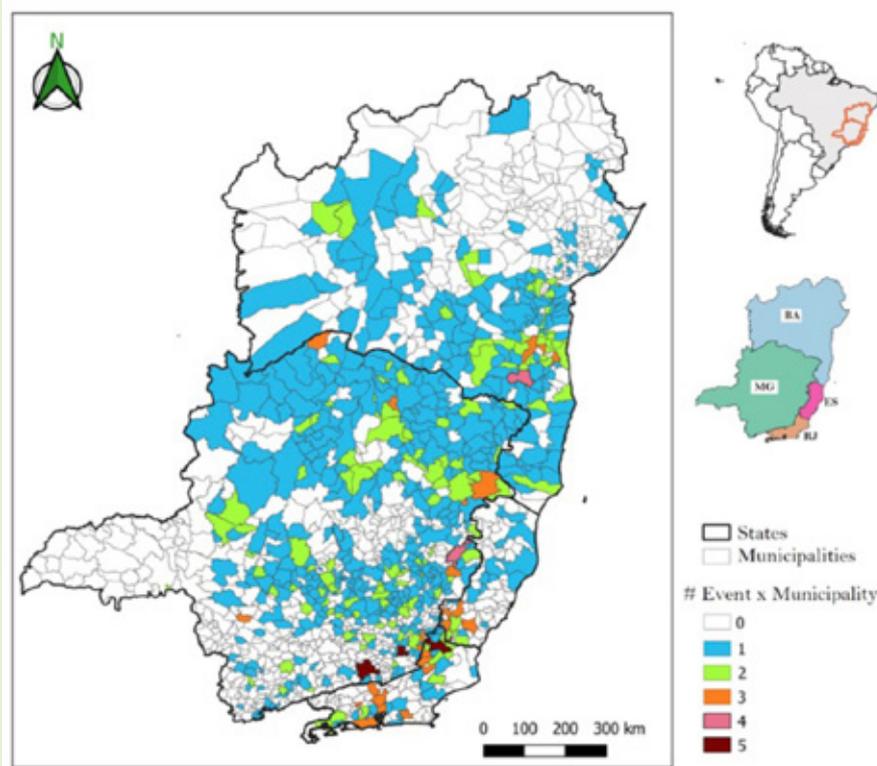
e Pernambuco. Segundo o INMET, maio de 2022 foi o mês mais chuvoso desde o início dos registros, em 1961, com 714 mm (climatologia de 287,7 mm) em João Pessoa, capital do estado da Paraíba. O recorde anterior era de maio de 1964, com 701,6 mm. Em Recife, choveu 783,6 mm em maio de 2022, e em Maceió, 579 mm (climatologia de 276,3 mm). Durante os episódios de Distúrbios de Ondas de Leste EWD, em 25 de maio, chuvas ficaram cerca de 180 mm acima do normal em Alagoas e Pernambuco. Em 28 de maio a precipitação foi de 120 mm acima do normal em Pernambuco e Paraíba (Figura 26). Os mapas da Figura 26 mostram a precipitação acumulada nos dias 25 e 28 de maio para a Região Metropolitana de Recife (MRR). Os círculos vermelhos mostram as áreas com vulnerabilidade

geológica média a muito alta a deslizamentos de terra e extremos de eventos hidrológicos. Grandes quantidades de chuva caíram em áreas com alto risco geológico: 100–200 mm em 25 de maio e 151–250 mm em 28 de maio (Figura 27).

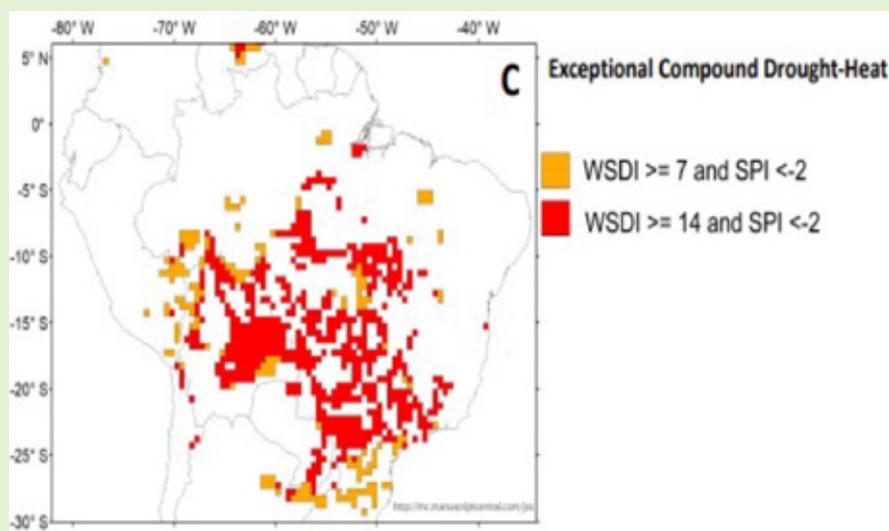
A urbanização aumentou o adensamento populacional ocupando morros e encostas da cidade, contribuindo para o problema. Para reduzir o impacto de tais desastres, os moradores devem estar cientes dos riscos de eventos relacionados ao clima e eles devem ser estimulados a atender aos alertas de desastres naturais emitidos por instituições estaduais e federais. O monitoramento eficiente do risco também é necessário. A gestão de riscos só será viável quando todos participarem, o que requer educação e mudança cultural.



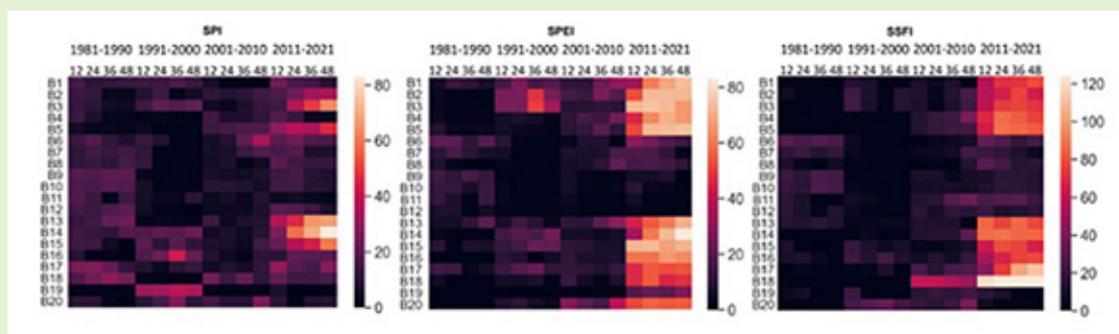
**Figura 20** – Distribuição espacial das classes de vulnerabilidade, ocorrências de deslizamentos e precipitação registradas nos pluviômetros no município de Jabotão dos Guararapes, PE, entre os dias 13 e 18 de junho de 2019.



**Figura 21** – Estados e seus municípios com ocorrências de desastres relacionados à Tempestade Convectiva Local causada por fortes chuvas e vendavais entre dezembro de 2021 e abril de 2022.



**Figura 22** – Mapa espacial mostrando o evento excepcional dos eventos compostos seca-calor de setembro a novembro de 2020. (Evento excepcional: WSDI > 7 dias e SPI < -2). Fonte: Marengo et al., 2021.



**Figura 23** – Frequência das secas severas (valores de índices  $\leq -1.3$ ) por décadas nas bacias estudadas.

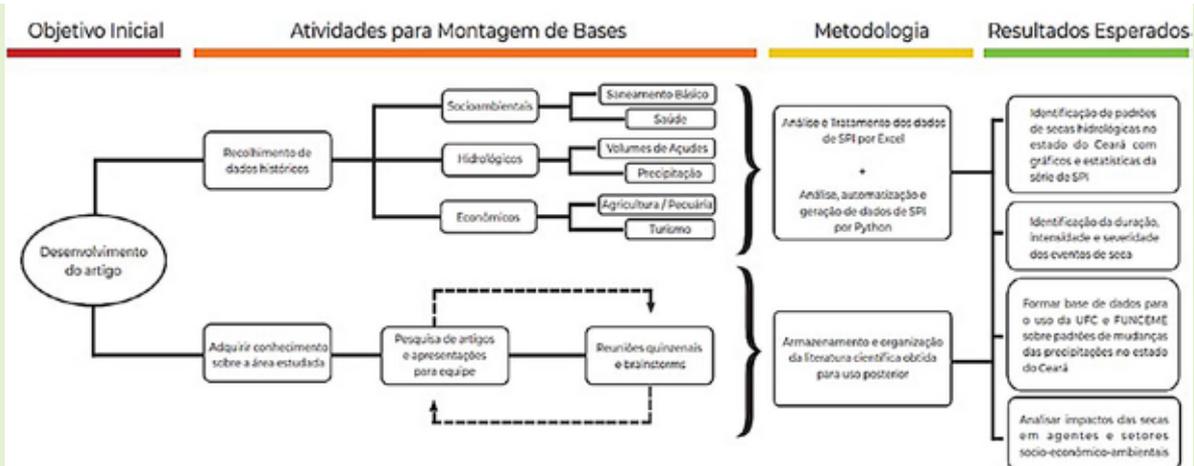


Figura 24 – Fluxograma das etapas a serem realizadas neste estudo, bem como os resultados esperados.

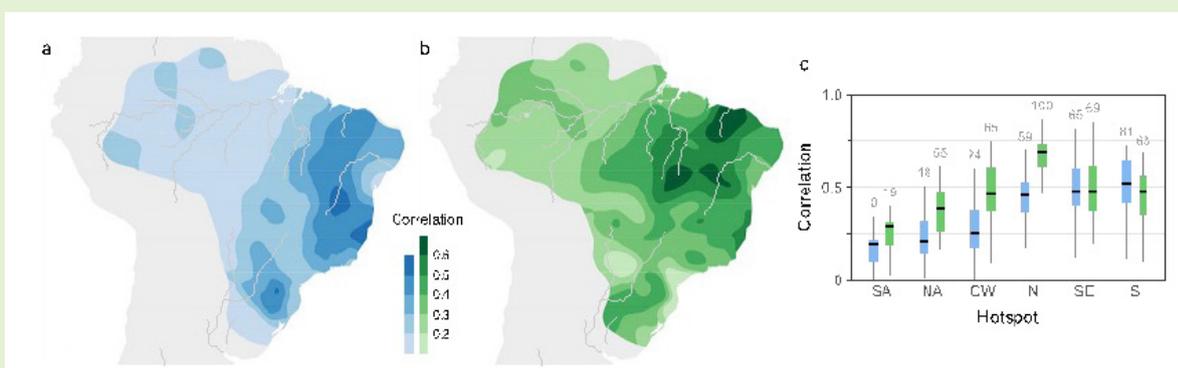


Figura 25 – Correlação circular entre a variabilidade interanual do tempo de (a) cheias e precipitação máxima anual, (b) cheias e umidade máxima anual do solo. Ambos (a) e (b) são obtidos com interpolação usando krigagem de bloco. (c) Variabilidade espacial das correlações com precipitação máxima (caixas azuis) e umidade máxima do solo (caixas verdes) sobre cada hotspot. Os números acima dos boxplots indicam a porcentagem de bacias com correlações significativas ( $\alpha = 0,05$ ). Os hotspots são: Sul da Amazônia (SA,  $n = 11$ ), Norte da Amazônia (NA,  $n = 11$ ), Centro-Oeste (CW,  $n = 34$ ), Norte (N,  $n = 22$ ), Sudeste (SE,  $n = 65$ ) e Sul (S,  $n = 37$ ). Extraído de Chagas et al. (2022).

