

Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil

$$)/4 = \text{Vuln}_{\text{fis, Amb}}$$

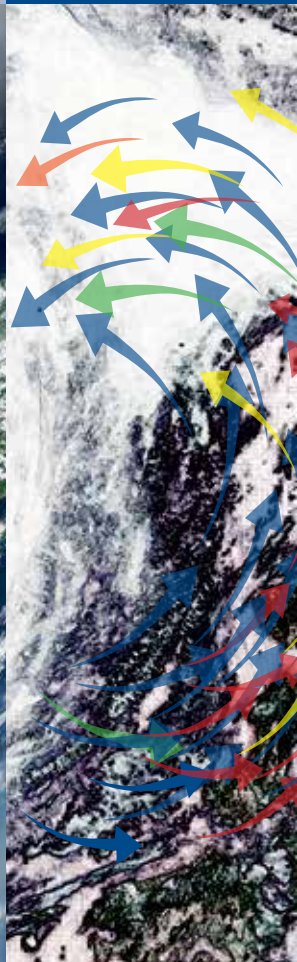
$$\cdot 100$$

$$y + 1.30 * \text{CWD} + 1.0 * \text{R95p} + 0.40 * \text{Rx1 Day})/4 = \text{Vuln}_{\text{clim}}$$

$$, 6108 \cdot \exp \left(\frac{17,27 \cdot / \text{TP2M}}{\text{TP2M} + 237,3} \right)$$

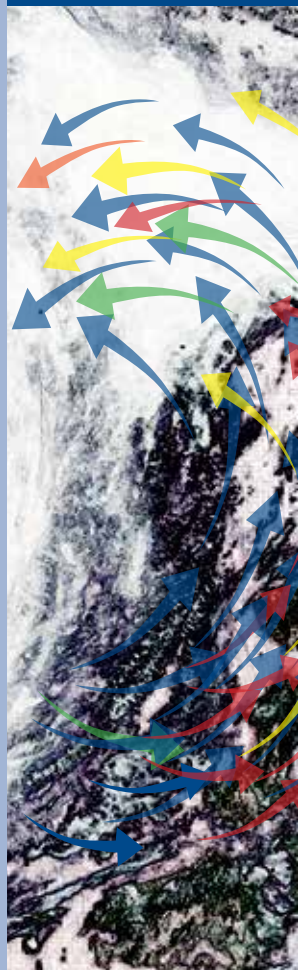
$$\frac{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)}{\lambda \cdot \rho_w} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w}$$

$$\exp \left(\frac{17,27 \cdot / \text{DP2M}}{\text{DP2M} + 237,3} \right)$$



Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à **Mudança do Clima** no Brasil

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Brasília



2016

Governo Federal

PRESIDENTE DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

DILMA VANA ROUSSEF

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

CELSON PANSERA

SECRETÁRIA EXECUTIVA

EMÍLIA MARIA SILVA RIBEIRO CURI

SECRETÁRIO DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

JAILSON BITTENCOURT DE ANDRADE

COORDENADOR-GERAL DE MUDANÇAS GLOBAIS DE CLIMA

MÁRCIO ROJAS DA CRUZ

Equipe técnica do MCTI

DIRETOR DA TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

MÁRCIO ROJAS DA CRUZ

COORDENADORA DA TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

MARCELA CRISTINA ROSAS ABOIM RAPOSO

SUPERVISOR TÉCNICO DA TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

BRENO SIMONINI TEIXEIRA

COORDENADOR TÉCNICO DOS ESTUDOS DE MODELAGEM CLIMÁTICA E DE VULNERABILIDADES E ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA EM SETORES-CHAVE

JOSE ANTONIO MARENGO ORSINI

CONSULTORA TÉCNICA DA TERCEIRA COMUNICAÇÃO NACIONAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

GISELLE PARNO GUIMARÃES

Equipe técnica da Rede CLIMA

SUB-REDE AGRICULTURA

ALAN MASSARU NAKAI, ARYEVERTON FORTES DE OLIVEIRA, EDUARDO DELGADO ASSAD, EDUARDO PAVÃO, JOSÉ EDUARDO MONTEIRO

SUB-REDE BIODIVERSIDADE E ECOSSISTEMAS

ANA LUISA MANGABEIRA ALBERNAZ, GEIZIANE TESSAROLO, MARINA ZANIN, NATHÁLIA MACHADO

SUB-REDE CIDADES E URBANIZAÇÃO

DENISE DE SOUSA; VIVIEN GREEN, DIANA PINHEIRO MARINHO, FELIPE DE CARVALHO VOMMARO MARINCOLA, FREDERICO DE OLIVEIRA TOSTA, GIOVANNINI LUIGI, HELIANA VILELA DE OLIVEIRA SILVA, MARTHA MACEDO DE LIMA BARATA, ULISSES EUGÊNIO CAVALCANTI CONFALONIERI

SUB-REDE DESASTRES NATURAIS

NATHAN S. DEBORTOLI, PEDRO IVO M. CAMARINHA, REGINA R. RODRIGUES

SUB-REDE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANTONIO CARLOS DA SILVA OSCAR JUNIOR, RENATA DA COSTA BARRETO, VERA JANE RUFFATO PEREIRA FERREIRA, WANDERSON LUIZ SILVA

SUB-REDE MODELAGEM CLIMÁTICA

ADAN SILVA, ANDRÉ LYRA, CAROLINE MOURÃO, CLAUDINE DEREZYNSKI, DANIELA RODRIGUES, DIEGO CAMPO, DIEGO CHAGAS, EMANUEL GIAROLLA, GILVAN SAMPAIO, GRACIELLE SIQUEIRA, GUSTAVO

SUEIRO, ISABEL PILOTTO, JORGE GOMES, JOSÉ FERNANDO PESQUERO, JOSÉ PAULO BONATTI, JOSIANE BUSTAMANTE, MANOEL BAPTISTA JR., MANOEL CARDOSO, MARCUS JORGE BOTTINO, PAULO KUBOTA, PAULO NOBRE, PRISCILA TAVARES, SILVIO NILO FIGUEROA, SIN CHAN CHOU, VINÍCIUS CAPISTRANO

SUB-REDE RECURSOS HÍDRICOS

ADRIANO ROLIM DA PAZ, ALFREDO RIBEIRO NETO, EDILSON RAIMUNDO DA SILVA

SUB-REDE SAÚDE

ALEXANDRE S.P. SIQUEIRA, ANDREIA OLIVEIRA, CHRISTOVAM BARCELLOS, DUARTE COSTA, KAREN S. GONÇALVES, SAMYA DE L. PINHEIRO, SANDRA DE SOUZA HACON

Editores

BRENO SIMONINI TEIXEIRA

JOSE ANTONIO MARENGO ORSINI

MÁRCIO ROJAS DA CRUZ

Revisora Técnica

GISELLE PARNO GUIMARÃES

Fotos da capa e das aberturas de capítulos

NASA (capa), Big Foto (p. 32, 92, 126, 320 e 510), Free-Pictures-Photos (p. 7, 48 e 188), Pictures Newsletter (p. 242), Stockvault (p. 386)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
ESPLANADA DOS MINISTÉRIOS, BLOCO E
TELEFONE 55 (61) 2033-7923
PÁGINA ELETRÔNICA: <<http://www.mcti.gov.br>>
CEP 70067-900 Brasília DF

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca de Política em C&T do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

B823m Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais à mudança do clima no Brasil / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.
590p. il.
ISBN: 978-85-88063-30-3
1. Mudanças climáticas. 2. Modelagem climática. I. Título.

CDU 551.58

Sumário

Prefácio	21
Capítulo 1: Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) para cenários de mudanças climáticas globais	33
1 Introdução.....	35
2 O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre	36
3 Resultados	39
4 Conclusões	45
Referências.....	45
Capítulo 2: Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul	49
1 Introdução.....	51
1.1 Objetivos.....	53
2 Metodologia	53
2.1 Modelo Eta.....	53
2.2 Modelos globais	54
2.2.1 Modelo HadGEM2-ES	54
2.2.2 Modelo MIROC5	55
2.3 Cenários de emissões	56
2.4 Preparação das simulações.....	57
3 Simulações do clima presente.....	57

3.1 Temperatura do ar	58
3.2 Precipitação	62
3.3 Circulação em baixos níveis	66
4 Simulações do clima futuro	68
4.1 Temperatura do ar	69
4.1.1 Médias sazonais.....	69
4.1.2 Distribuição de frequência.....	74
4.2 Precipitação	76
4.2.1 Médias sazonais.....	76
4.2.2 Distribuição de frequência.....	82
5 Considerações finais	84
Referências.....	85

Capítulo 3: Mudanças climáticas e a cobertura vegetal nativa: impactos

em um país megadiverso e seus biomas	93
1 Introdução.....	95
2 Métodos.....	97
2.1 Área de estudo e processamento dos dados.....	97
2.2 Avaliação de similaridade climática entre categorias de cobertura do solo	100
2.3 Modelagem da distribuição geográfica	102
3 Resultados e discussão.....	105
3.1 Agrupamentos das categorias de cobertura do solo e seleção das variáveis climáticas	105
3.2 Seleção do modelo de distribuição e acurácia das predições.....	109
3.3 Mudanças nas coberturas nativas do solo mediadas por cenários climáticos futuros: o panorama nacional.....	111
3.4 Os biomas brasileiros e as ameaças da mudança no clima	115
4 Considerações finais	121
Referências.....	122

Capítulo 4: Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira

às mudanças climáticas	127
1 Introdução.....	129
2 Metodologia	130
3 Preparação do simulador e obtenção dos resultados	132
3.1 Incorporação dos dados do modelo regional Eta inicializado com o modelo global do CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5, no simulador para agricultura SCenAgri da Embrapa	133
3.1.1 Testes, projeções climáticas e calibrações do modelo.....	133
4 Evolução dos extremos de temperatura (Tmax e Tmin) em localidades do Brasil	142
5 Mapeamento da ocorrência de extremos de temperatura nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5	150
6 Mapeamento da climatologia das temperaturas e chuva para os períodos indicados	152
7 Impactos na agricultura: definição dos conjuntos de parâmetros de cada uma das culturas a serem simuladas	161
7.1 O Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) do Método de Zoneamento Agroclimático	162
7.2 Classificação do solo e o Mapa de Zoneamento Agrícola	163
7.3 Identificação das áreas de cultivo menos vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas	163
7.4 Simulação dos impactos para as culturas de soja, milho, milho safrinha, feijão e trigo para os períodos de 2025, 2055 e 2085, tendo como ano-base 1990, cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....	166
1º caso – Arroz.....	167
2º caso – Milho safrinha.....	169
3º caso – Milho safra de verão (safra 1).....	172
4º caso – Soja	174
5º caso – Feijão	177
6º caso – Feijão segunda safra	179
7º caso – Trigo	182

8 Principais conclusões.....	184
Referências.....	186
Capítulo 5: Impactos e vulnerabilidade do setor de recursos hídricos no Brasil às mudanças climáticas	189
1 Introdução.....	191
2 Metodologia	193
2.1 Área de estudo e dados utilizados	193
2.1.1 Definição da área de estudo	193
2.1.2 Solo, vegetação e relevo.....	195
2.1.3 Variáveis do modelo climático.....	195
2.1.4 Dados observados.....	197
2.1.5 Avaliação e correção de tendenciosidade da precipitação	197
2.2 Modelo hidrológico.....	199
2.3 Indicadores de vulnerabilidade	201
3 Resultados	202
3.1 Precipitação e temperatura do ar por região.....	202
3.2 Modelagem hidrológica	205
3.2.1 Pré-processamento dos dados de entrada do modelo hidrológico.....	206
3.2.2 Validação do modelo hidrológico.....	211
3.3 Avaliação de impactos sobre os recursos hídricos	212
3.3.1 Escoamento anual médio	213
3.3.2 Vazão de estiagem	216
3.3.3 Eventos extremos de cheias	220
3.3.4 Evapotranspiração e umidade do solo	222
4 Considerações finais	226
Referências	228
Indicadores de impacto	232

Capítulo 6: Vulnerabilidade do setor de energias renováveis no Brasil

às mudanças climáticas	243
1 Introdução.....	245
2 Metodologia	247
2.1 Energia hidrelétrica	247
2.2 Energia eólica	251
2.3 Energia solar	254
2.4 Biocombustíveis (bioetanol).....	257
2.5 Pressupostos da análise estatística	260
2.5.1 Pressupostos do mapeamento.....	262
3 Resultados e discussão	264
3.1 Energia Hidrelétrica.....	264
3.1.1 Bacia do Rio Amazonas	267
3.1.2 Bacia do Atlântico Norte e Nordeste.....	269
3.1.3 Bacia do Tocantins Araguaia.....	271
3.1.4 Bacia do Rio São Francisco	273
3.1.5 Bacia do Atlântico Leste	275
3.1.6 Bacia do Rio Paraná e do Rio Paraguai	277
3.1.7 Bacia do Atlântico Sul e Sudeste	279
3.1.8 Bacia do Rio Uruguai	281
3.2 Energia eólica	283
3.3 Energia solar	291
3.4 Biocombustíveis (bioetanol).....	297
3.4.1 Girassol.....	307
3.4.2 Mamona.....	309
3.4.3 Soja	312
3.4.4 Cana-de-açúcar	314
Referências.....	316