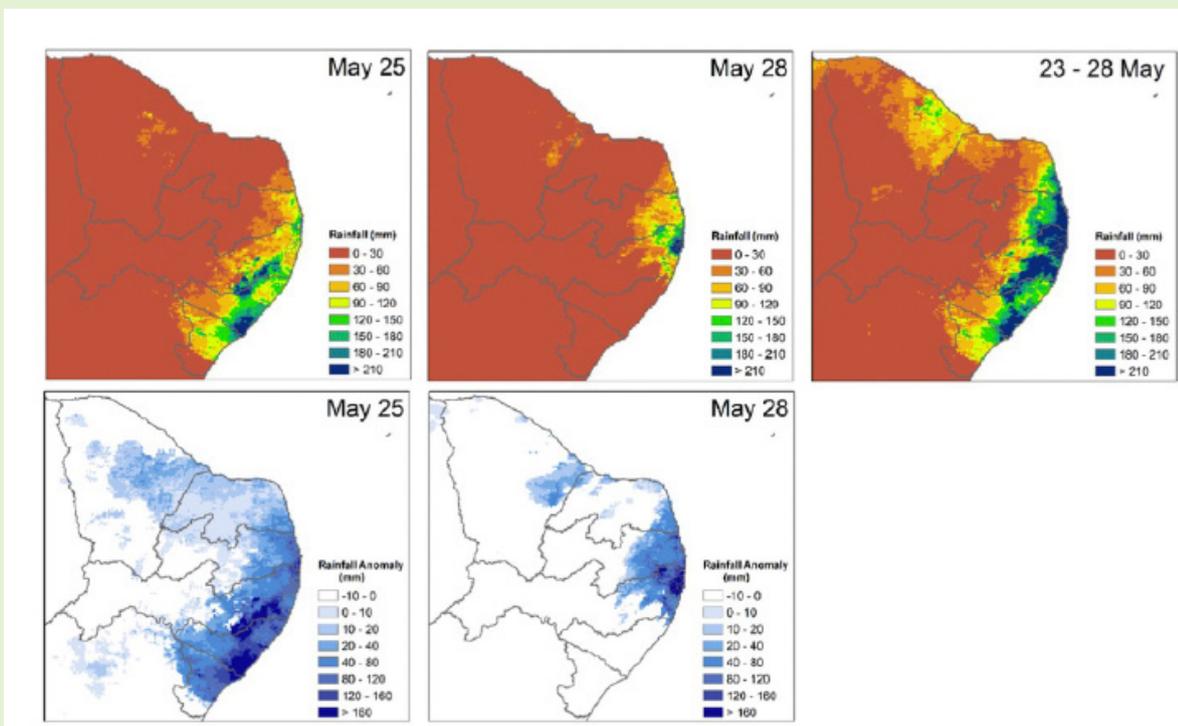
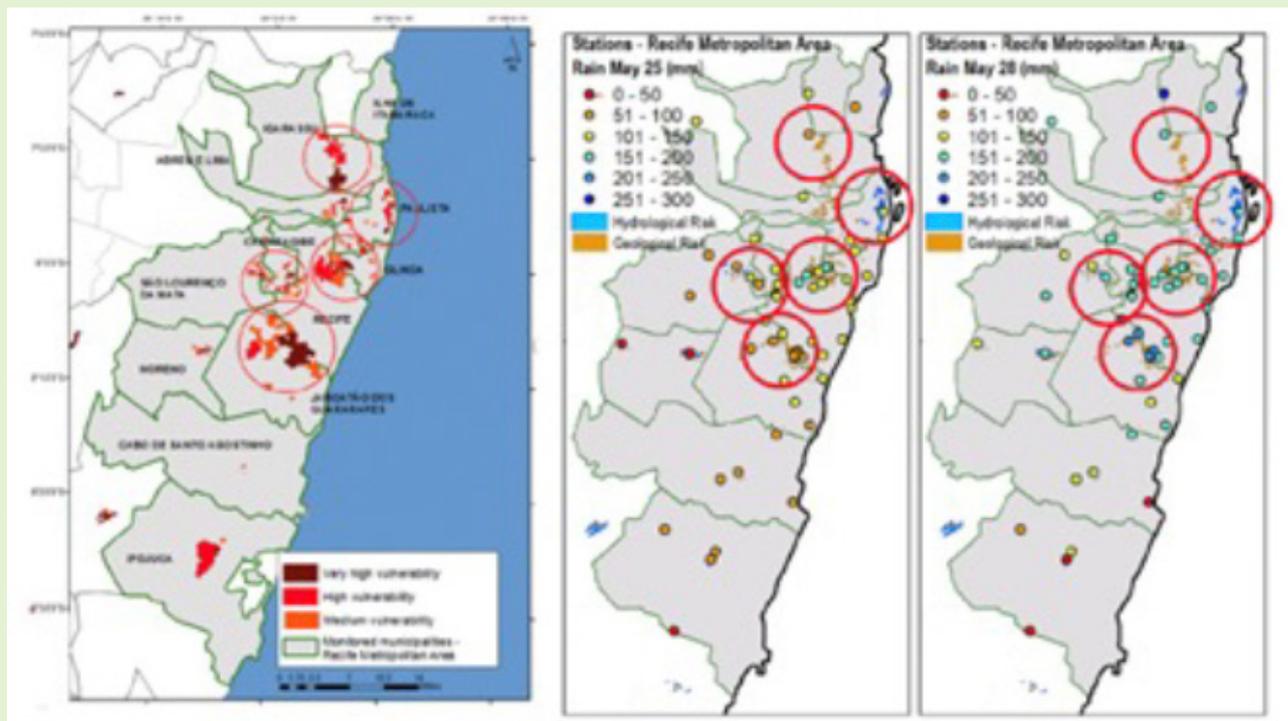


Figura 26 – Precipitação observada em 25 e 28 de maio e precipitação acumulada de 23 a 28 de maio (linha superior) e anomalias de precipitação para 25 e 28 de maio (linha inferior), em mm, para região leste do Nordeste. Fonte dos dados: CHIRPS. (Marengo et al 2023)



**Figura 27** – Áreas da região metropolitana do Recife mostrando as monitoradas pelo Cemaden (cor cinza) e níveis de vulnerabilidade a deslizamentos e eventos hidrológicos resumido por círculos vermelhos (esquerda). Precipitação acumulada (em mm) para os Distúrbios do Leste EDW de 25 e 28 de maio de 2022 nesta área (centro e direita). Para a chuva a escala de cores é mostrada no canto superior esquerdo dos dois últimos mapas. (Marengo et al. 2023)

## PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

1. Assis Dias, M. C.; 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.
2. Cuartas, L. A.; Cunha, A. P. M. d. A.; Alves, J. A.; Parra, L. M. P.; Deusdará-Leal, K.; Costa, L. C. O.; Molina, R. D.; Amore, D.; Broedel, E.; Seluchi, M. E.; Cunningham, C.; Alvalá, R. C. S.; Marengo, J. A. Recent hydrological droughts in Brazil and their impacts on hydropower generation. *Water* 2022, 14 (4), 601; <https://doi.org/10.3390/w14040601>
3. Marengo, J. A.; Alcantara, E.; Cunha, A. P.; Seluchi, M.; Nobre, C. A.; Dolif Neto, G.; Gonçalves, D.; Assis Dias, M.; Cuartas, L. A.; Bender, F.; Ramos, A.; Mantovani, J.; Alvalá, R. C.; Moraes, O. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25 – 28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather and Climate Extremes*, 39, 2023. Manuscript Number: WACE-D-22-00248R1. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>
4. Rodrigues, R.R. and Shepherd, T.G. (2022). Small is beautiful: climate-change science as if people mattered. *PNAS Nexus*, 1(1), pgac009
5. Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Blöschl, G. (2022). Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, v. 13, p. 1-10.
6. Costa, N.V. and Rodrigues, R.R. (2021). Future summer marine heatwaves in the western South Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094509.
7. Pereira, M.F.R., Chaffe, P.L., de Amorim, P.B., Rodrigues, R.R. (2021). A systematic analysis of climate model precipitation in southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 1-18
8. Cai, W., M. McPhaden, A. Grimm, R.R. Rodrigues, A. Taschetto, R. Garreaud, B. Dewitte, G. Poveda, Y.-G. Ham, A. Santoso, B. Ng, W. Anderson, G. Wang, T. Geng, H.-S. Jo, J. Marengo, L. Alves, M. Osman, S. Li, L. Wu, C. Karamperidou, K. Takahashi, C. Vera (2020). Impact of El Niño–Southern Oscillation on South America in a changing climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (4), 215-231.
9. Vommaro F, Menezes JA, Barata MM de L. Contributions of municipal vulnerability map of the population of the state of Maranhão (Brazil) to the sustainable development goals. *Sci Total Environ*. 2020;706:134629.

# Economia e impactos em setores-chave

As atividades do Pacote de Modelagem Integrada têm se concentrado no desenvolvimento de abordagens de modelagem integrada para gerar resultados quantitativos associados aos impactos das mudanças climáticas. Duas áreas receberam mais atenção nos anos 1-4: lidar com a incerteza nos modelos de produtividade agrícola e as implicações para os impactos em toda a economia; e explorar os efeitos do clima nas variáveis demográficas, principalmente nas taxas de fertilidade e, mais recentemente, na saúde.

Também adicionamos duas outras áreas-chave, desde os anos 3-4, que incluem: a integração de modelagem econômica e hídrica e modelagem de incerteza e avaliação de risco no contexto de eventos inesperados. Neste último caso, criamos uma cooperação com colegas do Departamento de Engenharia Civil da UNAM (México), liderados pelo Prof. Mario Ordaz, para desenvolver abordagens metodológicas alternativas para integrar modelos de avaliação de risco e modelos CGE (Computable General Equilibrium). Usando a modelagem de terremotos no Chile, esta parceria avançou ao trazer percepções adicionais e compreensão das consequências econômicas de eventos não programados. Esperamos aprender com essa experiência de modelagem para informar melhor os grupos do INCT-MC2 e de outros lugares que lidam com os impactos econômicos da elevação do nível do mar. Um primeiro documento conjunto intitulado “Risco causado pela propagação de perdas por terremotos na economia” foi publicado na Nature Communications (<https://www.nature.com/articles/s41467-022-30504-3>).

As perdas econômicas de produção causadas por desastres, também chamadas de perdas indiretas, às vezes podem ser muito mais significativas do que aquelas produzidas por danos físicos. Nosso trabalho apresenta uma alternativa para modelar perdas indiretas com base em uma abordagem probabilística sistemática, calculando pela primeira vez um conjunto de indicadores probabilísticos de risco devido a terremotos. A abordagem combina dois campos de conhecimento, engenharia sísmica

e economia, usando técnicas convencionais de risco sísmico juntamente com a estrutura de modelagem Computable General Equilibrium (CGE) (Figura 28).

Examinamos os impactos econômicos da mudança na disponibilidade hídrica causada pelas mudanças climáticas, com foco nas regiões hidrográficas brasileiras. Dada a complexidade do problema, construímos um modelo para toda a economia integrado à modelagem hidroclimática. As perdas econômicas equivalem a uma redução do PIB brasileiro (ano de referência 2015) de US\$ 5,2 bilhões [US\$ 3,2 B para US\$ 7,7 B] e US\$ 12,5 bilhões [US\$ 7,8 B para US\$ 18,6 B] segundo o RCP 4.5 e RCP 8.5 (até 2070-2099). As simulações mostram que setores intensivos em água, como serviços de água e esgoto, agricultura, pecuária e extrativismo florestal são os principais afetados (Figura 29).

Outras atividades relacionadas a esta componente foram focadas em dois temas principais: desenvolvimento de modelos de uso da terra para avaliar o potencial de intensificação da pecuária no Brasil; e desenvolvimento de modelos econométricos para avaliar a adaptação aos choques climáticos por meio de realocações no mercado de trabalho rural.