Capítulo 7: Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais no Brasil,

no contexto de mudanças climáticas	321
1 Introdução.....	323

1.1	Eventos extremos e desastres naturais	323
1.2	Os desastres naturais no Brasil	324
1.2.1	Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos.....	327
1.2.2	Movimentos de massa – Deslizamentos de terra.....	328
1.3	Eventos extremos e as mudanças climáticas.....	329
2	Objetivo e importância do estudo	334
3	Metodologia de base para ambas análises	336
3.1	Hierarquização das variáveis.....	337
3.2	Dimensão climática da vulnerabilidade	340
3.3	Dimensão físico-ambiental da vulnerabilidade	345
3.3.1	Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos.....	346
3.3.2	Movimentos de massa	348
3.3.2.1	Declividade	348
3.3.2.2	Mapa de relevo	350
3.4	Dimensão socioeconômica da vulnerabilidade	352
3.5	Validação e calibração do Índice de Vulnerabilidade aos Desastres de Inundações Bruscas, Enxurradas e Alagamentos (1961–1990)	356
3.6	Validação do Índice de Vulnerabilidade para os Desastres de Movimentos de Massa (1961–1990)	360
4	Resultados dos índices de vulnerabilidade para o futuro	366
4.1	Índice de Vulnerabilidade para Inundações Bruscas, Enxurradas e Alagamentos	366
4.2	Índice de Vulnerabilidade – Movimentos de massa	372
5	Considerações finais	378
	Referências.....	381

Capítulo 8: Vulnerabilidade, riscos e impactos das mudanças climáticas

	sobre a saúde no Brasil	387
1	Introdução.....	389
2	Metodologia	393
2.1	Municipalização das projeções climáticas	394

2.2 Mapeamento de índices de vulnerabilidades socioeconômicas e da saúde da população brasileira	395
2.3 Impactos das mudanças climáticas na saúde humana	399
2.3.1 Risco climático associado a ondas de calor	400
2.3.2 Ondas de calor e mortalidade geral	401
2.3.3 Impacto das projeções de temperatura na diarreia infantil no Brasil	402
3 Resultados dos impactos das projeções climáticas para a saúde do Brasil	404
3.1 Municipalização das projeções climáticas	404
3.1.1 Resultados descritivos da síntese dos cenários climáticos	405
3.1.1.1 Cenário futuro RCP 8.5 – Cenário pessimista.....	408
3.2 Mapeamento de índices de vulnerabilidades socioeconômica e da saúde da população brasileira	410
3.2.1 Indicadores socioeconômicos e de acesso a serviços de saúde	410
3.2.2 Análise de componentes principais.....	410
3.2.3 Mapas de vulnerabilidade.....	415
3.3 Impactos das mudanças climáticas na saúde humana	421
3.3.1 Mapeamento do risco climático associado a ondas de calor	422
3.3.2 Ondas de calor e mortalidade geral	431
3.3.3 Impacto da temperatura na diarreia infantil	440
4 Discussão	444
4.1 Exposição climática.....	445
4.2 Análise dos indicadores de vulnerabilidade	447
4.3 Risco climático	448
4.4 Impacto na mortalidade geral por ondas de calor	451
4.5 Diarreia	452
5 Conclusão	454
Referências	455

Capítulo 9: Índice de vulnerabilidade às mudanças do clima nos municípios do estado do Rio de Janeiro	461
1 Introdução.....	463

2	Concepção metodológica e região de estudo.....	465
3	Índice de Vulnerabilidade da Saúde (IVS)	468
4	Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo).....	472
5	Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAm).....	476
5.1	Indicador de Cobertura Vegetal (ICV).....	478
5.2	Indicador de Conservação da Biodiversidade (ICB).....	478
5.3	Indicador de Linha de Costa (ILC)	479
5.4	Indicador de Eventos Hidrometeorológicos Extremos com Vítimas Fatais (IEE)	479
5.5	Padronização do Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAm)	480
6	Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG).....	483
7	Índice de Cenários Climáticos (ICC)	486
8	Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM).....	500
9	Considerações finais	504
	Referências.....	506

Capítulo 10: Avaliação de estudos de vulnerabilidade e adaptação à mudança do clima nas cidades brasileiras

1	Introdução.....	513
2	Metodologia de avaliação de estudos de CCIAV no Brasil.....	515
2.1	Referencial teórico e proposta metodológica	515
2.2	Descrição dos estudos	531
3	Resultados	533
3.1	Concepção metodológica	533
3.2	Processos	540
3.3	Entrada	544
3.4	Saída	546
3.5	Resultados e conclusões dos Impactos, adaptação e vulnerabilidade de mudanças.....	551
3.5.1	Avaliação de vulnerabilidade ambiental e socioeconômica para o município de Curitiba.....	552

3.5.2 Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean Cities – Complete Report: Santos, Brazil	556
3.5.3 Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais	561
3.5.4 Estudo Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças – Região Metropolitana de São Paulo.....	565
3.5.5 Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente	569
3.5.6 Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia (Relatório Final – Contrato de Serviços Técnicos de Consultoria nº 1/2012).....	575
4 Discussão	581
Referências	589



Prefácio

Com o desenrolar da história humana, a tecnociência, nascida para habilitar seus criadores a sanar necessidades, foi aos poucos passando a ocupar papel de destaque em nossa civilização, impulsionada pela crença de que sempre há algo para ser melhorado e de que a nossa vocação é encontrar os meios que nos permitam alcançar o conhecimento e o instrumental prático para tal missão. Inicialmente focadas na resolução de problemas que tornavam o nicho humano hostil, comprometendo a sobrevivência da nossa espécie, a ciência e a tecnologia – graças ao êxito alcançado – passaram gradativamente a (poder) investir em tornar o nicho humano confortável. Hodiernamente, excessos voltaram a colocar em risco a hospitalidade do nicho humano, a tal ponto que surgem cada vez mais acadêmicos dedicados aos estudos dos “riscos existenciais”. Preocupam-lhes as evidências de que a natureza deixou de ser a origem das principais ameaças para a existência humana sustentável. Nas últimas décadas, o próprio homem passou a ser considerado a maior ameaça em potencial para a permanência da existência humana, estando a mudança climática global no centro dessa reflexão.

Sabe-se hoje que atividades antrópicas iniciadas por volta do ano 1750 – em particular a queima de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra, com expansão da agropecuária – têm aumentado consideravelmente as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera do nosso planeta. Dia a dia, diminui a incerteza de que, à variabilidade natural do sistema climático terrestre, deve-se somar tal interferência (direta e indireta) de atividades humanas como causa da mudança do clima.

É digno de nota que, especificamente sobre essa interferência antrópica no meio ambiente, observa-se uma dissociação temporal e espacial entre causa e efeito, que é refletida também em uma dissociação entre custos e benefícios particularmente complicadora para a gestão tecnocientífica e, por conseguinte, também para a reflexão moral. A dispersão espacial dá-se pelo fato de emissões de gases de efeito estufa em determinados países com economia altamente intensa em carbono provocar alterações climáticas em países do outro lado do planeta, que pouco ou nada contribuíram para tanto. A dispersão temporal, por sua vez, é observada pelo fato de emissões de gases de efeito estufa ocorridas no presente comprometer a segurança climática das gerações futuras.

Nesse cenário, a Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima, mais conhecida como Convenção do Clima, pela sigla UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), foi concebida para reunir países em um esforço conjunto de modo a estabilizar as concentrações de gases de efeito de estufa em níveis que não impliquem alterações climáticas temerosas. Esse acordo teve o Brasil como o primeiro signatário, em 1992, e, para atingir seus desígnios, define uma série de conceitos, princípios e obrigações em seus instrumentos normativos. Entre as obrigações assumidas como país-membro, o Brasil se compromete a publicar, periodicamente, sua Comunicação Nacional, que deve conter, além do Inventário de Gases de Efeito Estufa, informações que contextualizam a implementação da Convenção à realidade nacional.

A recém-apresentada Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção do Clima (TCN) inicia com um panorama geral dos principais aspectos socioeconômicos, compila a evolução da produção do conhecimento científico, aborda arranjos institucionais, detalha iniciativas em mitigação e adaptação (contemplando os planos setoriais) e atualiza o inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, o levantamento de dados e informações e o desenvolvimento de estudos que subsidiaram a TCN permitiram, além do atendimento dos preceitos da Convenção, a geração de externalidades que o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) busca concretizar por meio de iniciativas como a publicação deste livro. Trata-se, portanto, do reconhecimento dos esforços de mobilização e da qualidade dos estudos elaborados por amplo grupo

de pesquisadores na busca pelo aprofundamento técnico-científico sobre impactos, riscos e vulnerabilidades relacionados à mudança do clima no Brasil.

Ciente da constante evolução de nossos centros de pesquisa e da potencial produção de conhecimento adicional, o MCTI, por meio de sua Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima (CGMC), consolidou aproximação com a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais, a Rede CLIMA, e reeditou, junto à sua Sub-rede de Modelagem Climática, parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas aos Desastres Naturais (Cemaden), bem sucedida nas edições anteriores da Comunicação Nacional.

Instituída pelo então Ministério da Ciência e Tecnologia, em sua Portaria nº 728, de 20 novembro de 2007, e alterada pelas portarias nº 262, de 2 de maio de 2011, e nº 1.295, de 16 de dezembro de 2013, a Rede CLIMA é formada por centenas de renomados centros nacionais de pesquisa e tem como missão gerar e disseminar conhecimentos para que o Brasil possa responder aos desafios representados pelas causas e efeitos da mudança climática global. Constitui-se, assim, em fundamental pilar de apoio às atividades de pesquisa e desenvolvimento, além de ensejar o estabelecimento e a consolidação da comunidade científica e tecnológica preparada para atender plenamente às necessidades nacionais de conhecimento, incluindo a produção de informações para formulação e acompanhamento das políticas públicas sobre mudança do clima.

Para a elaboração dos estudos de vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil, o INPE, vinculado ao MCTI, incumbiu-se de coordenar os trabalhos de modelagem regional do clima e de elaboração de cenários futuros da mudança do clima. Junto ao Cemaden, também vinculado a este Ministério, o Instituto, posteriormente, coordenou a relação entre os estudos de vulnerabilidade e adaptação a setores estratégicos vulneráveis aos impactos associados à mudança do clima no Brasil. Os dados dessas simulações permitiram gerar relatórios inéditos de cenários climáticos que respaldaram os estudos sobre vulnerabilidade apresentados na TCN.

As projeções dos cenários da mudança do clima para o século XXI foram derivadas dos vários modelos do clima global utilizados pelo Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), que analisa os impactos futuros tendo como base diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa até 2100. Em 2000, o IPCC publicou um volume especial, o *Special Report Emission Scenarios* (SRES)¹, apresentando quatro principais cenários de emissão com projeções futuras para a mudanças climáticas: A1 e A2 (altas emissões de gases de efeito estufa – GEE); B1 e B2 (baixas emissões de GEE). Mais recentemente, no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (*Fifth Assessment Report – AR5, 2014*)², foram desenvolvidos cenários climáticos e socioeconômicos representativos de tendências, os *Representative Concentration Pathways* (RCPs), considerando: RCP 8.5 (altas emissões); RCP 6.0 (emissões intermediárias); RCP4.5 (emissões intermediárias-baixas); e RCP 2.6 (baixas emissões). O cenário RCP 8.5 equivale ao SRES A2 e o RCP 4.5, ao B1, enquanto RCP 6.0 situa-se entre o B1 e o B2. Nenhum cenário SRES resulta em forçantes tão baixas quanto o RCP 2.6.

Os impactos mais severos projetados ocorreriam apenas em um cenário de longo prazo (2100) em que as emissões de GEE não tenham sido mitigadas, em especial no caso de um aumento significativo da população e do crescimento econômico mundial com o uso intensivo de combustíveis fósseis. Para os estudos apresentados neste livro, foram selecionados os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Cabe salientar que projeções de clima futuro apresentam incertezas inerentes a todo uso de modelos que, se, por um lado, recomendam prudência com relação a interpretações de dados e informações, por outro, compõem, com outros elementos, a gama de fatores a impelir os pesquisadores em sua incessante busca pelo aperfeiçoamento de seu instrumental técnico-científico. A título de exemplo, o fato de modelos globais do clima fazerem uso de diferentes representações físicas de processos, em uma grade de resolução relativamente baixa, introduz-se certo grau de incerteza nesses cenários futuros da mudança do clima e, conseqüentemente, na avaliação da vulnerabilidade e dos impactos dela decorrentes.

¹ Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/emissions_scenarios.pdf>.

² Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>.

A reduzida grade de resolução dos modelos globais implica a necessidade de métodos de *downscaling* que possam ser aplicados aos cenários da mudança do clima a partir dos modelos globais, a fim de que se obtenham projeções mais detalhadas para estados, vales ou regiões, com uma resolução espacial mais alta do que a fornecida por um modelo global do clima. Isso é de grande utilidade particularmente para os estudos dos impactos da mudança do clima na gestão e na operação dos recursos hídricos, nos ecossistemas naturais, nas atividades agrícolas e até mesmo na saúde. É digno de nota que a atividade de *downscaling* (ou regionalização) apoiada pelo MCTI para subsidiar os estudos da TCN contou com reforço da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, por meio da execução do Projeto 20°40°.

Para a TCN, o INPE avaliou os diferentes cenários de mudança do clima propostos pelos modelos globais do AR5 do IPCC e aplicou o método de *downscaling* dinâmico para o Brasil. Esse método consiste na redução de escala das projeções de mudanças climáticas provenientes de modelos climáticos globais para se obter projeções climáticas mais detalhadas, isto é, com uma melhor resolução espacial, e adequada para vales, bacias e regiões de litoral. O melhor detalhamento é obtido alimentando modelos regionais atmosféricos com as projeções dos modelos globais climáticos. Essas projeções detalhadas são mais adequadas para estudos dos impactos da mudança do clima em diversos setores socioeconômicos (agrícola, energético, saúde, recursos hídricos etc.), indicando a vulnerabilidade aos riscos na forma de probabilidade, uma vez que a vulnerabilidade é geralmente relacionada com problema em escalas locais.