## **Quais os impactos gerais na economia associados à intensificação da pecuária?**

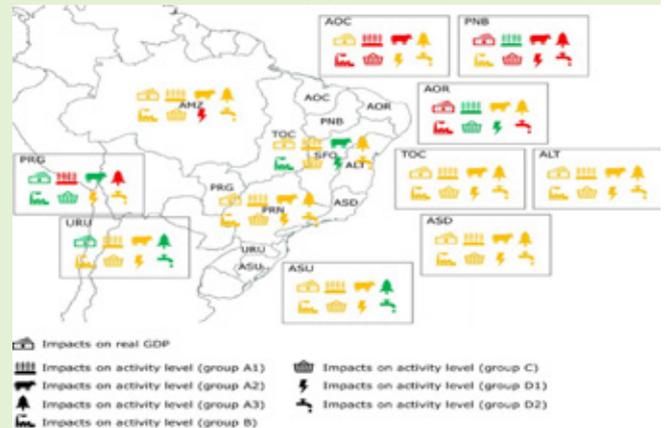
José Féres e Rafael Feltran-Barbieri (IPEA) mostraram os potenciais ganhos econômicos e ambientais associados à pecuária. A pesquisa será ampliada incorporando os principais resultados ao modelo CGE desenvolvido pela FEA-USP. Esperamos avaliar o impacto de melhorias nas taxas de estoque de gado em agregados macroeconômicos (PIB setorial e geral, emprego agrícola etc.). Além disso, também esperamos realizar uma análise de custo-benefício associada ao redirecionamento dos recursos do crédito rural para a recuperação de pastagens. Um aluno de mestrado está trabalhando em uma proposta para desenvolver este tópico. Também continuamos desenvolvendo projetos específicos

dentro do Projeto INCT-MC2, complementando os recursos recebidos. Nesse contexto, destacam-se os seguintes projetos financiados pela Fapesp: (i) “Urbanização e Mudanças Climáticas: Análises de Impacto na Região Metropolitana de São Paulo” (Doutorado, 2018/08833-5, concedido); (ii) “Sustentabilidade Agrícola e Agroindustrial no Chile: Modelando os Impactos da Mudança Climática e Desastres Naturais em um Marco Integrado” (CONICYT - Projeto Regular de Pesquisa, 2018/08337-8, concedido); (iii) “Fertilidade e Desigualdade: Evidências do Brasil” (Bolsa no Exterior, 2018/06782-4, concedida); (iv) “Uma Análise Espacial de Impacto da Acessibilidade à Água na Produção Agropecuária do Semiárido Brasileiro” (Iniciação Científica, 2018/11799-3, concedido); (v) “The Economics of Low Carbon Markets – 2018” (Scientific Event Organization, 2018/17781-9, concedido); (vi) “Avaliando os Efeitos do Clima e do Tempo no Brasil usando Panel Data” (Bolsa no Exterior, 2018/02081-1, concedida); (vii) “The Economics of Low Carbon Markets” – 2019 (Scientific Event Organization, 2019/13756-2, concedido).

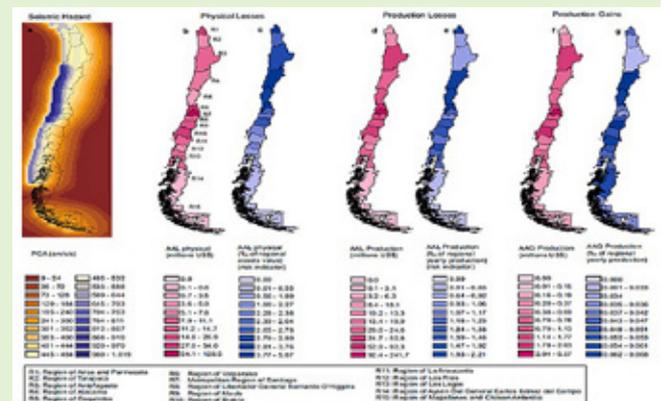
### Adaptação às mudanças climáticas por meio de ajustes no mercado de trabalho rural

Um artigo sobre as respostas da oferta de trabalho a choques climáticos, publicado durante o quarto ano do projeto, motivou um webinar interno para promover canais de integração entre os dois pacotes de trabalho do componente. O webinar/encontro interno aconteceu no dia 21 de agosto de 2021, sediado pelo NEREUS, na USP, com a discussão conduzida por José Féres. O quinto ano do projeto de pesquisa também foi dedicado a encontrar maneiras de integrar as descobertas

do uso da terra com o modelo de equilíbrio geral computável. Em particular, os resultados dos artigos publicados na Política de Uso da Terra e na Royal Society Open Science servem como insumos para o modelo CGE.



**Figura 28** – Impactos econômicos da mudança na disponibilidade hídrica causada pelas mudanças climáticas, com foco nas regiões hidrográficas brasileiras. Dada a complexidade do problema, construímos um modelo para toda a economia integrado à modelagem hidroclimática. As perdas econômicas equivalem a uma redução do PIB brasileiro (ano de referência 2015) de US\$ 5,2 bilhões [US\$ 3,2 B para US\$ 7,7 B] e US\$ 12,5 bilhões [US\$ 7,8 B para US\$ 18,6 B] segundo o RCP 4.5 e RCP 8.5 (até 2070-2099).



**Figura 29** – Perdas econômicas de produção causadas por desastres, às vezes chamadas de perdas indiretas, podendo ser muito mais significativas do que aquelas produzidas por danos físicos, calculando pela primeira vez um conjunto de indicadores probabilísticos de risco devido a terremotos.

### PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

- BRANCO, D.; FERES, J. . Weather Shocks and Labor Allocation: Evidence from Rural Brazil. *American Journal of Agricultural Economics* (Online), v. n/a, p. n/a, 2020.
- Haddad, Eduardo; AROCA, PATRÍCIO ; JANO, P. ; ROCHA, A. A. M. ; PIMENTA, B. . A Bad Year? Climate Variability and the Wine Industry in Chile. *Wine Economics and Policy*, v. 9, p. 23-35, 2020.
- LEÓN, J. A. ; ORDAZ, M. ; Haddad, E. ; ARAÚJO, I. F. . Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy. *Nature Communications*, v. 13, p. 2908, 2022.
- RUGGIERO, P.G.C. ; PFAFF, A. ; PEREDA, P. ; NICHOLS, E. ; METZGER, J.P. . The Brazilian intergovernmental fiscal transfer for conservation: A successful but self-limiting incentive program. *ECOLOGICAL ECONOMICS*, v. 191, p. 107219–, 2022.
- SOUZA, B.; HADDAD, E. A. . Climate change in Brazil: dealing with uncertainty in agricultural productivity models and the implications for economy-wide impacts. *Spatial Economic Analysis*, v. online, p. 1-18, 2021.

# Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários climáticos futuros para estudos de Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação

## Desenvolvimento do Modelo do Sistema Terrestre Brasileiro – BESM

O modelo BESM é resultado de anos de desenvolvimento de modelos globais no INPE/CPTEC. A versão BESM 3.0 representa a versão mais atualizada do modelo, pronto para pesquisa de cenários de mudanças climáticas e previsão climática sazonal, sendo o resultado do GCM atmosférico global totalmente acoplado desenvolvido pelo CPTEC - BAM1 ao modelo oceânico global MOM6 da GFDL com modelo de gelo oceânico ICI2 e modelo biogeoquímico marinho COBALT. A fim de aumentar a capacidade da pesquisa climática abrangendo fenômenos subgrade em relação às grades tradicionais de modelagem climática global (ou seja, 200 km de espaço de grade horizontal), o BESM 3.0 foi configurado para funcionar com uma malha global de aproximadamente 20 km, tanto no oceano quanto no oceano/atmosfera, com 63 níveis verticais no oceano e 64 níveis verticais na atmosfera.

A fim de tornar esse modelo acoplado global oceano-gelo-terra-atmosfera de alta resolução computacionalmente útil para a pesquisa de mudanças climáticas (a versão de grade de 20 km horizontal e 64 níveis verticais representa 150 vezes o número de pontos da grade do modelo, em relação aos 200 km horizontal, grade de 42 níveis verticais), o paralelismo mpi também teve que ser otimizado para que o modelo seja dimensionado com dezenas de milhares de processadores (Figura 30).

O desenvolvimento deste modelo inclui as seguintes atividades:

- BESM 3.0 - (Global Atmos BAM1.2 sigma acoplado a Global Ocean MOM6 via acoplador FMS de NOAA/GFDL) foi concluída, incorporando os últimos desenvolvimentos em modelagem oceânica de GFDL, com o modelo oceânico global MOM6, que incorpora

coordenadas Z verticais e isopicnais, além de um modelo de gelo marinho aprimorado SIS2 e modelo de biogeoquímica COBALT.

- BESM 3.0 - Durante este período, o BESM 3.0 foi testado tanto para uma execução livre de 100 anos quanto para 30 anos (1981-2010) de previsões sazonais de um ano, inicializadas dias 1 a 10 de novembro de cada ano.

- MOM6 - Foi realizada integração de 360 anos do modelo oceânico MOM6 forçado com campos atmosféricos prescritos para testes de estabilidade do modelo. Como resultado, constatou-se a geração de circulação meridional oceânica (AMOC) compatível com valores observados (figura não mostrada).

- BESM 3.0 - Alta resolução. Uma versão de alta resolução do BESM 3.0 foi compilada e testada, aumentando a resolução do modelo de T062L42 (ou seja, 200 km de grade horizontal e 42 níveis na vertical) para uma resolução horizontal intermediária de T126L42 (ou seja, 100 km de resolução de grade horizontal e 42 níveis na vertical) e o T666L64 (ou seja, 20 km de resolução de grade horizontal e 64 níveis na vertical); sob avaliação e testes.

- BESM 3.1 - A versão mais recente do modelo de componente atmosférico do BESM foi atualizada para BESM 3.1 e substituiu a versão anterior do modelo atmosférico BAM 1.2\_sigma vertical de BESM 3.0 por BAM 2.0\_hybrid sigma-pressure sistema de coordenadas verticais em BESM 3.1; sob avaliação e testes.

BESM 3.0 T666L64\_atmos-1/4x1/4L63\_ocean usando 1.440 núcleos de um supercomputador CRAY XC-50 na sede da CRAY nos EUA.

## Desenvolvimento do Modelo Regional do Sistema Terrestre – RESM

Foi desenvolvida uma versão do modelo regional Eta acoplado ao modelo de superfície Noah-MP. Nesta versão original, a representação em ‘tile’ foi implementada para capturar as heterogeneidades da superfície e a inclusão de mais 4 camadas de solo, atingindo uma profundidade de 12 metros de coluna de solo, o que é adequado para vegetação com zonas de raízes mais profundas, como florestas tropicais. Nesta versão, foi introduzida a capacidade de atualizar temporalmente os mapas de cobertura e uso da terra ao longo da integração, que é a forma adequada de avaliar os impactos do uso da terra em uma escala de tempo do clima. O modelo provou ser capaz de rodar em altíssima resolução (1km) e para longas integrações gerar cenários de mudanças climáticas ao longo do século XXI. O mapa de vegetação foi atualizado. O esquema de superfície terrestre agora pode distinguir dois tipos de floresta tropical, a floresta amazônica e a Mata Atlântica, por meio de parâmetros como profundidade da raiz, albedo etc. O esquema também pode distinguir o tipo caatinga do de savana, que é um importante bioma no nordeste do Brasil (Figura 31).