O processo de *downscaling* dinâmico – por meio do modelo regional Eta, desenvolvido pelo INPE – resultou em cenários em versão de estudos de mudanças climáticas para a América do Sul. Esse modelo atmosférico regional vem sendo utilizado pelo INPE, desde 1996, para produzir operacionalmente previsões do tempo. O modelo foi adaptado a fim de ser utilizado como um modelo climático, gerando previsões sazonais desde 2002 e, em seguida, foi aprimorado para estudos de mudanças climáticas. O modelo é executado em supercomputadores, dada a necessidade de processamento em tempo útil. Para o presente estudo, o modelo foi rodado no supercomputador Cray® XE6™ do INPE, com capacidade

de utilizar modelos numéricos para a simulação de tempo e clima (258 trilhões de operações aritméticas por ponto flutuante por segundo).

O modelo Eta encontra-se em contínuo desenvolvimento. Os aperfeiçoamentos planejados para essa versão de mudanças climáticas do modelo Eta incluem, *inter alia*, a vegetação dinâmica e mudanças do uso da terra, acoplamento com modelo oceânico, substituição do esquema de radiação considerando aerossóis e reações químicas da atmosfera. Desse modo, evidencia-se a importância do desenvolvimento de capacidade de modelagem climática no Brasil, por meio da análise de modelos globais e regionais para cenários atuais e futuros da mudança do clima. Cabe ressaltar, ainda, que as projeções climáticas regionais geradas para a Segunda e Terceira comunicações foram disponibilizadas para grupos no país e em outros países da América Latina, de modo que os estudos de mudanças climáticas e de impactos a elas relacionados possam ser desenvolvidos em centros nacionais por especialistas de cada país.

Com os resultados desse esforço de regionalização dos cenários futuros de mudança do clima e da realização de estudos de vulnerabilidade, espera-se que o país esteja cada vez mais bem capacitado para identificar regiões e setores mais vulneráveis com maior grau de confiabilidade do que aquele oferecido pelos modelos globais. Nesse sentido, o desenvolvimento do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (*Brazilian Earth System Model – BESM*), apresentado após este capítulo introdutório, vai ao encontro dessa capacitação. O BESM se encontra em elaboração pelo INPE em cooperação com pesquisadores de várias instituições de pesquisa e ensino no Brasil e no exterior. Já servindo para gerar os cenários climáticos globais para as próximas décadas, esse modelo possibilitou participação pioneira do Brasil na geração de cenários globais de mudanças climáticas para o AR5 do IPCC.

A mobilização realizada para tornar a elaboração destes estudos setoriais possível consistiu no esforço de aproximação de instituições renomadas para a abordagem de setores particularmente afetados pelas alterações do clima. Este trabalho de cooperação, analogamente, gerou externalidades mesmo antes da apresentação dos achados científicos em si e, provavelmente, tão importantes quanto eles, na medida em que permitiu, por exemplo, a aproximação da pesquisa básica à aplicada, ao fornecer subsídios metodológicos críticos à preparação do Plano Nacional

de Adaptação, co-coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e pelo MCTI. Esta publicação, portanto, consiste em coletânea de estudos científicos elaborados por pesquisadores de diversas instituições nacionais de pesquisa com nível de excelência em modelagem climática e análise setorial de cenários de emissão de gases de efeito estufa. O conhecimento atual das dimensões regionais da mudança global do clima no Brasil é ainda muito fragmentado, o que requer a continuidade dos esforços para que, no futuro, possam ser elaborados projetos de adaptação específicos com o embasamento científico aprimorado, possibilitando incremento de eficiência da aplicação de recursos públicos.

Conforme já mencionado, a geração de novos cenários climáticos futuros para esses estudos de impactos das mudanças de clima e dos seus efeitos setoriais tem uma importante componente de desenvolvimento de modelos climáticos. Todas as avaliações de impactos setoriais das mudanças climáticas apresentados neste livro fizeram uso dos cenários gerados pelo *downscaling* dos modelos globais japonês MIROC5 e inglês HadGEM2 ES utilizando uma versão aprimorada do modelo regional Eta, com resolução espacial de 20 km lat-lon, avaliando as simulações do clima presente e analisando suas projeções até o final do século XXI. Essas simulações foram geradas para subsidiar os estudos de vulnerabilidade em escala regional. Como referência, foram usados os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 até 2100 para rodar os modelos de impactos considerados em cada capítulo setorial.

Em relação aos impactos da mudança do clima nos biomas brasileiros, foi observado que as alterações no clima futuro podem levar à retração do nicho climático das formações florestais e à expansão das vegetações abertas, de modo que essas alterações atingirão diferentemente os biomas brasileiros. Os biomas Caatinga e Cerrado apresentam maior estabilidade climática e, conseqüentemente, na distribuição da cobertura nativa do solo, podem ser considerados como os menos vulneráveis. A Amazônia é o bioma mais ameaçado pela mudança no clima, pois é predita extensa retração do nicho climático das coberturas nativas do solo, especialmente na região oriental.

No setor agricultura, tal como observado nas últimas décadas, preocupa a projeção de forte tendência de aumento de frequência de dias com temperaturas superiores a 34°C nos próximos anos. Os possíveis impactos desses eventos extremos são abortamento de flores de café e feijão, morte em frangos, abortamentos em

porcas e redução da produção de leite. Uma das soluções para os efeitos na produção vegetal é a busca por cultivares tolerantes às altas temperaturas e, consequentemente, ao déficit hídrico. No caso dos animais, deve-se buscar ampliar cada vez mais os estudos sobre ambiência animal. Os impactos na produção vegetal, caso não se busquem soluções de manejo e adaptação, podem atingir mais de 90% de redução na produção de milho safrinha e 80% na produção de soja. Diversos caminhos de adaptação e de busca por novos sistemas de produção estão sendo testados para reduzir os impactos estimados nos cenários estudados.

O setor recursos hídricos evidencia os impactos da mudança do clima na forma de anomalias do escoamento nas regiões hidrográficas, projetando uma redução da disponibilidade hídrica em praticamente todo o território do Brasil. As maiores reduções em termos percentuais se apresentam nas regiões hidrográficas do rio Doce, do rio São Francisco e do Atlântico Leste. Regiões hidrográficas do Sul do país apresentaram aumento do escoamento, como nos casos do Atlântico Sul/SE, bacia do rio Uruguai e parte da bacia do rio Paraná. A análise de mudanças nos eventos de cheias mostrou significativa intensificação em regiões populosas como Sudeste, rio Uruguai e rio Paraná.

A vulnerabilidade à mudança climática identificada no setor de energias renováveis, consistente com as mudanças na disponibilidade hídrica, indica tendência de redução do potencial de produção de energia hidrelétrica nas bacias ao norte e na região central do país bem como aumento desse potencial nas bacias ao sul do país. Em relação à energia eólica, projeta-se um aumento da velocidade total dos ventos, o que acarreta aumento do potencial de sua geração. Ressalte-se que, sem um grande salto na eficiência do custo-benefício para uso de energia eólica, esta fonte energética poderá ser considerada apenas como complementar à geração hidrelétrica. Observando-se as projeções futuras de radiação solar, verifica-se que os valores simulados até o final do século XXI são menores em comparação com o clima presente. Em média, tais reduções da intensidade de radiação variam entre 4 e 8% em todo o Brasil, valores estes considerados não significativos, uma vez que o país ainda se encontraria dentro de uma faixa satisfatória para a geração de energia oriunda da radiação solar.

Em relação à produção brasileira de biodiesel (girassol, mamona, soja e cana-de-açúcar), estima-se que, devido à mudança do clima, a oferta de área apta para

o cultivo de girassol sofrerá redução, sobretudo, nos estados de Mato Grosso e Goiás, significando uma redução de área apta de até 18% em 2100, além de queda na produtividade das demais, principalmente em função do estresse térmico ao qual estará suscetível o gênero. Para a produção de mamona, pouca alteração ocorrerá na área apta para o seu cultivo. A maior repercussão será na Bahia e em Pernambuco, que, em função da redução do teor de umidade no solo, poderá apresentar redução da produtividade desse gênero agrícola. No caso da cana-de-açúcar, em virtude do aumento contínuo da temperatura, a cultura atingirá um ótimo entre os recortes temporais de 2011 e 2070, podendo ampliar em cerca de 17 milhões de hectares a área propícia ao cultivo. Porém, a partir daí, as condições climáticas já não propiciarão condições tão confortáveis para o cultivo, demandando elevação paulatina por irrigação para suprir a carência hídrica, o que poderá provocar queda na área cultivada para até 13 milhões de hectares em função do significativo aumento da temperatura no Centro-Oeste brasileiro.

Existe relação entre a vulnerabilidade a desastres naturais e os possíveis efeitos da mudança do clima, uma vez o Brasil possui muitas localidades altamente vulneráveis aos desastres naturais hidrometeorológicos, considerados neste livro. Com relação às inundações bruscas, às enxurradas e aos alagamentos, as projeções de clima sugerem que as regiões que terão um maior acréscimo de vulnerabilidade são as Sul, Sudeste e grande parte do litoral brasileiro. Para as demais regiões do Brasil, há indicação de redução da vulnerabilidade aos desastres relacionados com inundações bruscas devido à queda dos índices de extremos de precipitação, fato este intimamente ligado à queda brusca da pluviosidade média anual e à elevação da temperatura média. Os movimentos de massa previstos para o futuro indicam que as regiões que mais merecem atenção devido ao aumento na vulnerabilidade são: a porção central de Santa Catarina e o Sudeste deste estado, na divisa com o Rio Grande do Sul; o leste do Paraná; o litoral norte de São Paulo e serra da Mantiqueira, principalmente a divisa com Minas Gerais; e ainda um pequeno trecho que engloba a região Serrana do Rio de Janeiro e seu litoral adjacente. Esses locais são caracterizados como cenários de desastres envolvendo movimentos de massa e há fortes indícios de que poderá haver intensificação da ocorrência destes desastres no futuro, uma vez que possuem um incremento positivo entre 5% e 15% segundo o modelo adotado. Uma grande parcela do estado do Pará e o oeste do Maranhão

também se enquadram nesse contexto, locais estes que recebem um incremento ainda maior de vulnerabilidade, chegando a 30% de acréscimo.

No setor de saúde, um aumento de 4°C na temperatura média global levaria algumas das regiões mais quentes do mundo (como o Brasil) a atingir o limiar de inabitabilidade humana de temperatura do bulbo úmido $T_w = 35^\circ\text{C}$ (considerando o limite biológico) durante parte ou a totalidade do ano. Segundo as projeções climáticas regionais geradas pelos modelos Eta-HadGEM2 ES e Eta-MIROC 5, o Brasil continuará a aquecer acima da média global, sobretudo, nas regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste. Essas projeções preveem aumentos acima de 4°C, mesmo no cenário RCP 4.5, para a região Centro-Oeste, ultrapassando os 8°C no final do século no cenário RCP 8.5. Isso pode levar a um aumento de até 6°C nos valores atuais de T_w ultrapassando, assim, os limiares humanos de aclimatização ao calor excessivo e alterando seriamente as condições de vida e de organização social dessas regiões brasileiras, o que representa sérios riscos à saúde pública e à economia do país. O quadro da diarreia pode ser agravado, com alterações climáticas adversas, caso não sejam tomadas medidas adaptativas para melhoria das condições de vulnerabilidade dos serviços de saneamento e acesso à atenção básica. A região Nordeste apresenta o maior incremento de mortes anuais para todo o período projetado de ondas de calor. Em relação aos estados da Federação, o Rio de Janeiro apresenta o maior impacto na mortalidade geral.

O capítulo 9 apresenta a vulnerabilidade da população dos municípios do estado do Rio de Janeiro em face do cenário de emissões RCP 8.5 segundo as projeções climáticas regionais geradas pelos Eta-MIROC 5. Os resultados são apresentados com base em indicadores parciais de saúde, socioeconômicos e ambientais, pelo fato de que muitos dos efeitos adversos das mudanças climáticas na saúde e no bem-estar da população decorrem, de forma indireta, pela mediação de processos ambientais e sociais. Analisados de forma integrada, tais indicadores contribuem para apoiar o desenvolvimento e a avaliação da efetividade na tomada de decisões, na definição de políticas públicas de adaptação e elaboração de programas educativos de sensibilização, no sentido de aumentar a resiliência da população.