As nuvens convectivas desempenham um papel importante no balanço energético local, interagindo diretamente com a radiação solar e a radiação terrestre. No entanto, esquemas de parametrização de radiação de modelos atmosféricos geralmente consideram nuvens produzidas a partir de esquemas microfísicos ou algum outro critério de saturação de umidade na grade do modelo. Esquemas de parametrização convectivos profundos tendem a gerar precipitação de nuvens convectivas sem que o esquema de radiação perceba sua carga de água. Esta poderia ser uma fonte de excesso de radiação solar atingindo a superfície da Terra. O novo esquema de radiação introduzido no modelo Eta é o Rapid Radiation Transfer Model (RRTM). O esquema é testado em céu nublado e um desenvolvimento adicional é a inclusão da nuvem convectiva profunda no esquema RRTM. Isso produziu uma redução adicional no viés positivo do fluxo radiativo de

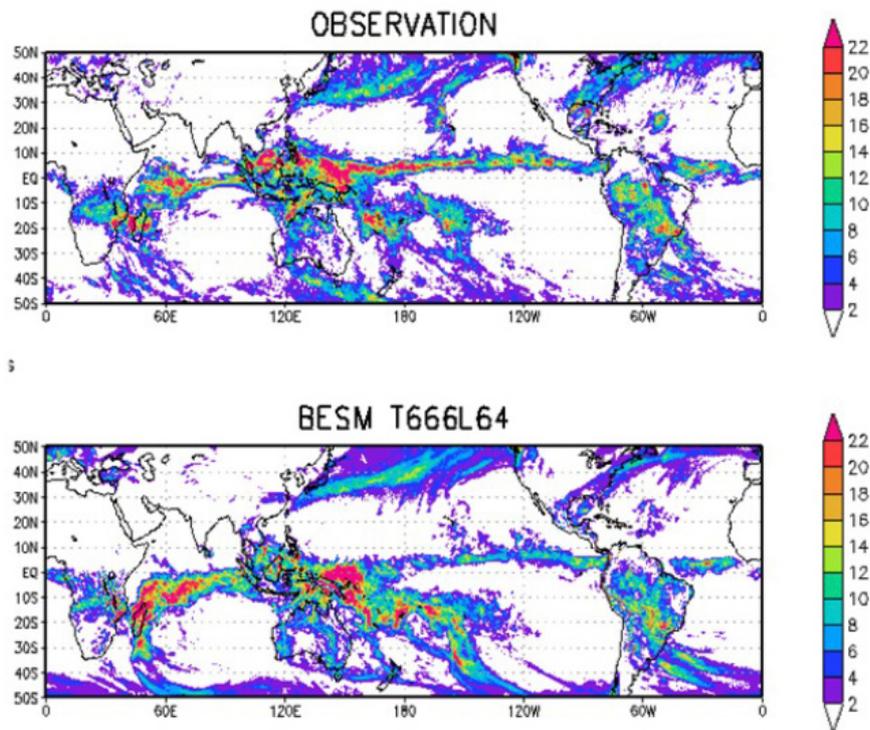
ondas curtas incidente na superfície, melhoria na cobertura de nuvens, no ciclo diurno da radiação líquida na superfície e na temperatura a 2 metros. No entanto, a precipitação total foi reduzida. Em uma simulação de 10 anos, o modelo com as novas modificações é capaz de reproduzir a variabilidade sazonal dos fluxos de radiação durante as estações de verão e inverno em comparação com dados de reanálise. A Figura 31 mostra que o novo esquema RRTM no modelo Eta melhorou os fluxos radiativos médios e a temperatura média de 2 m. Novos testes para aprimorar a versão Eta/RRTMG estão sendo realizados com a nova versão do modelo Eta (v.1.4.3) para melhorar a precipitação. Esta versão possui novas variáveis de saída, como água líquida e água de nuvem integrada na vertical, necessárias para o estudo da interação nuvem-radiação. Um artigo está sendo preparado com resultados da integração curta.

A nova versão Eta v.1.4.2 foi utilizada no Workshop de modelagem regional utilizando o modelo Eta (VII WorkEta). Esta é uma versão unificada pois a partir de único pacote de programas pode-se utilizar o modelo para previsão de tempo, clima sazonal e subsazonal e projeções de mudanças climáticas. O evento contou com mais de 200 inscritos e cerca de 20 participantes para a parte prática de modelagem. Um dos frutos das aulas práticas foi a elaboração do Manual do Modelo Eta v.1.4.2 (Gomes et al., 2023) publicado pelo INPE.

Está sendo preparada uma primeira simulação longa, de 30 anos, com a nova versão Eta v.1.4.2 utilizando ERA5 como condição de contorno. Esta é uma simulação de referência para identificar os principais erros do modelo em integrações multidecadais.

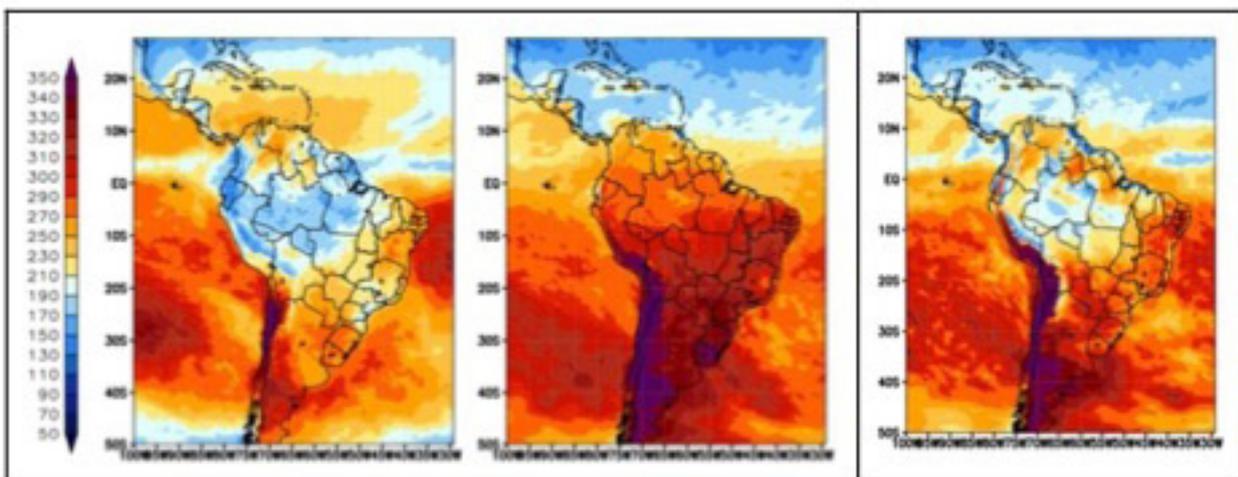
Uma versão do modelo Eta desenvolvida para estudos paleoclimáticos foi avaliada a partir de um novo conjunto de proxies para o período do Holoceno Médio (Marchi et al., 2023). Esta validação mostrou o modelo ser capaz de reproduzir as principais diferenças entre regime de chuva e de temperatura do Holoceno Médio e os dias atuais.

# BESM 3.0 20 Km Ocean-Atmos Global Grid: 10 day precipitation forecast



BESM3.0: BAM1.2 coupled to MOM6; Atmos: T666L64, Ocean: 1/4x1/4L63; run at CRAY XC-50 supercomputer

**Figura 30** – BESM 3.0 Grade oceano-atmosfera global de 20 km. Previsão de precipitação de 10 dias do IC 2007010100:00 no supercomputador CRAY XC50. Fonte: Comunicação pessoal de Jonas Tamaoki (2022).



**Figura 31** – Radiação solar incidente à superfície (W/m²) (a) observada CMSAF (b) experimento Controle Eta-GFDL, (c) experimento Eta-RRTMG modificado, para o mês de janeiro de 2008.

## PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

1. 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>.
2. Capistrano, V. B., and Coauthors, 2020: Assessing the performance of climate change simulation results from BESM-OA2.5 compared with a CMIP5 model ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 13, 2277–2296, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2277-2020>.
3. da Silva Tavares, P., R. Acosta, P. Nobre, N. C. Resende, S. C. Chou, and A. de Arruda Lyra, 2023: Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. *Reg. Environ. Change*, 23, 40, <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02042-1>.
4. DEREZYNSKI, CLAUDINE ; CHOU, SIN CHAN ; LYRA, ANDRÉ ; SONDERMANN, MARCELY ; REGOTO, PEDRO ; TAVARES, PRISCILA ; CHAGAS, DIEGO ; Gomes, Jorge Luís ; RODRIGUES, DANIELA CARNEIRO ; SKANSI, MARÍA DE LOS MILAGROS . Downscaling of climate extremes over South America - Part I: Model evaluation in the reference climate. *WEATHER AND CLIMATE EXTREMES*, v. 29, p. 100273, 2020.
5. Gomes WB, Correia FWS, Capistrano VB, Veiga JAP, Vergasta LA, Chou SC, Lyra AA, Nobre P and Rocha VM (2020) Water budget changes in the Amazon basin under RCP 8.5 and deforestation scenarios. *Clim Res* 80:105–120. <https://doi.org/10.3354/cr01597>
6. Gomes, JL; Chou, SC, Mesinger, F; Lyra, AA; Rodrigues, DC; et al, 2023: MANUAL MODELO ETA – VERSÃO 1.4.2. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao José dos Campos, SP. (<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48G6PU5>)
7. Javier Diez-Sierra, Maialen Iturbide, José M. Gutiérrez, Jesús Fernández, Josipa Milovac, Antonio S. Cofiño, Ezequiel Cimadevilla, Grigory Nikulin, Guillaume Levvasseur, Erik Kjellström, Katharina Bülow, Andrés Horányi, Anca Brookshaw, Markel García-Díez, Antonio Pérez, Jorge Baño-Medina, Bodo Ahrens, Antoinette Alias, Moetasim Ashfaq, Melissa Bukovsky, Erasmo Buonomo, Steven Caluwaerts, Sin Chan Chou, et al., 2022: The worldwide C3S CORDEX grand ensemble: A major contribution to assess regional climate change in the IPCC AR6 Atlas. *BAMS*. Published-online: 30 Sep 2022 DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0111.1>
8. Marchi, A. C. de Melo, M. L. D. de Lyra, A. de A., Kubota, P. Y. ., Chou, S. C., & Rosas, P. (2022). Simulações climáticas do Holoceno Médio para o Brasil utilizando o modelo regional paleoclimático Eta. *Derbyana*, 43, e775. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.775>

# Comunicação, disseminação de conhecimento e educação para a sustentabilidade

## Comunicação e mudanças climáticas

No campo onde a comunicação e as artes se cruzam, a equipe desta componente trabalhou intensamente na produção de material jornalístico para divulgar o trabalho realizado pelas diferentes componentes do INCT-MC2 e outros pesquisadores que atuam na área de mudanças climáticas, por meio de publicações na revista *ClimaCom*. Além das matérias jornalísticas, foram lançados dois dossiês *ClimaCom*: “Diante dos negacionismos”, que se propôs a refletir sobre o negacionismo e seus efeitos na sociedade; e “Este lugar, que não é meu?”, que trata dos problemas de migração e destruição de refúgios no Antropoceno. Os artigos, ensaios e produções artísticas publicados nestes dossiês da *ClimaCom* têm como objetivo discutir, analisar e propor novas possibilidades de ação e pensamento diante do negacionismo e das migrações forçadas ou necessárias. Estes são assuntos politicamente importante em termos de comunicação sobre mudanças climáticas porque, por um lado, o planeta já vive uma crise de refugiados climáticos em várias regiões; por outro lado, pesquisas e criações artísticas mostram que, entre os que combatem o negacionismo e os que aderem a ele, por vezes há um elemento em comum: tendem a “compartilhar a defesa de verdades universais, certezas inquestionáveis e exclusivistas, monoculturas de pensamento” (Editorial, *ClimaCom* n. 21, 2021) – o que dificulta o processo comunicativo. Assumir que comunicar implica a criação de encontros entre formas heterogêneas de pensar e viver, ou parentesco ímpar, que garantem a expressão e o diálogo entre as diferenças, tem sido a tônica da pesquisa desenvolvida pela Rede Latinoamericana de Divulgação Científica e Mudanças Climáticas, que se insere neste tema transversal (Figura 32)

## *Mudanças climáticas e segurança alimentar: Entrevista na ClimaCom com Eduardo Assad (EMBRAPA)*

A partir das experiências de escassez de alimentos ocorridas na segunda guerra mundial, agrônomos, geógrafos, economistas e outros estudiosos passaram a adotar o termo segurança alimentar para se referir ao conjunto de medidas sociocientíficas desenvolvidas para evitar quadros de fome. Sete décadas após o conflito, a fome ainda é um obstáculo para a sociedade brasileira, sobretudo nas grandes metrópoles e nas regiões mais pobres, como o semiárido nordestino. Ao analisar o problema, Eduardo Assad, cientista-líder do subcomponente Segurança Alimentar do INCT Mudanças Climáticas Fase 2 (INCT-MC2), é categórico ao afirmar que a fome no Brasil não é causada pela produção de alimentos, mas sim de ordem logística. “Nós não temos escassez de alimentos no país. Nós temos má distribuição. Nosso foco para o futuro deve ser a criação de políticas públicas que permitam que os alimentos sejam mais bem distribuídos”, apontou. Sobre o futuro da segurança alimentar brasileira, além de vencer definitivamente a fome, o pesquisador afirma que o grande desafio em relação às mudanças climáticas e a agricultura brasileira é encontrar mecanismos para o aumento da produção e, em paralelo, buscar técnicas para reduções de emissões. Como exemplo, cita os trabalhos de agricultura de baixo carbono desenvolvidos na

Embrapa e em outras instituições de pesquisa. Além desses temas, o cientista fala nesta entrevista sobre o futuro da agropecuária brasileira, novas pesquisas em relação à produção, a importância da adaptabilidade às mudanças climáticas, modelos agroflorestais e perspectivas sustentáveis de exploração econômica da Amazônia, entre outros assuntos que são tendências de estudos no INCT-MC2.

Vinte artigos jornalísticos foram publicados ou estão em processo de publicação na revista *ClimaCom* sobre atividades de pesquisadores do INCT-MC2 ou pesquisas correlatas sobre mudanças climáticas. Esta atividade foi desenvolvida pela bolsista FAPESP TT3 Gláucia Pérez, sob a orientação de Susana Dias, visando à produção de notícias para a revista por meio da cobertura de eventos, leituras de artigos e entrevistas com pesquisadores dos subcomponentes e temas transversais do INCT, bem como entrevistas com outros pesquisadores. A equipe do tema transversal investiu, ainda, na produção artística e na interlocução com artistas que trabalham com o tema das mudanças climáticas. As imagens abaixo (figuras 33 a 35) foram produzidas dentro deste contexto. Tais atividades inserem-se numa linha de investigação que procura formas alternativas de enquadrar as alterações climáticas, visando construir maneiras de envolvimento com diferentes públicos não conseguidas pelos modos habituais de comunicação de massa.

### Estudos Sociais da Ciência e Tecnologia

Na área de estudos sociais da ciência e tecnologia, além dos artigos sobre o tema publicados no *ClimaCom* e em outros periódicos, as atividades do tema transversal ganharam novo fôlego com uma nova atividade: a pesquisa sobre as variáveis e as condições e contextos de colaboração interdisciplinar no INCT-MC2. Tal esforço de investigação é dedicado a entender como hábitos disciplinares profundamente enraizados em comunidades de pesquisa, incluindo as ciências sociais, e afetam a cooperação

inter e multidisciplinar diante da complexa natureza multiescalar do problema em questão. A investigação, liderada pela socióloga Julia Guivant, contribui para o esforço de compreensão dos contextos e condições de colaboração entre investigadores das ciências naturais e das ciências sociais, com particular atenção para a questão da metacognição.

### Educação

No campo das ações educativas, além das atividades de pesquisa acadêmica sobre o tema dos integrantes da equipe do tema transversal, foi iniciada uma parceria com o movimento *Escolas Pelo Clima* e com o *Cemaden Educação*. A atividade parte do entendimento de que, além de explorar e propor formas inovadoras de perceber a questão ambiental e se engajar com outras formas de vida e com o meio ambiente, é de fundamental importância que tais discussões e promulgações de ciências do clima sejam incorporadas ao cotidiano das práticas educativas no país. Uma série de encontros foi realizada no planejamento do programa *#aprenderparaprevenir*, atividade anual do *Cemaden Educação* e que, em 2022, teve como tema a questão das mudanças climáticas.



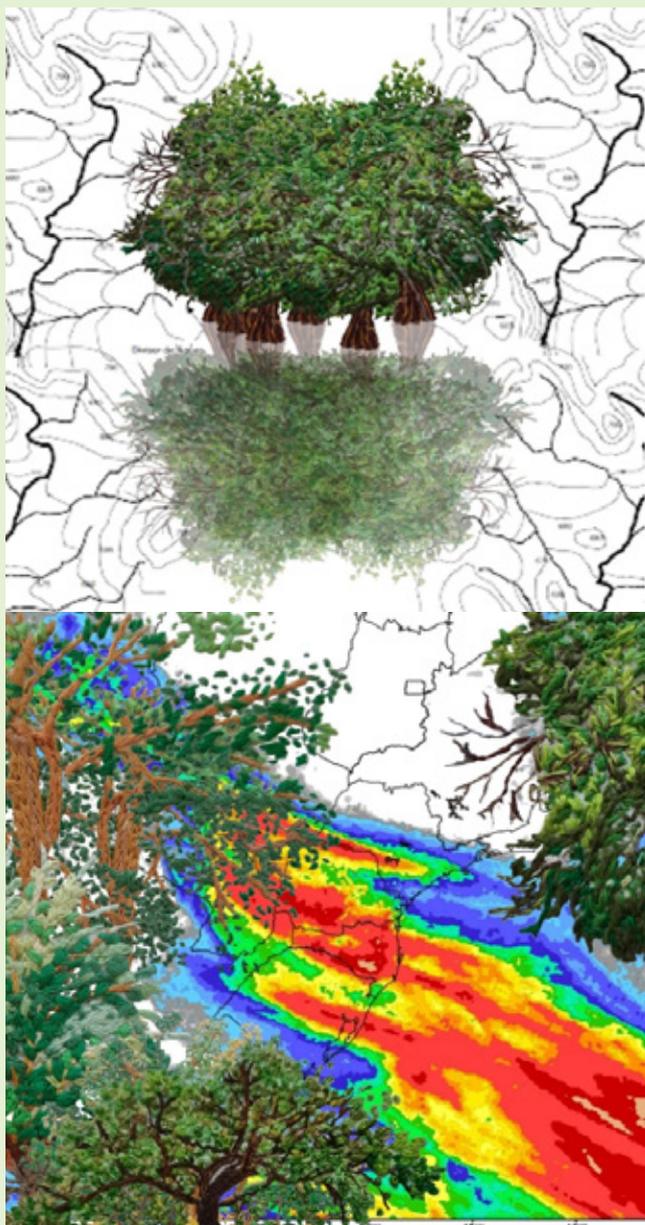
**Figura 32** - Pintura de Tiago Gomes, da série *Eventos extremos*. A obra tem o intuito de representar artisticamente algumas das experiências das catástrofes associadas às mudanças climáticas. Publicado na seção de artes da Revista *ClimaCom* em 2022



**Figura 33** – Colagens da série “Laboratório de comunicação”, em que notícias são contagiadas com outras linguagens e formas de expressão. Criação: Fernanda Pestana e Susana Dias.



**Figura 34** – Fotografia do livro “Floresta?”, produzida no encontro entre a Mata Santa Genebra em Campinas e o laboratório de pesquisas agrícolas da sub-componente de Segurança alimentar do INCT Mudança Climáticas Fase 2. Criação: Susana Dias e Alessandra Penha.



**Figura 35** – Bordado de Isilda Oliveira e colagens digitais de Paulinha Pinto e Susana Dias, 2022. Esta série de imagens destaca a importância da vida vegetal para o clima da Terra e a necessidade de reinventar as alianças entre ciência e artes, digital e artesanal, para pensar medidas de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

### **PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:**

1. DIAS, S. O.; PESTANA, F.; OLIVEIRA, R.S.M. (Orgs.) . Conversas in-finitas: mudanças climáticas, divulgação científica, educação e.... Campinas: BCCL-Unicamp, 2020.
2. 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.
3. OLIVEIRA JR, W.M.; WUNDER, A. (Orgs.) Casa dos saberes ancestrais: diálogos com sabedorias indígenas. Campinas: Diretoria de Cultura-BCCL/Unicamp, 2020. 228p.
4. GUZZO, M. S. L. (2022). Práticas artísticas diante do Antropoceno: uma experiência de refúgio. Liinc Em Revista, 18(1), e5908. <https://doi.org/10.18617/liinc.v18i1.5908>
5. SERRAO-NEUMANN, S.; MOREIRA, F.A. DI GIULIO, G.M. Advancing transdisciplinary adaptation research practice. Nature Climate Change, v. 12, p. 1-3, 2021.

# Impactos nos ecossistemas brasileiros frente às mudanças no uso da terra e na biodiversidade para a sustentabilidade

## Medições contínuas de gases traços e aerossóis na torre Amazon Tall Tower Observatory -ATTO

As atividades na Amazônia se concentraram em medições contínuas de gases traços e aerossóis na torre ATTO, bem como na operação contínua da rede de fotômetros solares NASA/AERONET. Também trabalhamos em vários projetos de propriedades físico-químicas de aerossóis na Amazônia.

Dentre os estudos que realizamos em termos de impactos de aerossóis no ecossistema, um deles está relacionado aos impactos climáticos de partículas de aerossóis. A profundidade óptica do aerossol (AOD) mede a quantidade total de aerossol opticamente ativo em toda a coluna atmosférica. A Figura 36 mostra a série temporal de AOD em vários sítios AERONET na Amazônia de 2000 a 2021. A figura mostra a forte sazonalidade de AOD, com valores muito baixos na estação chuvosa (normalmente 0,1 a 500 nm) a valores muito altos em a estação seca. É possível observar a diminuição da AOD com a diminuição do desmatamento após 2007.

O recém-descoberto componente de absorção chamado Brown Carbon (BrC) pode ser uma fração significativa da absorção total do aerossol, que é um importante componente do sistema climático amazônico, uma vez que afeta o forçante radiativo. A Figura 37 mostra um mapa com a fração de absorção que é atribuída ao Black Carbon (BC) e ao BrC. No norte da Amazônia, 25% da absorção do aerossol está associada ao BrC, que é o componente orgânico de absorção do aerossol. Também derivamos mudanças na Amazônia em termos de gases traços biogênicos, como o isopreno. A Figura 38 mostra a série temporal de isopreno na Amazônia, no período de 2005 a 2014, mostrando uma diminuição nas concentrações.