O capítulo final apresenta os resultados de intensa revisão de literatura com foco em vulnerabilidade e adaptação em cidades, regiões metropolitanas e

estados no Brasil. Essa revisão identificou estudos de vulnerabilidade que buscaram compreender e apontar como a mudança do clima irá afetar tanto a questão física como econômica e social de cada região. Em Curitiba/PR e Santos/SP, observou-se que infraestrutura educacional e hospitalar se encontra em zonas de risco a inundações, inundações costeiras e ressacas e deslizamentos de terra. Para a cidade de Goiânia/GO, percebe-se a possível ocorrência de longas estiagens, aumento de temperaturas médias e redução na precipitação cumulativa, o que pode ocasionar um problema de abastecimento de água dado a menor captação nas principais bacias da cidade e a incêndios nas zonas rurais. Análises de vulnerabilidade no Rio de Janeiro, identificaram seis municípios de diferentes regiões como sendo os mais vulneráveis a alagamentos e deslizamentos: Parati, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Magé e Campos dos Goytacazes. No estudo Paulistano, aponta-se que os riscos de enchentes, inundações e de deslizamento de terra poderão aumentar em diferentes partes da região. Para 2030, os riscos de enchente e inundação aumentarão, proporcionalmente, de acordo com os valores que se tem em 2008 e também em relação ao crescimento da mancha urbana e mais de 20% da área total de expansão será suscetível e poderá ser afetada. Para o risco de deslizamento, cerca de 11% das áreas de expansão poderão se constituir em novas áreas de risco de deslizamentos. O estudo do estado de Minas Gerais aponta que as lavouras e florestas poderão ser negativamente afetadas em alguns cenários climáticos. Ademais, no que tange à saúde e em relação às doenças que estariam ligadas à mudança do clima de alguma forma – dengue, malária, febre amarela, tracoma e diarreia –, as regiões Norte, Noroeste e Jequitinhonha-Mucuri são as mais vulneráveis. Essa revisão da literatura permitiu que se evidenciasse a diversidade de impactos que as diferentes cidades de regiões do país podem enfrentar com as alterações climáticas.

A compilação destes estudos setoriais para a TCN evidenciou não só a robustez técnica dos trabalhos elaborados, mas, igualmente, a relevância dos resultados alcançados para os gestores e tomadores de decisão no âmbito de políticas públicas. Tal constatação motivou o MCTI a organizar a publicação que ora se apresenta, dedicando o devido espaço à exposição do relevante salto dado neste campo do conhecimento no Brasil.

Os editores



Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) para cenários de mudanças climáticas globais

Paulo Nobre

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Vinícius Capistrano

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Manoel Baptista Jr.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Marcus Jorge Bottino

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

Emanuel Giarolla

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

José Fernando Pesquero

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CCST)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Silvio Nilo Figueroa

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Paulo Kubota

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

José Paulo Bonatti

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gilvan Sampaio

Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Manoel Cardoso

Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST)/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

Este capítulo apresenta as características do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre, desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) como parte dos esforços promovidos pela Rede Brasileira de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA), do Instituto Nacional de Pesquisa em Mudanças Climáticas (INCT/MCTI) e do Programa Fapesp de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG) para capacitar o Brasil a gerar cenários de mudanças climáticas globais no Brasil. São apresentados os cenários de mudanças climáticas gerados pelo BESM, os quais constituíram contribuição brasileira pioneira ao projeto internacional CMIP5 de intercomparação de cenários de mudanças climáticas globais. Os resultados dos cenários de temperatura e precipitação gerados pelo BESM são comparados àqueles gerados por modelos de centros de referência mundial, a saber o NCAR, GFDL e *Hadley Centre*. Os cenários climáticos gerados pelo BESM também foram utilizados no processo de *downscaling* dinâmico com o modelo atmosférico regional Eta do CPTEC/INPE e que constituíram contribuições para a Terceira Comunicação Nacional para o painel UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima).

Palavras-chave: Mudanças climáticas globais. Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre. BESM. Rede CLIMA.

1 Introdução

O crescente aumento da concentração de gases de efeito estufa de origem fóssil por atividades antrópica na atmosfera e seus efeitos no clima demanda a criação de modelos matemáticos que permitam prognosticar o estado do clima futuro em escalas de tempo de semanas a séculos. Tal necessidade decorre da irreversibilidade prática de alterações de escala global no uso e na ocupação do solo, dos recursos naturais e de suas consequências para toda a vida no planeta.

Assim, necessitamos desenvolver e testar modelos do sistema terrestre que nos permitam gerar cenários climáticos futuros para prognosticar as consequências de opções tomadas no passado e no presente, de forma a termos os meios de realizar escolhas sensíveis para o futuro.

No entanto, os desafios conceituais e práticos para tanto são enormes. Não somente a atmosfera, os oceanos, a biosfera e a criosfera interagem entre si de modo múltiplo e não linear – o que gera por definição um sistema altamente caótico – ou cuja previsibilidade é limitada. Mas também age nele a espécie humana, as sociedades e as economias, transformando de forma quase instantânea, em escalas de tempo geológicas, gigantescas quantidades de carbono fóssil disponíveis na atmosfera, nos oceanos e nos biomas, consumindo enormes volumes de água por meio dos processos industriais, da agricultura e para o abastecimento humano. Acarreta ainda enorme impacto na capacidade de resiliência de sistemas biológicos dos ecossistemas ao desflorestar vastas extensões tropicais e lançar continuamente centenas de milhões de toneladas de efluentes tóxicos nas águas, no solo e no ar.

Assim, embora relativamente recentes, os estudos dos processos biogeo-físicos do sistema terrestre (primeiros trabalhos conceituais na área de termodinâmica remontam ao século XVIII) vão gradualmente encontrando representações matemáticas nos modelos de circulação geral dos oceanos, da atmosfera e dos ciclos biogeoquímicos do planeta. Já a modelagem dos efeitos das atividades humanas no clima, quer na economia, quer na produção de energia, transporte, alimentos, são praticamente inexistentes e requerem, assim, um esforço especial, focado e continuado, para a geração de modelos do sistema terrestre que tenham alguma semelhança com o planeta Terra.

No Brasil, o desenvolvimento e utilização de modelos globais do sistema terrestre é atividade ainda mais recente, com o primeiro modelo desta classe, o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM), em elaboração pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em cooperação com pesquisadores de várias instituições de pesquisa e ensino no Brasil e no exterior. Esse modelo, que servirá de base para o desenvolvimento de um modelo completo do sistema terrestre, incluindo os fatores antrópicos, já está servindo para gerar os cenários climáticos globais para as próximas décadas, com participação pioneira do Brasil na geração de cenários globais de mudanças climáticas para o quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima (IPCC AR5).

2 O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre

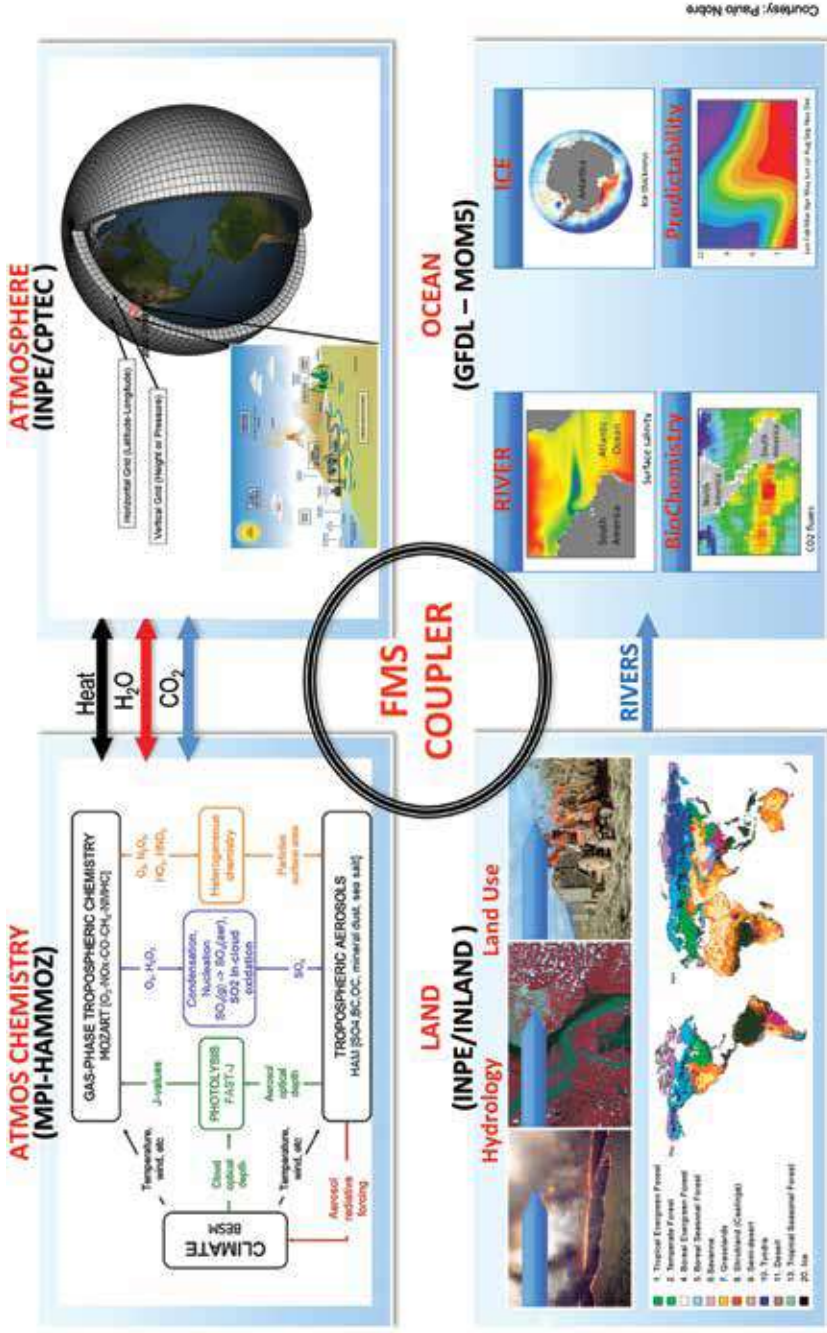
O trabalho de desenvolvimento do BESM teve início com os primeiros esforços do CPTEC/INPE em estabelecer um modelo acoplado oceano-atmosfera global na década de 1990 (NOBRE; KIRTMAN, 1996). Esse modelo acoplado do CPTEC/INPE foi aprimorado, tornado global e agregado a outras componentes, tais como o gelo marinho, e incorporando as sucessivas melhorias e aprimoramentos no modelo atmosférico global do CPTEC/INPE (CAVALCANTI *et al.*, 2002; FIGUEROA *et al.*, 2015). O desenvolvimento do BESM, assim denominado, tomou um grande impulso com o estabelecimento dos projetos de pesquisa BESM/Fapes (2009), do Programa Fapesp de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG), do Instituto Nacional de Pesquisas em Mudanças Climáticas (INCT/MCTI), da Rede Brasileira de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA), além do Projeto BESM/Finep, cujos recursos financeiros propiciaram o desenvolvimento do BESM e seus modelos componentes no INPE.

O avanço do BESM permitiu a participação pioneira do Brasil com a geração e contribuição de cenários globais de mudanças climáticas para o projeto CMIP5, que constituiu a base de modelos para a elaboração do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5). Em tempo, foram gerados cenários globais de mudanças climáticas com o BESM para o período de 1850 a 2100. Tais integrações forneceram

subsídios para a elaboração de artigos científicos publicados na literatura internacional, tais como Nobre *et al.* (2013), Chou *et al.* (2015), Giarolla *et al.* (2015), além de outros artigos em preparação. Os cenários de mudança do clima global do BESM submetidos ao projeto CMIP5 foram gerados no supercomputador Tupã (da marca Cray®, modelo XE6™, com 31.296 processadores) (INPE, 2011), adquirido com recursos do MCTI/Finep e Fapesp, e instalado no INPE.

Além de estabelecer um modelo do sistema terrestre adequado a projeções de mudança do clima no longo prazo que adequadamente resolva processos físicos e climáticos de relevância para o Brasil, o projeto BESM visa contribuir para a formação de uma nova geração de pesquisadores, que compreendam as limitações e o alcance dos produtos de modelos matemáticos de previsão climática. Como citado acima, o BESM se baseia na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC, usado para previsões estendidas de tempo e do clima sazonal e documentado em Nobre *et al.* (2009; 2012). Em sua versão atual, o BESM inclui representações de fenômenos que atuam em uma escala de tempo mais ampla, tais como transições mar-gelo e variabilidade do CO₂ marinho. Além desses, a componente atmosférica do BESM, isto é, o modelo atmosférico global do CPTEC/INPE, contou, como fruto de investimentos do projeto BESM, com avanços significativos na representação da microfísica de nuvens e camada limite planetária atmosférica. Outras melhorias e desenvolvimentos também estão em implantação, como o acoplamento de modelo de superfície com vegetação dinâmica e hidrologia de superfície, os efeitos dos aerossóis e química atmosférica, assim como a inclusão de novas parametrizações de convecção atmosférica que melhor representem a precipitação sobre a América do Sul. A inclusão de um revolucionário esquema de tratamento de elevação de terreno desenvolvido no INPE, Hand (Nobre *et al.*, 2011), que se encontra em implantação no BESM, permitirá realizar a modelagem hidrológica de superfície continental com resolução horizontal de centenas de metros, possibilitando a representação de áreas alagáveis sob o dossel, típicas das áreas planas Amazônicas e do Pantanal, assim como computar a profundidade do lençol freático no terreno e seus efeitos na dinâmica das florestas tropicais. O BESM, quando incorporadas as dimensões de aerossóis e química atmosférica, bem como de vegetação dinâmica e descargas fluviais nos oceanos,

Figura 1 – Desenho esquemático do modelo BESM com suas componentes



Nota: componentes do modelo BESM: atmosférica (modelo atmosférico global do CPTEC/INPE); oceânica (modelo oceânico global da NOAA/GFDL: MOM4p1 nas versões BESM2.3 a 2.5; e MOM5 na versão BESM2.6, com suas componentes de gelo marinho – SIS e biogeoquímica marinha – Topaz); de superfície (SSIB nas versões BESM 2.3 a 2.5; e Inland na versão BESM2.6); aerossóis e química atmosférica (Mozart, na versão BESM2.6); e acoplador de fluxos *Flexible Modular System* (FMS da NOAA/GFDL).