Sobre a torre ATTO, as propriedades químicas e físicas detalhadas do aerossol continuaram. Em particular, analisou-se os mecanismos de formação

de novas partículas (NPF), referindo-se à nucleação de aglomerados moleculares e seu subsequente crescimento na faixa de tamanho dos núcleos de condensação de nuvens (CCN) como uma fonte globalmente significativa e relevante para o clima de aerossóis atmosféricos. Embora o NPF 'clássico' dentro da camada limite planetária (PBL) ocorra em todo o mundo, a floresta amazônica representa uma notável exceção. Aqui, os eventos clássicos de nucleação raramente são observados no PBL, mas, em vez disso, o NPF ocorre na troposfera superior (UT), seguido por injeção descendente de partículas sub-50 nm (CN <50) no PBL, que crescem subsequentemente. No entanto, aspectos centrais de nossa compreensão mecanicista desses processos na Amazônia permaneceram enigmáticos. Aqui, analisamos os padrões diurnos e sazonais, bem como as condições meteorológicas durante 254 desses eventos de crescimento amazônico em 217 dias de eventos, que mostram uma ocorrência repentina de partículas entre 10 e 50 nm no PBL, seguida de seu crescimento para tamanhos CCN. Nosso estudo é baseado em mais de seis anos (fevereiro de 2014 a setembro de 2020) de aerossóis e dados meteorológicos do Amazon Tall Tower Observatory (ATTO). A ocorrência do dia do evento foi significativamente maior durante a estação chuvosa com 88% de todos os eventos de janeiro a junho, em relação à estação seca com 12%, de julho a dezembro, provavelmente devido a diferenças no sumidouro de condensação (CS), aerossol atmosférico carga e condições meteorológicas. A Figura 39 ilustra um esquema conceitual de como ocorre a formação de novas partículas em grandes altitudes na Amazônia.

Além dos estudos de aerossóis, também trabalhou-se na modelagem de gases traços reativos, através da modelagem regional da química de aerossóis e gases traços usando o WRF-Chem. Os resultados mostram que a pluma de Manaus interagindo com as emissões biogênicas naturais produz quantidades significativas de ozônio longe de Manaus (Figura 40).

Também estudamos as emissões da queima de biomassa da Amazônia e os processos de envelhecimento das massas de ar após as emissões. Fizemos isso junto com a análise das propriedades ópticas do aerossol. A Figura 41 apresenta o mapa da região de estudo em Rio Branco, Acre.

Neste estudo focamos nas relações entre a composição do aerossol e as propriedades ópticas. A Figura 42 mostra o coeficiente de absorção de massa (MAE) em função do comprimento de onda, bem como a contribuição para a absorção do aerossol para cada um dos 5 componentes orgânicos do aerossol.

### **Atividades relacionadas aos ecossistemas do Cerrado**

A investigação foca nos impactos do fogo nos biomas brasileiros, em particular, o interesse no Cerrado e no desenvolvimento de um modelo para avaliar o comportamento do fogo. Investigamos os determinantes do impacto do fogo nos biomas brasileiros usando um conjunto de dados de áreas queimadas entre 2001 e 2019 para simular seu impacto futuro sob políticas alternativas e cenários climáticos. Começamos derivando um índice de impacto do fogo usando uma análise de componente principal (PC) compreendendo as variáveis: 1. intensidade do fogo, 2. recorrência do fogo, 3. tamanho da área queimada, 4. intervalo de tempo médio entre incêndios sucessivos e 5. predominância de incêndios na estação seca. Foram consideradas como Incêndios de Alto Impacto (HIF) aquelas áreas cujos valores do primeiro CP estavam acima do percentil 90. O HIF ocorreu na Amazônia, Cerrado e Pantanal, mas não nos biomas Mata Atlântica, Pampa e Caatinga. Como principais impulsionadores do HIF, nossos modelos espaciais autorregressivos (SAR) (Amazônia  $R^2 = 0,66$ , Pantanal  $R^2 = 0,86$  e Cerrado  $R^2 = 0,79$ ) indicaram o clima (Amazônia, 25%, Pantanal, 53% e Cerrado, 56%) juntamente com mudança de uso da terra (Amazônia, 75%, Pantanal, 25% e Cerrado, 38%). A maioria das HIF ocorreu em remanescentes de vegetação nativa (NVR) (55% na Amazônia, 86% no Pantanal e 94% no Cerrado), especialmente em

locais próximos a áreas desmatadas nas últimas duas décadas. Somente no Pantanal as cargas de combustível (biomassa seca) desempenham um papel importante no HIF (22% de explicação). No Cerrado, representou apenas 4% da variabilidade observada e na Amazônia não foi um fator significativo. No período analisado, o HIF impôs uma perda de 23%, em média, na resposta do NDVI da vegetação nativa na Amazônia, 19% no Cerrado e 16% no Pantanal, indicando estresse fisiológico. Simulações de mudanças futuras no clima e no uso da terra apontaram para um aumento dramático no HIF até 2050.

No cenário RCP 4.5 e forte governança ambiental, o HIF no Cerrado se expandiria dos atuais 3% do bioma para 15%, de 7 para 8% no Pantanal e de 0,7 para 1,2% na Amazônia. Além disso, o impacto do fogo se intensificaria em 95% do Cerrado, 97% da Amazônia e 74% do Pantanal. No caso do Cerrado brasileiro, as estimativas de risco de incêndio são fundamentais para prevenir e combater incêndios florestais. Para tanto, desenvolveu-se um modelo mensal de probabilidade de propagação do fogo para o bioma Cerrado brasileiro baseado na relação histórica entre cargas de combustível e áreas queimadas. Para tanto, primeiramente se estratificou o bioma em 16 regiões climáticas, dada a influência do clima nas cargas de combustível. Usa-se áreas queimadas históricas e cargas de combustível de dados de sensoriamento remoto entre 2015 e 2018 para construir um modelo não estacionário que estima a dinâmica das cargas de combustível em todo o bioma. A sazonalidade do clima é o principal fator que determina a dinâmica das cargas de combustível. Os resultados mostram que a probabilidade de propagação do fogo está altamente correlacionada com os eventos históricos de queima ( $r = 0,87$ ). A recuperação das cargas de combustível pós-incêndio leva, em média, 2,43 anos; no entanto, nossos resultados apontam para um caminho descendente da biomassa da vegetação do bioma devido a incêndios recorrentes frequentes. Os modelos desenvolvidos fornecem uma ferramenta útil para melhorar a representação dos padrões espaciais e da sazonalidade dos incêndios, a fim de apoiar as práticas de manejo.

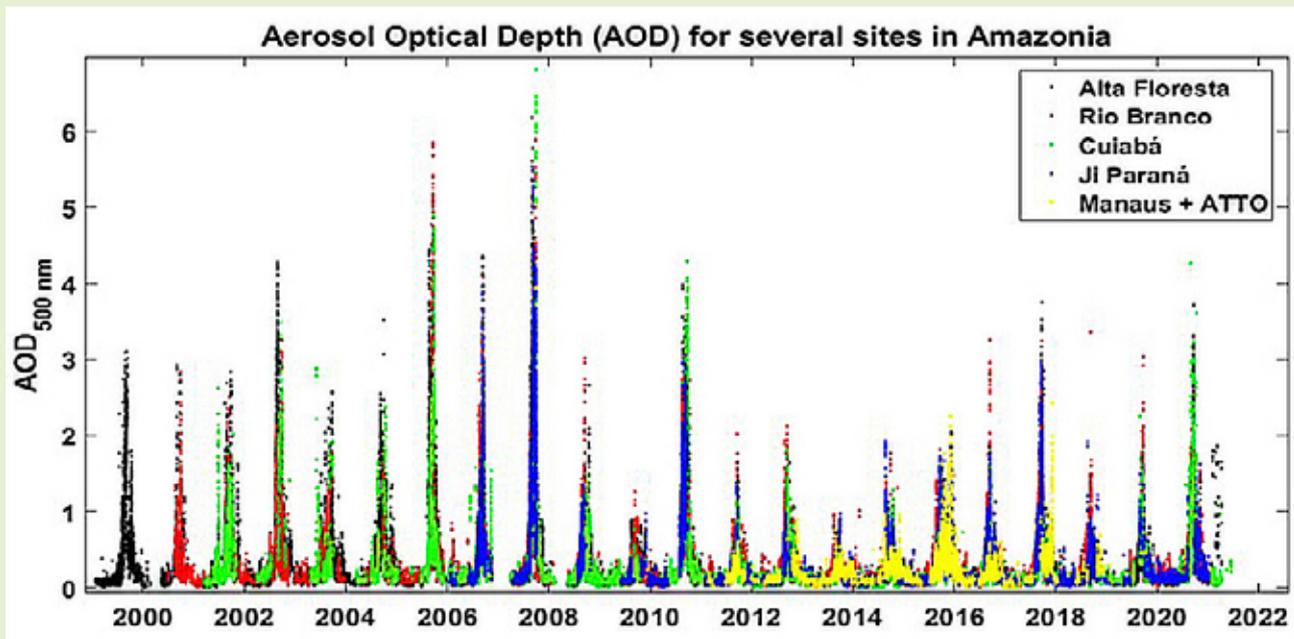


Figura 36 – Séries temporais de profundidade óptica de aerossol (AOD) no comprimento de onda de 500 nm para vários locais na Amazônia de 2000 a 2021 medidos com fotômetros solares AERONET.



Figura 37 – Mapa com a fração de absorção atribuída ao Black Carbon (BC) e ao Brown Carbon (BrC).

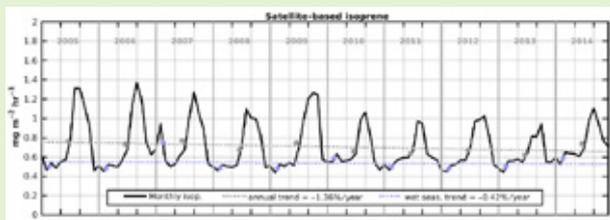


Figura 38 – Estimativas de fluxo de isopreno baseadas em satélite da estação chuvosa de 2005 a 2014 na Amazônia, derivadas de colunas de formaldeído OMI. Uma tendência decrescente de -0,42% ao ano para os fluxos de isopreno foi observada durante a estação chuvosa.

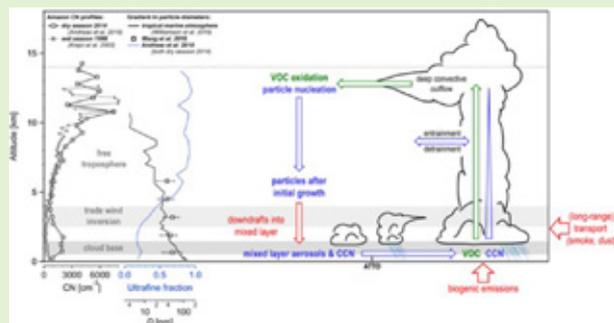


Figura 39 – Esquema conceitual de fontes, redistribuição e remoção de partículas de aerossóis e núcleos de condensação de nuvens (CCN) sobre a floresta amazônica. As três principais categorias de fontes de aerossóis na Amazônia são mostradas em vermelho. É enfatizado o ciclo do aerossol no curso de nuvens convectivas profundas com transporte ascendente de compostos orgânicos voláteis (VOC) e partículas de aerossol, formação de novas partículas na troposfera livre, transporte descendente com crescimento inicial de partículas e, eventualmente, injeção descendente de partículas ultrafinas na camada mista.

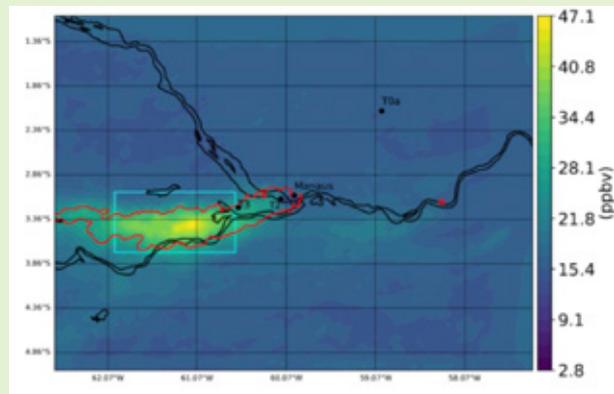
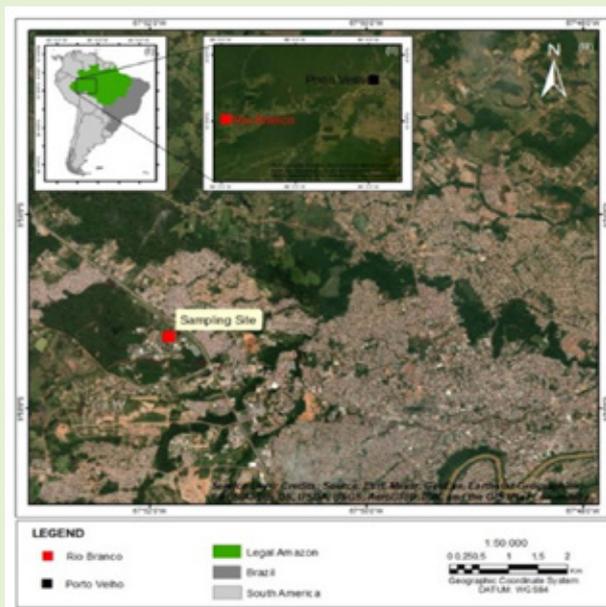
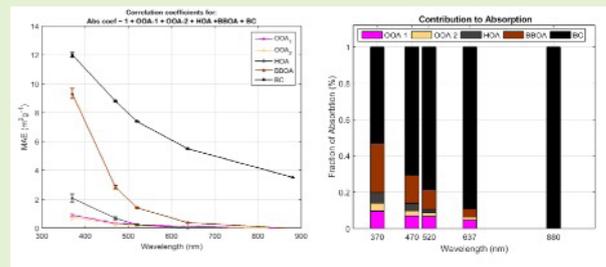


Figura 40 – Simulações de modelagem regional da pluma de O3 produzida a partir da interação das emissões de Manaus com o componente biogênico natural.



**Figura 41** – Localização do local de amostragem na cidade de Rio Branco, Acre, Brasil. (I) Contorno da América Latina e da Amazônia legal brasileira em verde, (II) Zoom mostrando Rio Branco e Porto Velho, as capitais dos estados de Acre e Rondônia, respectivamente, e as maiores cidades da região, (III) Cidade de Rio Branco indicando a localização geográfica do local de amostragem.



**Figura 42** – a) Eficiências de absorção de massa (MAE) para cada componente do aerossol (fatores OA e BC), MAE são os coeficientes da regressão linear multivariada. As barras de erro representam o desvio padrão dos coeficientes b) Estimativa da contribuição de OA e BC para o coeficiente de absorção em cada comprimento de onda.

## PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES:

- Bustamante, M. Tropical Forests and Climate Change Mitigation: The Decisive Role of Environmental Governance. *Georgetown Journal of International Affairs*, v. 1, p. 1, 2020.
- Artaxo P, Almeida-Val VMF, Bilbao B, Brando P, Bustamante M, Coe MT, Correa SB, Cuesta F, Costa MH, Miralles-Wilhelm F, Salinas N, Silvério DV, Val AL. 2021. Chapter 23: Impacts of deforestation and climate change on biodiversity, ecological processes, and environmental adaptation. In: Nobre C, Encalada A, Anderson E, Roca Alcazar FH, Bustamante M, Mena C, Peña-Claros M, Poveda G, Rodriguez JP, Saleska S, Trumbore S, Val AL, Villa Nova L, Abramovay R, Alencar A, Rodríguez Alza C, Armenteras D, Artaxo P, Athayde S, Barretto Filho HT, Barlow J, Berenguer E, Bortolotto F, Costa FA, Costa MH, Cuví N, Fearnside PM, Ferreira J, Flores BM, Frieler S, Gatti LV, Guayasamin JM, Hecht S, Hirota M, Hoorn C, Josse C, Lapola DM, Larrea C, Larrea-Alcazar DM, Lehm Ardaya Z, Malhi Y, Marengo JA, Melack J, Moraes R M, Moutinho P, Murmis MR, Neves EG, Paez B, Painter L, Ramos A, Rosero-Peña MC, Schmink M, Sist P, ter Steege H, Val P, van der Voort H, Varese M, Zapata-Ríos G (Eds). *Amazon Assessment Report 2021*. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Available from <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>. ISBN 9781734808001. DOI: 10.55161/VKMN1905.
- de Oliveira, G., Chen, J.M., Stark, S.C., Berenger, E., Moutinho, P., Artaxo, P., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C. Smoke pollution's impacts in Amazonia. *Science*, Vol. 369, issue 6504, 634-635, DOI: 10.1126/science.abd5942, 2020.
- Artaxo, P, Hansson, H-C, Andreae, MO, Bäck, J, Alves, EG, Barbosa, HMJ, Bender, F, Bourtsoukidis, E, Carbone, S, Chi, J, Decesari, S, Després, VR, Ditas, F, Ezhova, E, Fuzzi, S, Hasselquist, NJ, Heintzenberg, J, Holanda, BA, Guenther, A, Hakola, H, Heikkinen, L, Kerminen, V-M, Kontkanen, J, Krejci, R, Kulmala, M, Lavric, JV, de Leeuw, G, Lehtipalo, K, Machado, LAT, McFiggans, G, Franco, MAM, Meller, BB, Morais, FG, Mohr, C, Morgan, W, Nilsson, MB, Peichl, M, Petäjä, T, Praß, M, Pöhlker, C, Pöhlker, ML, Pöschl, U, Von Randow, C, Riipinen, I, Rinne, J, Rizzo, LV, Rosenfeld, D, Dias, MAFS, Sogacheva, L, Stier, P, Swietlicki, E, Sörgel, M, Tunved, P, Virkkula, A, Wang, J, Weber, B, Yáñez-Serrano, AM, Zieger, P, Mikhailov, E, Smith, JN and Kesselmeier, J. 2022. 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> . 2022.
- OLIVEIRA, UBIRAJARA ; SOARES-FILHO, BRITALDO ; DE SOUZA COSTA, WILLIAM LELES ; GOMES, LETÍCIA ; Bustamante, Mercedes ; MIRANDA, HELOISA . Modeling fuel loads dynamics and fire spread probability in the Brazilian Cerrado. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*, v. 482, p. 118889, 2021.

# Fase de Síntese e integração dos resultados das componentes

A produção e o fornecimento de energia e alimentos são os principais setores que podem ser afetados pelo aumento nas emissões de CO<sup>2</sup> e que eventualmente impulsionam as mudanças climáticas globalmente. Os setores água-energia-alimentos são vulneráveis às variações e mudanças do clima, e algumas medidas de adaptação podem ser muito necessárias no setor energia. Por exemplo, irrigação, que requer mais energia do que a agricultura de sequeiro; dessalinização, que requer mais energia do que o abastecimento de água convencional; e maior uso de armazenamento de águas subterrâneas e superficiais, o que pode exigir mais energia para bombeamento adicional.

Esta perspectiva está relacionada com a abordagem do Nexus+, com a disponibilidade de água a desempenhar um papel preponderante na relação água-energia-segurança alimentar. Além disso, a produção de água, energia e alimentos é essencial para alcançar outros objetivos de desenvolvimento sustentável, como saúde e bem-estar, redução da pobreza, igualdade de gênero, economia e conservação dos ecossistemas e biodiversidade.

Dessa forma, muitas das iniciativas iniciadas e/ou realizadas a partir do Plano Nacional de Adaptação - PNA têm o potencial de contribuir para o desenvolvimento, especialmente para o avanço dos objetivos e metas traçados na Agenda 2030, os chamados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS. Os ODS fazem parte de uma agenda global, com um conjunto de metas para o desenvolvimento sustentável e uma estrutura de monitoramento a ser realizada por meio de relatórios anuais à ONU.

Os ODS foram formulados por meio de um processo participativo, incluindo sociedade civil, setor privado e órgãos locais, fazendo parte da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas - ONU para o período 2016-2030 e se aplicam a todos os países. As 17 metas individuais representam diferentes elementos da sustentabilidade, demonstrando a complexidade de cada meta e suas interdependências.

Segundo a UNFCCC, a integração da agenda de adaptação do Acordo de Paris (no caso brasileiro, o PNA) e da Agenda 2030 para o Desenvolvimento

Sustentável (ODS), com o Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres, deve fornecer uma base para um desenvolvimento sustentável, de baixo carbono e resiliente ao clima.

## Objetivos e Metodologia

O primeiro objetivo é a integração temática das componentes do INCT-MC: Segurança alimentar; Segurança hídrica; Segurança energética; Saúde e alterações climáticas; Desastres naturais, impactos na infraestrutura física em áreas urbanas e desenvolvimento urbano; Impactos nos ecossistemas brasileiros em função das mudanças no uso da terra e na biodiversidade; Economia e impactos em setores-chave; Modelagem do sistema terrestre e produção de cenários climáticos futuros para estudo de vulnerabilidade, impactos, adaptação e resiliência; e Comunicação, disseminação do conhecimento e educação para a sustentabilidade, considerando as inter-relações, por meio da análise de conteúdo, numa perspectiva integrada e transversal.

O segundo objetivo parte da necessária integração com os ODS, a partir de uma análise transversal entre os principais temas da produção científica de cada uma das componentes e os ODS, indicando possíveis sinergias e compensações (trade-offs). Para atingir ambos os objetivos, será utilizada a produção científica, materializada por artigos publicados no período 2020-2023 de cada uma das componentes, bem como relatórios de investigação. Deve-se considerar que há metas que as Nações Unidas definiram que não se aplicam ao Brasil.

A Figura 43 mostra uma visão subjetiva de como as componentes do INCT-MC2 se encaixam nos ODS. Enquanto todas as componentes atuam na ODS-13 sobre clima, algumas atuam em outros ODS direta ou indiretamente, sejam nos temas de água, agricultura, economia e pobreza, saúde, cidades ou em temas mais integradores como, por exemplo, modelagem do sistema terrestre. Esta componente gera cenários de clima futuro que podem ser aplicados em estudos de impactos, vulnerabilidade, adaptação e construção de resiliência às mudanças de clima. Os cenários de mudança climática gerados pela componente de Modelagem Climática e Cenários do INCT-MC2 poderiam ser listados em vários ODS.

Por exemplo, considerando o ODS-16 sobre paz, justiça e instituições eficazes, extremos climáticos relacionados a stress hídrico podem gerar situações de disputa pela água entre estados. Isso aconteceu durante a seca e crise hídrica de 2014-2016 no Sudeste do Brasil. Os governadores de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro se “estranharam” na disputa pelas águas do rio Paraíba do Sul. Previsões futuras de secas persistentes sobre extensas áreas do país podem se tornar gatilhos para conflagrações regionais/nacionais e para evitar ou resolver estas situações precisamos de instituições eficazes que possam agir com paz e justiça, considerando cenários futuros de disponibilidade de água e planejar melhor a distribuição e uso da água.

A componente Saúde lida com “desfechos” (outcomes) e não propriamente com estratégias de redução de impactos. Sendo assim, esta componente tem associação com o ODS 9 como uma consequência lógica e necessária dos conhecimentos adquiridos sobre as relações clima/saúde. Ainda que esta componente não trabalhe com “comunicação”, ela fornece os subsídios para que outros o façam. Por outro lado, parte da pesquisa desta componente tem sido o mapeamento dos impactos de desastres climáticos na saúde, o que destaca a relevância do ODS 5. A componente de Desastres naturais e Cidades também é relevante aos ODS 14 e 15,

quando pensamos em cidades costeiras e soluções baseadas em natureza para centros urbanos.