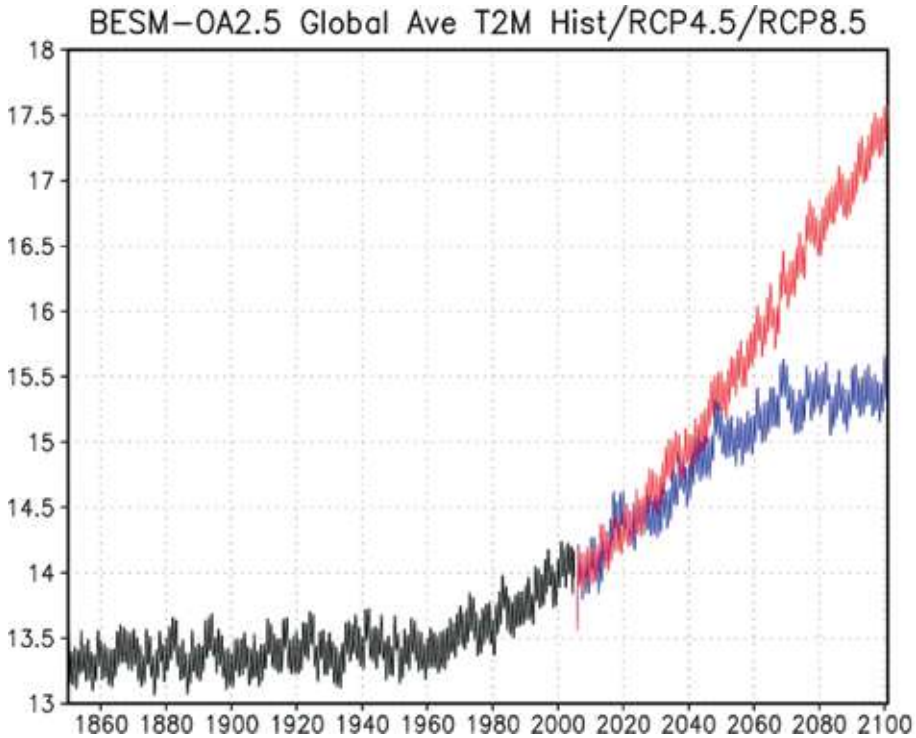
possuirá grande potencial de geração de avaliações detalhadas dos efeitos da mudança do clima, vulnerabilidade e adaptação para o Brasil.

A figura 1 mostra desenho esquemático de acoplamento do BESM, que utiliza como modelos componentes: o modelo atmosférico global do CPTEC/INPE (AGCM/CPTEC), o qual conta com modelo de superfície continental SSIB; o modelo oceânico global da NOAA/GFDL (MOM4p1 e MOM5), o qual inclui os submodelos de gelo marinho (SIS) e biogeoquímica marinha (Topaz), acoplados via acoplador de fluxos FMS (*Flexible Modular System*) da NOAA/GFDL. Também representado na figura 1 estão o Modelo Integrado de Processos Superficiais (Inland), desenvolvido no INPE, e os modelos de química e aerossóis atmosféricos desenvolvidos pelo NCAR; ambos em fase de acoplamento ao BESM.

3 Resultados

A figura 2 mostra a série temporal da média global da temperatura do ar a dois metros de altura do solo para experimentos do BESM 2.5 cobrindo os períodos 1850–2005 e 2005–2100. No primeiro período, a concentração CO₂ atmosférico foi prescrita aos valores históricos observados, sendo que, para o segundo período, foram utilizados dois cenários futuros de aumento da concentração de gases de efeito estufa, conforme especificado pelo projeto CMIP5 com os perfis RCP 4.5 (*Representative Concentration Pathway*) e RCP 8.5 (*vide Taylor et al., 2012*). Nota-se, nas curvas mostradas na figura 1, o gradual aumento da temperatura média global do ar desde o início da integração até meados do século XX, seguido pelo rápido aumento de temperatura até o tempo presente. Também é notável nessa figura as respostas distintas em termo de aquecimento para as forçantes RCP 4.5 e RCP 8.5 para o futuro, indicando um aquecimento médio global de dois e quatro graus célsius relativamente ao período pré-industrial, respectivamente.

Figura 2 – Série temporal da média global da temperatura do ar a 2 metros de altura, para as integrações: histórica para o período 1850–2005 (linha preta) e RCP 4.5 (linha azul) e RCP 8.5 (linha vermelha) para o período 2005 a 2100



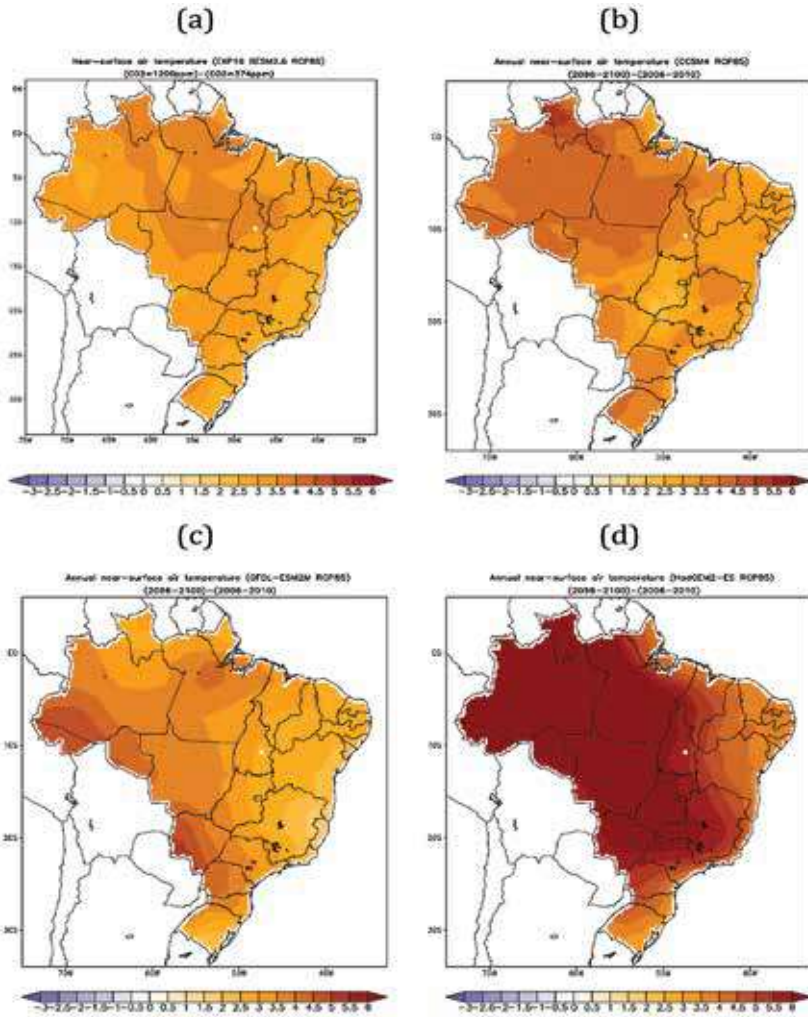
Os cenários globais de mudança do clima gerados pelo BESM foram utilizados como condições de contorno para modelos regionais, tais como o Eta/INPE, para os estudos de impactos das mudanças climáticas sobre o Brasil em escala de bacias hidrográficas, detalhados em Chou *et al.* (2015). E por vir a incorporar aspectos dos biomas brasileiros e os efeitos das descargas fluviais da bacia Amazônica no Oceano Atlântico, entre outros, os cenários globais gerados pelo BESM permitirão uma análise cuidadosa de incertezas a partir da cenarização de usos do solo, como, por exemplo, os impactos para o clima global não

somente por ações de redução do desmatamento ou pelo reflorestamento dos biomas brasileiros, mas também por meio de integrações numéricas do modelo com alta resolução espacial.

Para o projeto CMIP5, o BESM foi integrado em grade espacial de 200 km na atmosfera e 100 km nos oceanos, com 28 níveis na vertical na atmosfera e 50 níveis nos oceanos. No processo de geração dos cenários globais do BESM e de determinação de destreza para a previsão do clima presente, foram realizados mais de 10 mil anos de simulações em modo de conjunto, que geraram mais de 500 *terabytes* de campos numéricos, armazenados em discos magnéticos no sistema de armazenamento do supercomputador no INPE. Para a distribuição de tais volumes de informações, foi instalado o sistema gerenciador e armazenador de dados de modelos *Earth System Grid Federation* (ESGF), diretamente ligado ao supercomputador Tupã, que interligará o INPE aos demais centros mundiais de geração e difusão de cenários de mudanças climáticas globais.

Os esforços do desenvolvimento do BESM estão refletidos nos estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação no âmbito da Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC). As figuras 3 e 4 mostram os campos de aumento da temperatura do ar e das mudanças do padrão de precipitação pluviométrica sobre o Brasil, respectivamente, para o cenário RCP 8.5 do IPCC AR5, computados pelo modelo BESM versão 2.5 com submodelo de superfície SSIB, em comparação aos resultados dos modelos do NCAR, GFDL e *Hadley Centre*. A figura 5 mostra a intercomparação entre os campos globais de temperatura do ar próximo à superfície entre os modelos citados acima. Nota-se, na figura 5, a semelhança entre os padrões de aquecimento global previstos pelo modelo BESM e demais modelos mostrados.

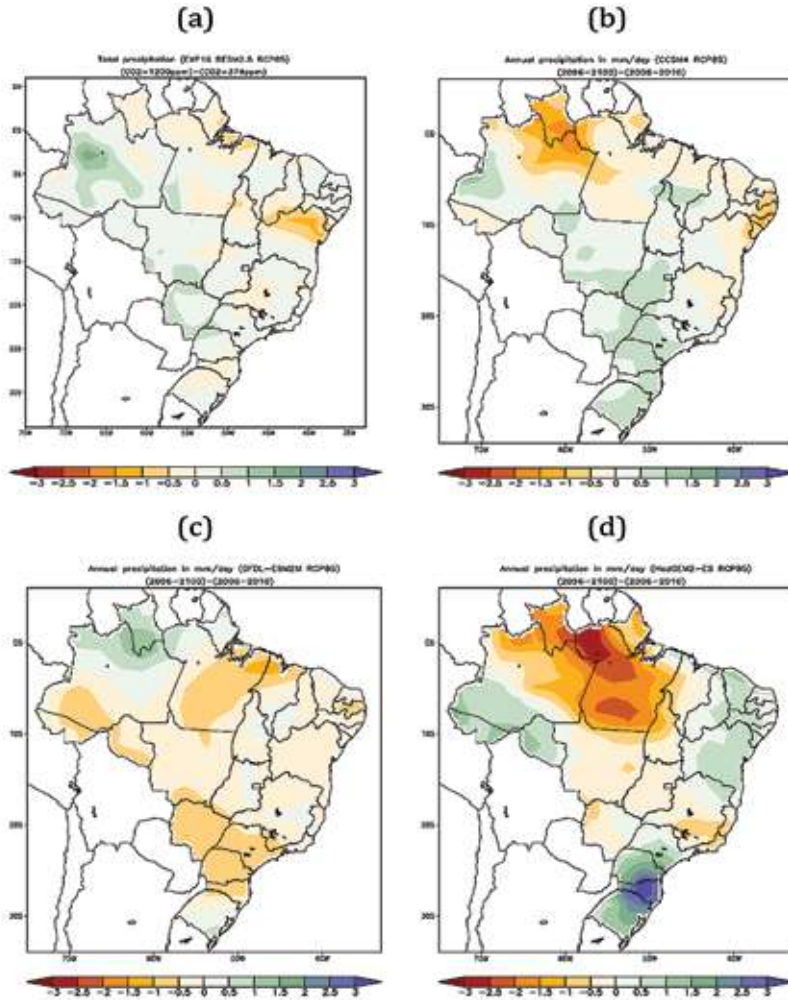
Figura 3 – Diferença de temperatura do ar (°C) a 2 metros de altura entre a condição do clima presente (i.e., com concentração de CO₂ atmosférico de 374 ppm) e o clima futuro para o cenário RCP 8.5 (i.e., 1.200 ppm CO₂ atmosférico) em 2100



Nota: (a) BESM-SSIB V.2.5 do INPE; (b) NCAR's CCSM4; (c) GFDL's CM2M; e (d) HadGEM2 do *Hadley Center*. Recorte sobre o Brasil a partir dos campos globais dos respectivos modelos.

Fonte: Vinícius Capistrano, comunicação pessoal (2014), artigo em preparação

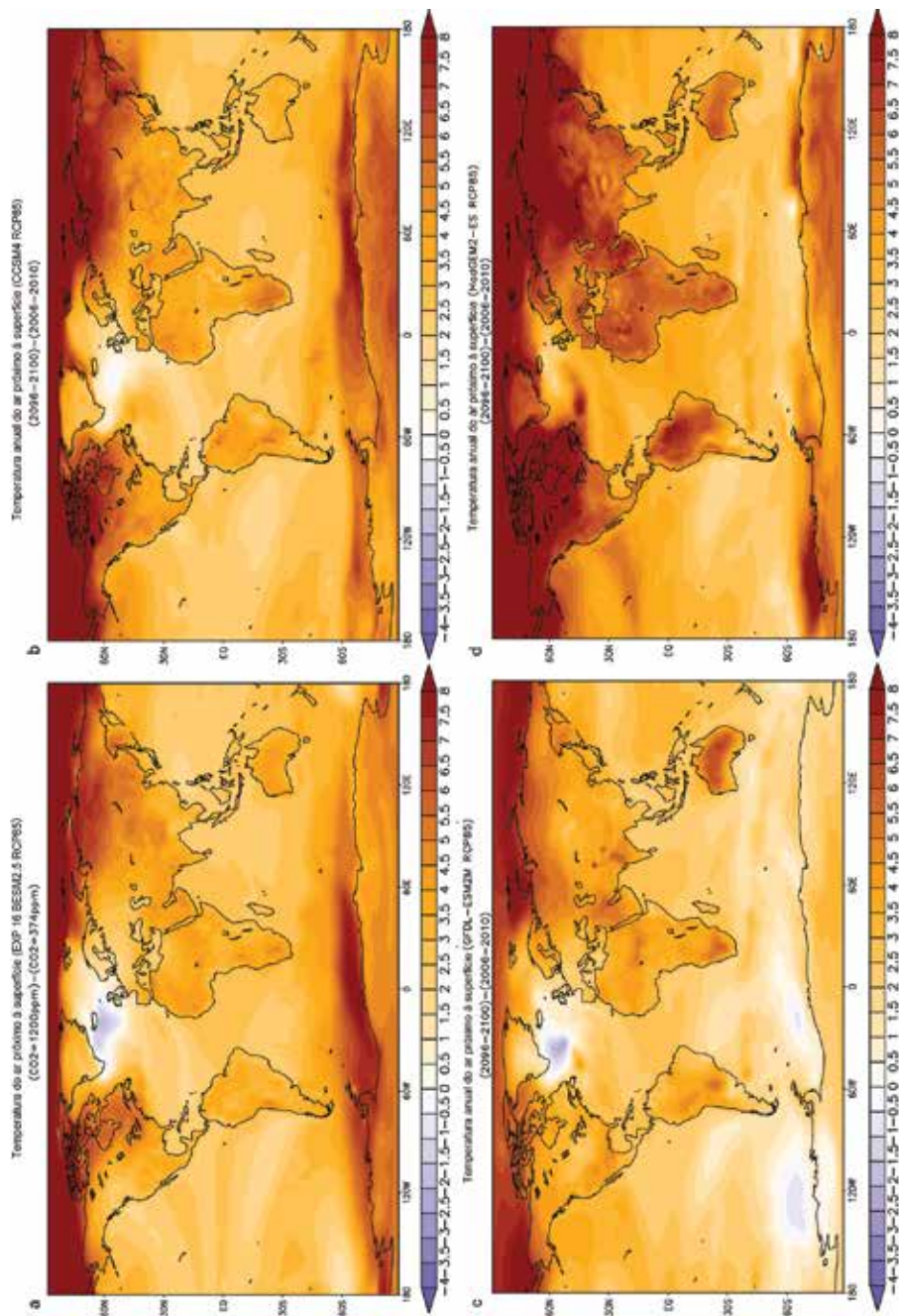
Figura 4 – Diferença de precipitação (mm) a 2 metros de altura entre a condição do clima presente (i.e., com concentração de CO₂ atmosférico de 374 ppm) e o clima futuro para o cenário RCP 8.5 (i.e., 1.200 ppm CO₂ atmosférico) em 2100



Nota: (a) BESM-Ssib V.2.5 do INPE; (b) NCAR's CCSM4; (c) GFDL's CM2M; e (d) HadGEM2 do Hadley Center. Recorte sobre o Brasil a partir dos campos globais dos respectivos modelos.

Fonte: Vinícius Capistrano, comunicação pessoal (2014), artigo em preparação

Figura 5 – Diferença de temperatura do ar (°C) a 2 metros de altura entre a condição do clima presente (i.e., com concentração de CO₂ atmosférico de 374 ppm) e o clima futuro para o cenário RCP 8.5 (i.e., 1.200 ppm CO₂ atmosférico) em 2100 – Para todo o globo



4 Conclusões

Presentemente o BESM constitui a espinha dorsal da capacidade de geração de cenários de mudanças ambientais globais no Brasil. Tal capacidade viabilizará a participação do Brasil no projeto CMIP6, com a inclusão dos componentes de vegetação dinâmica e os efeitos de aerossóis atmosféricos no BESM. Além dos cenários globais de mudanças climáticas, missão prioritária no desenvolvimento do modelo, o BESM permitirá o avanço na elaboração de previsões estendidas de tempo e clima sazonal, ao incorporar o estado da arte em modelagem atmosférica e de superfície global em curso no INPE, além da inclusão de métodos avançados de inicialização acoplada continente-oceano-atmosfera.

Referências

- CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* Global climatological features in a simulation using CPTEC/COLA AGCM. **Journal Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.
- CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.
- FIGUEROA, S. N. *et al.* **The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM)**. Part 1: Model description and its performance for the tropical rainfall forecasting. 2016. (Em preparação).
- GIAROLLA, E. *et al.* Equatorial Atlantic Ocean dynamics in a coupled ocean-atmosphere model simulation. **Ocean Dynamics**, v. 65, n. 6, p. 831-843, 2015.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Introdução ao Uso do Tupã**. CPTEC/INPE, Supercomputação do INPE, 2011. Disponível em: <<http://supercomputacao.inpe.br/documentacao2>>. Acesso em: 6 out. 2015.
- NOBRE P. *et al.* Amazon deforestation and climate change in a coupled model simulation. **Journal of Climate**, v. 22, n. 21, p. 5686-5697, 2009.
- NOBRE, A. D. *et al.* Height above the nearest drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.
- NOBRE, P. *et al.* Coupled Ocean-Atmosphere Variations over the South Atlantic Ocean. **Journal of Climate**, v. 25, n. 18, p. 6349-6358, 2012.
- NOBRE, P. *et al.* Climate simulation and change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716-6732, 2013.

NOBRE, P.; KIRTMAN, B. P. Coupled prediction system at COLA/CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão, SP. **Anais...** Campos do Jordão, SP: SBMet, 1996. p. 859-863.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93. n. 4, p. 485-498, 2012.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede CLIMA, ao INCT/MCTI, ao PFFPMCG e ao Pnud, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto BESM; e ao INPE, pelo apoio logístico e de supercomputação.



CAPÍTULO 2

Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul

Sin Chan Chou

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Adan Silva

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

André Lyra

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Caroline Mourão

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

Claudine Dereczynski

Departamento de Meteorologia/Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Daniela Rodrigues

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Diego Campo

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Diego Chagas

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gracielle Siqueira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gustavo Sueiro,

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Isabel Pilotto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Jorge Gomes

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Josiane Bustamante

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Priscila Tavares

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados das simulações de mudanças climáticas em escala reduzida (*downscaling*) geradas pelo modelo regional Eta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), avaliando as simulações do clima presente e analisando suas projeções até o final do século 21. Essas simulações foram geradas para subsidiar os estudos de vulnerabilidade em escala regional. O modelo Eta foi configurado na resolução de 20 km e 38 níveis verticais, sobre uma área que cobre a América do Sul, a América Central e os oceanos adjacentes. As simulações do modelo Eta foram forçadas pelas simulações dos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, nos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5. As simulações do período de 1960 a 2005 empregaram concentrações de CO₂ equivalente às do clima atual, enquanto que, a partir de 2006 até 2100, as concentrações corresponderam aos respectivos cenários de emissão. Uma breve descrição dos modelos e dos cenários utilizados foi apresentada. A avaliação das simulações do modelo Eta forçados pelos dados dos HadGEM2-ES e MIROC5 para o clima presente, 1961–1990, mostra boa capacidade das simulações em reproduzir a sazonalidade da temperatura e da chuva na América do Sul. O erro a ser destacado nas temperaturas é a subestimativa das si-

mulações do clima presente, em todas as estações do ano, principalmente quando o modelo Eta é aninhado ao MIROC5. Superestimativa na temperatura do clima presente pode ser identificada na região norte da Argentina, da Bolívia e do Paraguai, principalmente em estações quentes do ano. Em relação às chuvas, em geral, no verão, as simulações subestimam as chuvas principalmente quando aninhado ao modelo HadGEM2-ES, enquanto que, no inverno e na primavera, as chuvas são superestimadas, principalmente no Sul e no litoral do Sudeste do Brasil. As projeções futuras até 2100, regionalizadas pelo modelo Eta, nos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 mostram um clima mais quente em toda a América do Sul. Os máximos de aquecimento se localizam na região Centro-Oeste do Brasil em todas as estações do ano e, até o final do século, estendem-se para as regiões Norte, Nordeste e Sudeste do país. No final do século, esses máximos de aquecimento podem variar entre 2° e 8°C. Com relação à precipitação, as projeções indicam clima mais seco no verão na maior parte do Brasil, com máximos de redução nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. Essa redução é notada em todos os períodos futuros. Aumentos da precipitação são projetados no norte do Nordeste e no Sul. As simulações mostram também que, apesar das projeções de redução das chuvas no Sudeste, há aumento na frequência de eventos extremos de chuva.

Palavras-chave: Modelo Eta. Mudanças climáticas. América do Sul. *Downscaling*. Projeções.

1 Introdução

As projeções de mudanças no sistema climático são produzidas usando uma hierarquia de modelos climáticos que vão desde modelos climáticos simples, passando por modelos de média complexidade, até modelos de categoria Sistema Terrestre (*Earth System Models – ESM*). Esses modelos simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antrópicas. Um novo conjunto de cenários, as Trajetórias de Concentração Representativa (*Representative Concentration Pathways – RCP*), foi utilizado pelos modelos climáticos globais no âmbito do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – CMIP5*) do *World Climate Research Programme* (WCRP). As simulações dos modelos globais acoplados subsidiaram o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (IPCC AR5 – *Intergovernmental Panel on Climate Change – Fifth*

Assessment Report). As projeções desses modelos globais apresentam em média aquecimento em toda a América do Sul, com maiores valores no sul da Amazônia, redução das chuvas no leste da Amazônia e aumento das chuvas na região da bacia do Prata, incluindo o Sul do Brasil (CHRISTENSEN *et al.*, 2013).

Os modelos globais acoplados utilizam resolução espacial de cerca de 200 a 100 km, que é considerada baixa para estudos de impacto e vulnerabilidade em escala de regional a local. A técnica mais aceita para transformar a relativamente baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais em escalas mais refinadas é a regionalização (*downscaling*) dinâmica das projeções usando modelos climáticos regionais. Esse refinamento de grade é gerado a partir do modelo regional em mais alta resolução espacial, que utiliza nas fronteiras laterais da área de interesse as simulações do modelo climático global.

A técnica de regionalização tem sido usada intensivamente para previsões sazonais sobre a América do Sul (CHOU *et al.*, 2005), todavia, para projeções climáticas futuras, ainda existe um número limitado de estudos. Revisões comparando vários métodos de *downscaling* foram elaboradas por Wilby e Wigley (1997) e Giorgi *et al.* (2001). Uma revisão sobre modelos regionais empregados na América do Sul pode ser encontrada no capítulo 8 do Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (PBMC, 2014), produzido pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estuda as mudanças do clima e coordena a modelagem regional do clima e as projeções futuras da mudança climática. Ademais, o INPE coordena a relação entre esses resultados e as pesquisas e os estudos de vulnerabilidade e adaptação relativos a setores estratégicos que são vulneráveis aos impactos associados à mudança do clima no Brasil.

Os modelos globais acoplados do AR5 apresentam, em geral, melhor desempenho na simulação das chuvas nas regiões tropicais, inclusive na América do Sul, quando comparados com os modelos do Quarto Relatório do IPCC, AR4. Houve também ganho no desempenho das simulações das temperaturas à superfície (FLATO *et al.*, 2013) no AR5 em relação ao AR4. Essa melhoria dos modelos globais sugere maior confiança em suas projeções e que, por sua vez, se transfere para as simulações regionalizadas.

1.1 Objetivos

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados das simulações de mudanças climáticas em escala reduzida (*downscaling*) geradas pelo modelo regional Eta do INPE, avaliando as simulações do clima presente e analisando suas projeções até o final do século 21.

2 Metodologia

Nesta seção, apresenta-se uma breve descrição do modelo regional Eta e dos modelos globais acoplados HadGEM2-ES e MIROC5. Ademais, os cenários utilizados neste trabalho, RCP 4.5 e RCP 8.5, são também descritos.

2.1 Modelo Eta

O modelo regional Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado (MESINGER *et al.*, 1988), empregado operacionalmente pelo NCEP (BLACK, 1994) e, atualmente, é usado pelo INPE para previsão de tempo (BUSTAMANTE *et al.*, 1999) e clima (CHOU *et al.*, 2005). O modelo foi inicialmente modificado para realizar simulações em escala estendida (CHOU *et al.*, 2000) e, mais tarde, para previsão climática sazonal (BUSTAMANTE *et al.*, 2002; BUSTAMANTE *et al.*, 2006). As previsões climáticas sazonais do modelo regional Eta apresentam ganho de desempenho sobre o modelo global do CPTEC utilizado como condição de contorno lateral (ALVES *et al.*, 2004; CHOU *et al.*, 2005). Recentemente, o modelo Eta foi adaptado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de cenários de mudanças climáticas (PESQUERO *et al.*, 2009). A avaliação das simulações do modelo Eta, na resolução de 40 km, aninhado ao modelo inglês HadCM3 sobre a América do Sul mostrou boa capacidade do modelo em reproduzir o clima presente, no período de 1961–1990 (CHOU *et al.*, 2012). As projeções desse modelo Eta para o clima futuro de 2010–2100, cenário A1B, utilizando as condições de contorno do modelo HadCM3 (MARENGO *et al.*, 2012) foram utilizadas para apoiar a Segunda Comunicação Nacional (BRASIL, 2010).

O modelo Eta trata a radiação de onda longa com base no esquema desenvolvido por Fels e Schwarzkopf (1975), enquanto que a radiação de onda curta segue o esquema de Lacis e Hansen (1974). Os dois esquemas são chamados a cada hora de integração. As tendências de temperatura da atmosfera associadas aos efeitos radiativos são aplicadas após cada passo de tempo. A precipitação de nuvens cúmulos se baseia no esquema de Betts e Miller (1986). Essa parametrização trata tanto da convecção rasa, não precipitante, quanto da profunda, precipitante. Esse esquema é fundamentado no ajuste dos perfis de temperatura e umidade específica termodinamicamente instável na direção de um perfil de referência, com um tempo de relaxação prescrito. A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Zhao (ZHAO *et al.*, 1997). A superfície continental é tratada pelo esquema Noah (EK *et al.*, 2003) com quatro camadas de solo. O esquema de turbulência inclui a previsão da energia cinética turbulenta. Outras características e atualizações podem ser encontradas em Mesinger *et al.* (2012).

2.2 Modelos globais

Os modelos globais acoplados utilizados para regionalização, HadGEM2-ES e MIROC5, foram selecionados por apresentarem desempenho satisfatório na América do Sul em termos de circulação atmosférica e precipitação (FLATO *et al.*, 2013). A rápida disponibilização do conjunto completo das simulações do HadGEM2-ES, pelo *British Atmospheric Data Centre*, e do MIROC5, pelo *National Institute for Environmental Studies*, do Japão, foi também um fator decisivo para a utilização de tais modelos. O conjunto completo de dados necessário para forçar o modelo regional totaliza vários *terabytes*, o que torna impeditivo o acesso pela internet.

2.2.1 Modelo HadGEM2-ES

As condições de contorno utilizadas nas simulações com o Modelo Eta foram provenientes do *UK Met Office Hadley Centre Global Environmental Model version 2* (HadGEM2) com as chamadas componentes do sistema terrestre, em inglês *Earth System* (ES) (HadGEM2-ES). O HadGEM2-ES é composto por um modelo de circulação geral da atmosfera acoplado a um modelo oceânico. A componente atmosférica utiliza a resolução horizontal N96, que corresponde a

aproximadamente a 1,250° em latitude e a 1,875° em longitude, e 38 níveis verticais, enquanto que a componente oceânica utiliza a resolução horizontal de 1°, aumentando para 1/3 de grau no equador, e 40 níveis verticais (COLLINS *et al.*, 2011). O passo de tempo do modelo HadGEM2-ES é de 30 minutos para as componentes da atmosfera e superfície e de uma hora para a componente oceânica.

As componentes do sistema terrestre incluem o ciclo do carbono terrestre e oceânico, e a química da troposfera. A vegetação e o ciclo do carbono terrestre são representados pelo modelo de vegetação dinâmica global, TRIFFID (*Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics*) (COX, 2001), que simula a cobertura e balanço do carbono de cinco tipos de vegetação: árvores de folhas largas, coníferas, gramínea C3, gramínea C4 e vegetação arbustiva. A biologia e a química do oceano são representadas pelo modelo Diat-HadOCC, que inclui a limitação de crescimento do plâncton por macro e micronutrientes, e também simula a emissão de Dimetil Sulfeto (DMS) para a atmosfera. A química da troposfera é representada pelo modelo UKCA (*United Kingdom Chemistry and Aerosol model*), que inclui novas espécies de aerossóis (carbono orgânico e poeira). O UKCA afeta a forçante radiativa por meio das alterações simuladas do metano e ozônio, bem como as taxas em que o dióxido de enxofre e as emissões de DMS são convertidos em aerossol de sulfato.

2.2.2 Modelo MIROC5

As simulações do modelo Eta também utilizaram, como condição de contorno, as simulações provenientes do MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5*). Esse modelo é composto pelo modelo atmosférico de circulação geral da atmosfera desenvolvido a partir de um consórcio de instituições japonesas (*CCSR-NIES Frontier Research Center for Global Change*) (NUMAGUTI *et al.*, 1997), pelo modelo oceânico *CCSR Ocean Component Model* (HASUMI, 2006), que inclui um modelo de gelo oceânico global, e de um modelo de superfície que possui um módulo acoplado de rios. O MIROC5 (WATANABE *et al.*, 2010) é uma versão melhorada do modelo MIROC3.2 utilizado no IPCC AR4 (IPCC, 2007). Os núcleos dinâmicos do modelo atmosférico e os esquemas de parametrização de radiação, convecção *cumulus*, turbulência e aerossóis foram atualizados na versão MIROC5. Nos modelos oceânicos e de superfície continental do

MIROC5, a componente do gelo marinho foi melhorada, e uma avançada versão do módulo de rios (OKI; SUD, 1998) foi incorporada. Uma descrição mais detalhada do modelo MIROC5 pode ser obtida em Watanabe *et al.* (2010).

2.3 Cenários de emissões

As emissões futuras de gases de efeito estufa são resultantes de sistemas dinâmicos complexos, determinados por forçantes como crescimento demográfico, desenvolvimento socioeconômico e mudança tecnológica. As escolhas sociais que definem as forçantes climáticas para o futuro são cercadas por grande incerteza. Os cenários de emissão representam várias trajetórias de desenvolvimento do futuro. Esses cenários auxiliam nas análises de mudanças climáticas, seus impactos, e subsidiam medidas de adaptação e mitigação. Os relatórios do IPCC se apoiaram em diversos cenários de mudanças climáticas. A família de cenários de emissão dos gases de efeito estufa do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2000) foi utilizada como a principal forma de explorar a incerteza da contribuição antrópica no clima futuro.

Os novos cenários conhecidos como RCPs (*Representative Concentration Pathways*) representam diferentes trajetórias de concentração dos gases de efeito estufa no clima futuro (VAN VUUREN *et al.*, 2011a, 2011b). Esses novos cenários não foram gerados a partir de uma evolução socioeconômica prescrita, como nos cenários do AR4, mas gerados a partir da prescrição da forçante radiativa nos valores de 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5 W/m² no final do século 21. A forçante radiativa representa a mudança no balanço radiativo no topo da atmosfera resultante da mudança na composição da atmosfera ou das mudanças no uso do solo. Os quatro cenários são identificados por RCP2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. As simulações com o modelo Eta utilizaram o RCP 4.5 e o RCP 8.5; o primeiro cenário é um cenário intermédio, enquanto que o segundo é o cenário mais pessimista. Apesar de apresentarem diferentes valores de forçante radiativa ao longo dos anos do século 21, o cenário RCP 4.5 se assemelha ao cenário A1B, e o RCP 8.5 se assemelha ao cenário A2 do IPCC AR4 no final do século 21. A forçante radiativa no RCP 8.5 continua aumentando após 2100, enquanto que, nos cenários RCP 4.5 e 6.0, a forçante estabiliza e, no cenário, RCP2.6, a forçante continua em declínio após o final do século 21. Em relação à concentração dos gases,

o cenário RCP 4.5 atinge cerca de 650 ppm de CO₂ equivalente no final do século, enquanto que, no cenário RCP 8.5, o CO₂ equivalente excede 1.000 ppm.

2.4 Preparação das simulações

As simulações do modelo Eta foram geradas em resolução de aproximadamente 20 km na latitude e na longitude, e 38 níveis na vertical, cobrindo a América do Sul, a América Central e o Caribe. As condições iniciais e as de contorno lateral são provenientes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5. Temperatura, umidade, vento e pressão à superfície dos modelos globais foram atualizadas a cada seis horas nos contornos laterais do modelo Eta. A temperatura da superfície do mar, simulada pelos modelos globais, foi atualizada diariamente, enquanto que a concentração de CO₂ equivalente foi atualizada a cada três anos.

A umidade do solo das reanálises do ERA-Interim (DEE *et al.*, 2011) foram utilizadas como condições iniciais de superfície nas quatro camadas de solo. O modelo HadGEM2-ES utiliza um calendário hipotético no qual, cada ano tem exatos 360 dias, portanto, todos os meses têm 30 dias. Por outro lado, o modelo MIROC5 possui calendário de 365 dias, sem ano bissexto. O calendário do modelo Eta foi alterado com o objetivo de sincronizar as simulações do modelo regional com as simulações dos modelos globais.

As integrações se iniciam no dia 1º de janeiro de 1960 e estendem-se até 2100. Para facilitar a manipulação dos dados, as integrações são divididas em períodos de 1960–2005, 2006–2040, 2040–2070 e 2070–2100. Os resultados são apresentados para os períodos de 1961–1990, 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100. Detalhes adicionais dessas simulações podem ser encontrados em Chou *et al.* (2014a) e em Chou *et al.* (2014b).

3 Simulações do clima presente

Como etapa prévia à utilização das projeções dos modelos numéricos, é importante avaliar seu desempenho em simular o clima presente, de forma a atribuir um grau de confiança nas simulações elaboradas para o clima futuro.

Para validação das simulações e caracterização dos principais padrões atmosféricos dominantes sobre a América do Sul no clima presente (1961–1990), são utilizados dados mensais de precipitação, temperatura do ar e vento nos baixos níveis da atmosfera.

Os dados de precipitação e temperatura do ar são provenientes do *Climatic Research Unit* (CRU) (NEW *et al.*, 1999), com resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, para o mesmo período da simulação. Essa base de dados é formada por dados meteorológicos observados em estações de todo o mundo e que, a seguir, recebem tratamentos de consistência, controle de qualidade e outros. Posteriormente, tais dados são colocados em pontos de grade e servem como base para estudos de validação de modelos numéricos.

Para avaliação dos campos de circulação atmosférica, utilizam-se dados da Reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), correspondentes ao produto ERA40 (UPPALA *et al.*, 2005) com 50 níveis na vertical e resolução horizontal de $1,125^\circ$ de latitude \times $1,125^\circ$ de longitude. O produto ERA40 (40 anos) compreende o período 1957–2001, e o seu principal objetivo é proporcionar análises globais do estado da atmosfera, tendo como base o uso de técnicas de assimilação de dados e conjuntos de dados observados de boa qualidade.

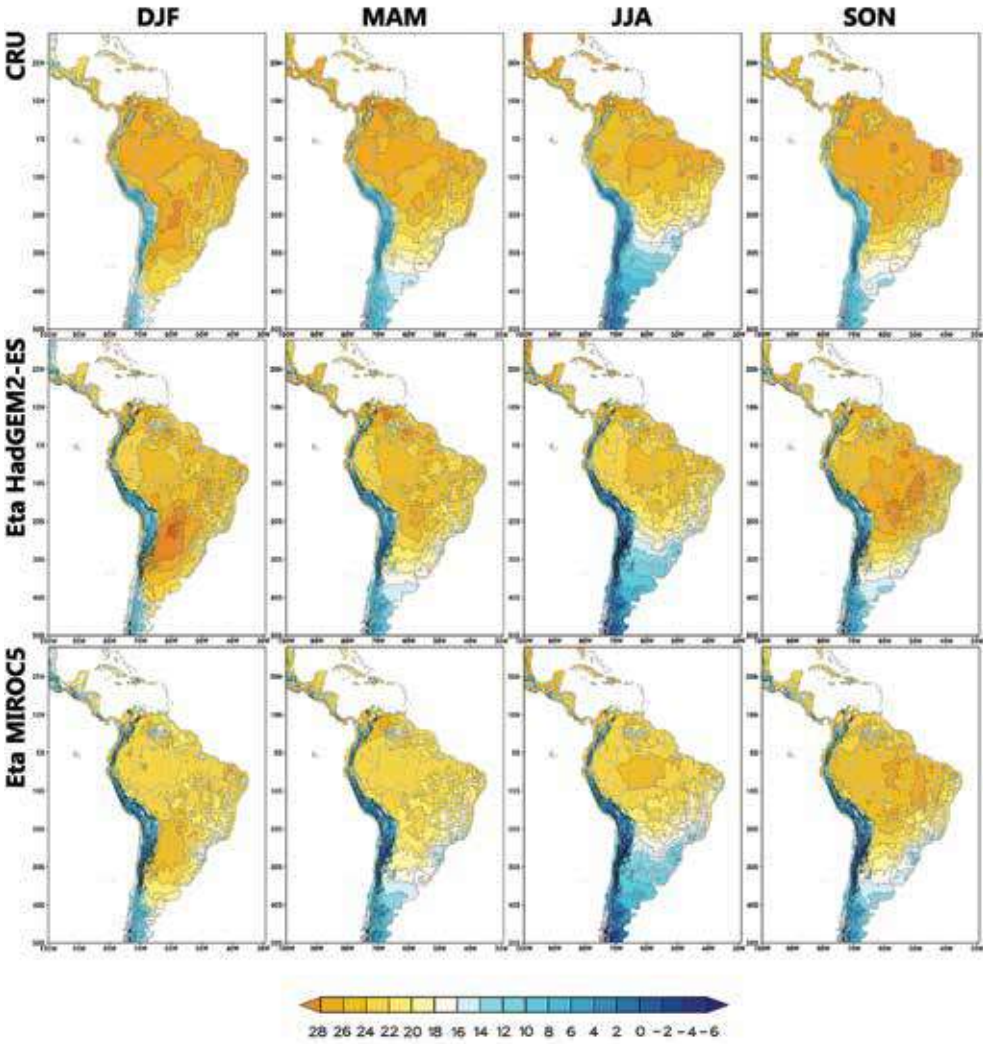
As avaliações são feitas para as quatro estações do ano, em que se considera como verão austral os meses de dezembro, janeiro e fevereiro; outono, o trimestre março-abril-maio e assim sucessivamente.

3.1 Temperatura do ar

A distribuição espacial da temperatura média mensal e sazonal gerada a partir dos dados do CRU revela que, na maior parte do continente sul-americano, as temperaturas variam entre 24° e 26°C , exceto nos meses de inverno (junho a agosto) nas regiões ao sul da latitude 20°S , onde se observam valores menores que 14°C . As áreas de máximos valores, acima de 28°C , localizam-se principalmente sobre o Paraguai e região Norte do Brasil.

A figura 1 apresenta a climatologia sazonal da temperatura do ar a 2 m de altura relativo às observações do CRU e permite a comparação com as simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. As simulações capturam bem a sazonalidade da temperatura sobre o continente, mostram o avanço das temperaturas mais baixas pelo sul do continente a medida que o inverno se aproxima; e, na parte tropical do continente, as temperaturas praticamente não variam. Esses padrões estão em concordância com o padrão climatológico para as quatro estações do ano, contudo existem diferenças entre as simulações e a observação, como mostrado a seguir.

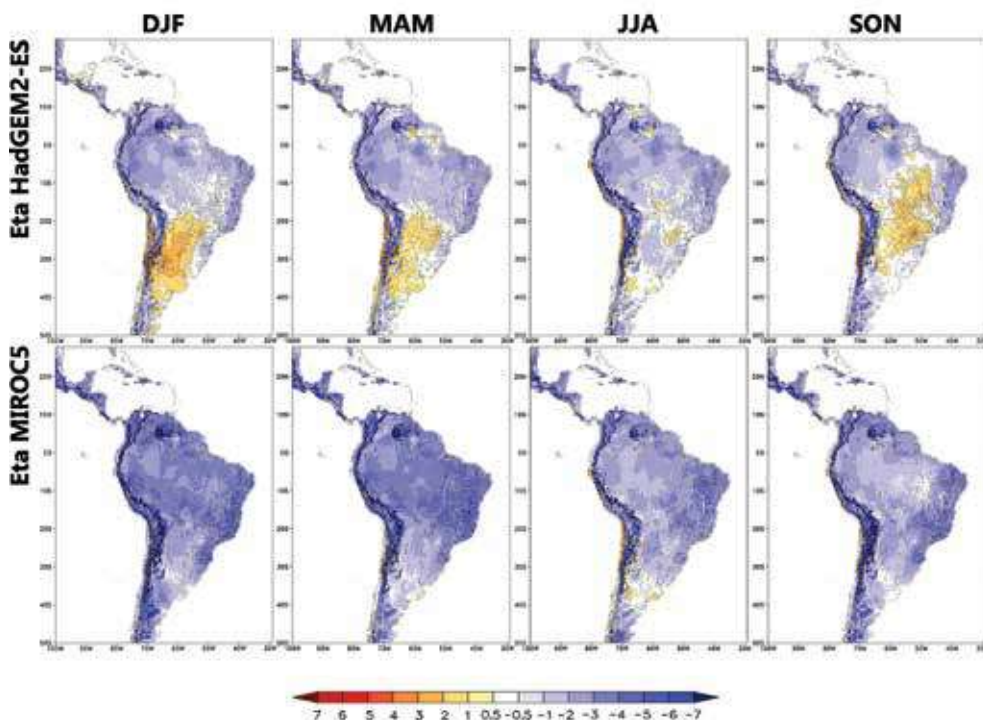
Figura 1 – Climatologia sazonal da temperatura média do ar (°C) do período 1961–1990 construída a partir de dados observados – CRU (linha superior), Eta-HadGEM2-ES (linha do centro) e Eta-MIROC5 (linha inferior)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) verão (DJF); (2) outono (MAM); (3) inverno (JJA); e (4) primavera (SON).

A figura 2 mostra o erro médio ou viés da temperatura simulada pelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 em cada estação do ano. O viés médio das simulações do Eta-HadGEM2-ES é negativo sobre as regiões Norte e Nordeste do Brasil nas quatro estações do ano. Nas estações de verão, outono e primavera o erro médio passa a valores positivos sobre a Argentina e o Paraguai nas simulações do Eta-HadGEM2-ES. O viés das simulações Eta-HadGEM2-ES, em praticamente todas as estações e na maior parte das regiões, varia em torno de -2°C a 2°C , porém, no inverno, as regiões sul e central da América do Sul apresentam viés negativo superior a -1°C . Nas simulações do Eta-MIROC5, as temperaturas são mais baixas do que a observação durante todo o ano. Nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, os valores máximos de viés negativo do Eta-MIROC5 ocorrem nas estações de verão e outono, reduzindo nas estações de inverno e primavera, atingindo os menores valores, entre -1° e 1°C , no leste da região Amazônica na primavera. Ainda com relação ao Eta-MIROC5, sobre a faixa leste do Brasil, a variação nos valores do erro médio é pequena, permanecendo aproximadamente constante entre -1° e -6°C em todas as estações do ano.

Figura 2 – Erros médios da temperatura do ar (°C) em relação às observações do CRU para as simulações: Eta-HadGEM2-ES (linha superior) e Eta-MIROC5 (linha inferior)

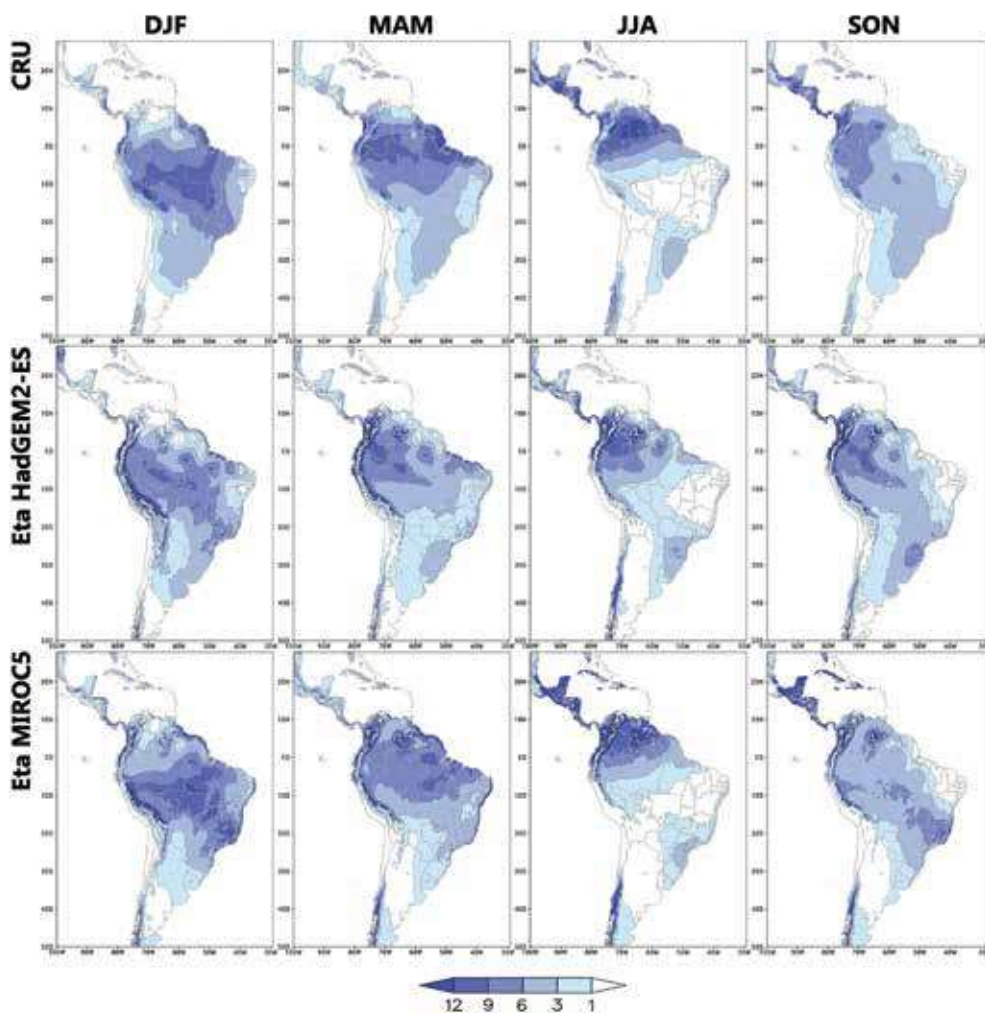


Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) verão (DJF); (2) outono (MAM); (3) inverno (JJA); e (4) primavera (SON).

3.2 Precipitação

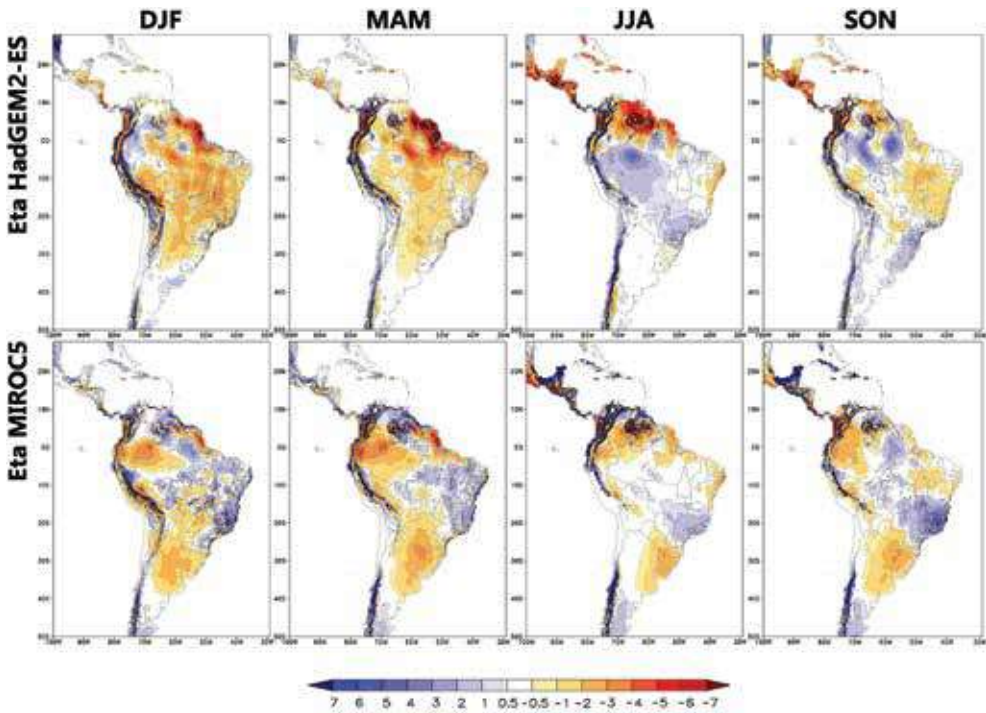
A figura 3 apresenta a climatologia sazonal da precipitação observada (CRU) e simulada pelo modelo regional, e, na figura 4, estão os erros médios obtidos a partir da diferença entre a precipitação simulada pelo Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 e a observação.

Figura 3 – Climatologia sazonal da precipitação média (mm/dia) do período 1961–1990 construída a partir de dados observados – CRU (linha superior), Eta-HadGEM2-ES (linha do centro) e Eta-MIROC5 (linha inferior)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) verão (DJF); (2) outono (MAM); (3) inverno (JJA); e (4) primavera (SON).

Figura 4 – Erros médios da precipitação (mm/dia) em relação às observações do CRU para as simulações: Eta-HadGEM2-ES (linha superior) e Eta-MIROC5 (linha inferior)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) verão (DJF); (2) outono (MAM); (3) inverno (JJA); e (4) primavera (SON).

No verão, de forma geral, as simulações capturam o padrão de precipitação, caracterizado pela presença de uma banda de nebulosidade alongada, orientada no sentido noroeste-sudeste, estendendo-se desde a região amazônica até o oceano Atlântico, com duração superior a quatro dias (KOUSKY, 1988), conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No entanto, algumas diferenças são notadas entre as simulações do Eta e as observações CRU. Por exemplo, a distribuição de chuvas ao longo da posição climatológica da ZCAS em ambas simulações do Eta mostra subestimativa da chuva na Amazônia. Por outro lado,

as simulações do Eta-HadGEM2-ES subestimam as chuvas na região central e sudeste enquanto o Eta-MIROC5 subestima na região que compreende o Rio Grande do Sul, o Uruguai e o nordeste da Argentina. Esse déficit de chuvas na parte central da banda da ZCAS e em grande parte da Amazônia foi identificada em versão anterior do modelo Eta (PESQUERO *et al.*, 2009; CHOU *et al.*, 2012) e em outros modelos (SOUZA, 2006; OYAMA, 2006), que relacionam essa divergência à má representação de alguns componentes do ciclo hidrológico (cobertura vegetal, umidade do solo, fluxos de superfície) e à parametrização de convecção.

No outono, como característica climática, a banda de precipitação na região da ZCAS começa a recuar e a precipitação restringe-se ao noroeste da Amazônia. Nessa estação, as chuvas são abundantes nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. As simulações do Eta, de forma geral, conseguem capturar essa variabilidade, embora se mostre ligeiramente mais seco em parte da região Norte e central em comparação com as observações. Nas simulações do Eta-MIROC5, permanece nessa estação a subestimativa da precipitação sobre o estado do Rio Grande do Sul, o Uruguai e o Nordeste da Argentina, e nota-se uma superestimativa das chuvas sobre o estado de Minas Gerais e a região Nordeste do Brasil.

O modelo apresenta um comportamento muito similar com as observações durante o inverno. Características como ausência de precipitação na parte central e sudeste do Brasil, chuvas no sul e ao longo da costa nordeste brasileira