A componente Energia tem a ver com o ODS 11 que visa, até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros; até 2020, aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar, de acordo com o Marco de Sendai, a Redução do Risco de Desastres 2015-2030 e o gerenciamento holístico do risco de desastres em todos os níveis. Esta componente Energia também contempla o ODS-12 com a meta de, até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais; Incentivar as empresas, especialmente as grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios; Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo (de recursos energéticos).

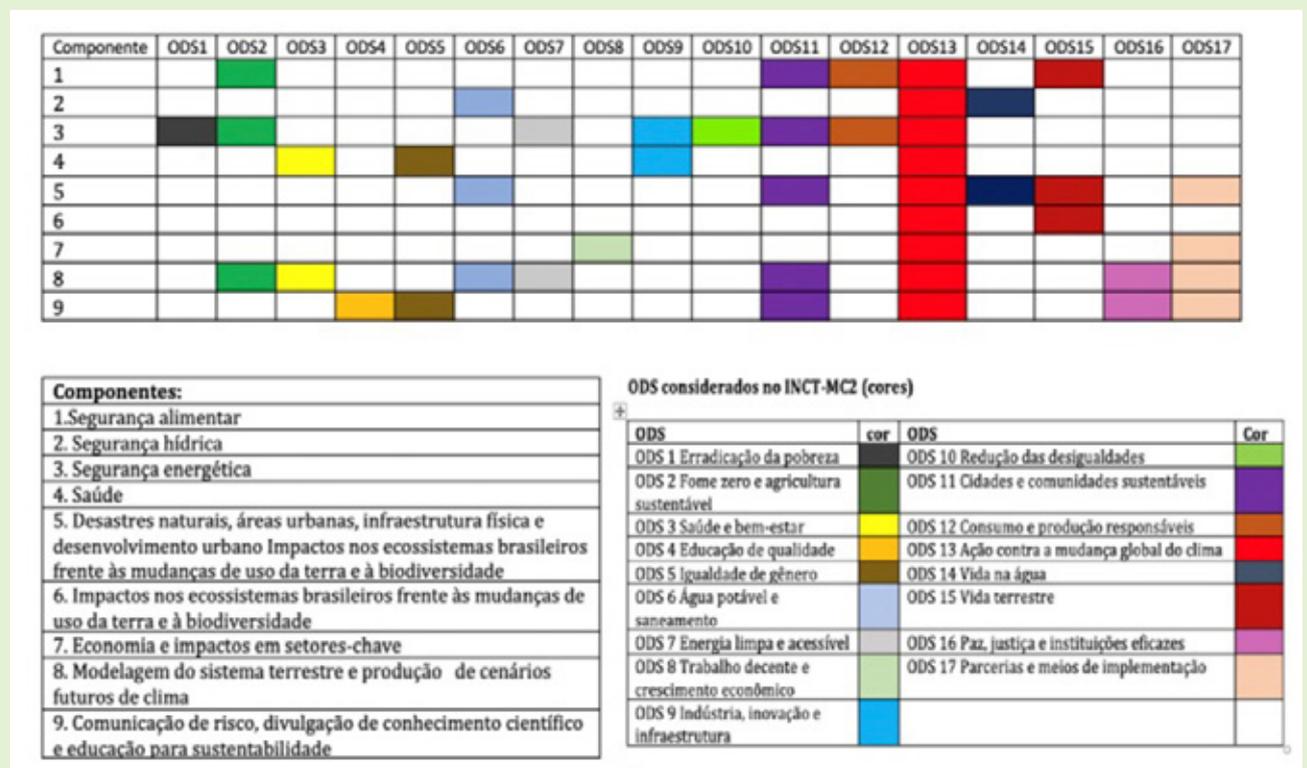


Figura 43 – Lista de ODS que são relevantes às diferentes componentes do projeto INCT-MC2.

# Integração com outros INCTs e programas nacionais e internacionais

A experiência alcançada no INCT-MC2 no período 2020-2023 pode ser avaliada a partir do grau de sinergia interdisciplinar em C&T e sua perenidade social. Internamente, o INCT-MC2 valoriza essa sinergia na integração entre componentes e eixos transversais. Por um lado, essa sinergia é acelerada nas componentes de Segurança alimentar, Segurança hídrica, Segurança energética, Saúde, Impactos nos ecossistemas brasileiros em vista das mudanças de uso de solo e de biodiversidade, Desastres naturais, Análises integradas para tomadas de decisões e políticas públicas. Também, a sinergia é robustecida 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 2020-2023, as componentes e eixos transversais do INCT-MC2 trouxeram recomendações globais para as esferas federal, estadual e municipal no Brasil. Por exemplo, o INCT-MC2 incorporou as recomendações intergovernamentais de C&T advindas do IPCC/AR6, UNESCO-IHP IX 2022-2029, UNEP WWQA/GEMS, WMO Strategic Plan, IBPES e Conferências das Partes (COPs). Dessa sinergia interdisciplinar, o INCT-MC2 promoveu as seguintes ações, conforme a Figura 44:



Figura 44 – Lista de ODS que são relevantes às diferentes componentes do projeto INCT-MC2.

1- Sinergia e Diálogo Interdisciplinar com outros INCTs, p.ex. o INCT-Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa (ONSadapta) e o INCT-Combate à Fome, apoiados por Núcleos de Apoio à Pesquisa (NAPs) de INterdisciplinary CLimate INvestigation cEnter (INCLINE), Center for Education and Research on Disasters (CEPED/USP) e a Cátedra UNESCO sobre Águas/USP, via campanhas de popularização científica iniciadas pelo INCT-MC2 intituladas #UmaGotaDeCiencia #UmaDoseDeResiliencia.

2 - Novos Grupos de C&T Interdisciplinares, via princípios “EDI” (“Igualdade”, “Diversidade” e “Inclusão”) promovidos dentro do INCT-MC2, dentre eles: do “Instituto de Estudos Avançados” IEA/ USP Planetary Health”, do projeto FAPESP CEPID de Pesquisa, Divulgação e Inovação da FAPESP (CeMEAI-“Applied Maths for Industry”), o Centro de Pesquisas em Engenharias sobre Inteligência Artificial da FAPESP (C4AI-“Artificial Intelligence”), o projeto FAPESP-Belmont Forum sobre Gestão de Riscos e Resiliência Social (MADIS-“Management of Disaster Risk and Societal Resilience”).

3- Cooperação de Aceleradores Educacionais (“Cooperative Game-Changer”) na forma de alianças interdisciplinares sobre temas inspirados dentro do INCT-MC2 visando novos projetos relacionados a vários ODSs, p.ex., “Coevolutionary Amazon Health & Sanitation”, ou “C.A.S.H. Paradox, visando a Infraestrutura Hídrica Verde/ Azul/Cinza até 2035 (ca. R\$ 190 bilhões), a ser discutida no 2023 IUGG Berlin, o “Brazil’s Offset of Net-Zero Emissions toward GOals for Leveraging Development”-“BRONZE-2-GOLD”, onde será apresentada uma nova matriz de cogeração de energias renováveis e de propósitos múltiplos dos mais de 22000 reservatórios de água doce no Território Nacional, com um total de 6,1 x 107 km3 de armazenamento, e a iniciativa de “Recycling Water Assets for Sustainable Habitats”, ReWASH, viável de adaptação nas >40000 áreas de risco de desastres no Território Nacional.

4- Novos Projetos Pilotos Demonstrativos, destacando a natureza interdisciplinar do INCT-MC2, p.ex., o “FAPESP-NSFChina Sustainable Development International Cooperation \*\* Flash Droughts Under Climate Change, o FACEPE-FAPESP \*\* Global change, sustainable development with WEF viability e a proposta 2023-2032 da IAHS New Scientific Decade (\*\*: sem BC FAPESP).

5- Gestão de Dados FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), com o uso cooperado pelo INCT-MC2 de vários conjuntos de dados sobre resiliência de gestão de riscos disponibilizados por IAHS Panta Rhei benchmark dataset with socio-hydrological data of paired events of floods and droughts, o UNESCO-IHP-IX Operational Plan (2022-2029), o IWA ‘Earth Observation for water management’ Community of Practice, e as bases de dados em Território Nacional disponibilizados por PNSH/ANASB, CAMELS’BR e CABRA.

6- Novos Centros para E-Learning e Cursos de Adaptação às Mudanças Climáticas no Brasil, via parcerias de C&T estabelecidas pelo INCT-MC2 para o 2023 UN Water Conference, com apoio da ABRHidro-Comissão Técnica de Educação e Cátedra UNESCO e o UN Global Water Data Portal.





Figura 46 – Parceiros internacionais do INCT-MC2

# Conclusões e recomendações

Este relatório abrange o período de 2020-2023 do INCT -MC2 representando uma contribuição valiosa e importante para a compreensão do conhecimento sobre ciência, tecnologia e educação sobre mudanças climáticas e seu impacto na população e nos principais setores da economia brasileira e meio ambiente. Este projeto baseia-se no reconhecimento da necessidade de aprofundar nossa compreensão dos desafios atuais e os que estão por vir nas mudanças e impactos ambientais globais no Brasil. Essa avaliação é um exercício construtivo e contribui com todos os setores que possam ser potencialmente afetados pelas mudanças climáticas.

O Brasil precisa avançar em seus conhecimentos sobre os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar, hídrica, energética e da saúde, ecossistemas, desenvolvimento urbano e redução de risco de desastres. O país também precisa desenvolver conhecimento em ciência e tecnologia para avaliações integradas dos impactos econômicos das mudanças climáticas, sobre as formas de comunicação desses conhecimentos e impactos para a população e os tomadores

de decisão e para desenvolver vários níveis de modelagem ambiental. O INCT-MC2 visa atingir as metas de desenvolvimento sustentável e redução da pobreza e da fome, melhorando assim a qualidade da vida rural e da saúde humana e facilitando o desenvolvimento equitativo de maneira social, econômica e ambientalmente sustentável.

Até o momento, o CNPq prorrogou a sua contribuição para os INCTs até 2025, em geral, e estamos solicitando similar apoio à Fapesp para poder cumprir com os objetivos da agenda inicial e desenvolver sínteses dos resultados. Por exemplo, um dos temas que merecem destaque no INCT-MC2 é o risco climático, que pode levar a risco de desastres. Estudos conduzidos no escopo do INCT-MC2, sediado no Cemaden/MCTI, permitiram identificar que as áreas de risco de desastres observadas no presente podem no futuro ser impactadas por chuvas mais intensas, onde o risco climático também será maior. Logo, se ações não forem adotadas para reduzir a vulnerabilidade e exposição das populações e moradias, o risco de desastres pode aumentar, colocando contingentes maiores de populações e infraestruturas em risco.

# O INCT-MC2 2020-2023 em números

## O INCT-MC2 EM NÚMEROS

### FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

	Em andamento e concluídos
Mestrados	118
Doutorados	116
Pós-doutorados	48
Iniciações Científicas	45
Bolsas de Nível Técnico (TT, DTI)	28
Bolsas PV	3

### Produção científica

#### PUBLICAÇÕES

Artigos científicos em revistas internacionais com avaliação por pares	301
Artigos científicos em revistas brasileiras com avaliação por pares	73
Capítulo de livros	54
Livros	10
Produtos técnicos (Relatórios, web sites, bases de dados)	78

#### ATIVIDADES DE EXTENSÃO

Cursos de curta duração	30
Eventos (workshops, seminários etc...)	103
Reportagem e entrevistas sobre mudanças climáticas (2020-2023)	125



**INCTMC2**  
INCT para Mudanças  
Climáticas - Fase 2



**inct**  
institutos nacionais  
de ciência e tecnologia



**Cemaden**  
Centro Nacional de Monitoramento  
e Alertas de Desastres Naturais

MINISTÉRIO DA  
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO**

**GOVERNO FEDERAL**  
**BRASIL**  
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO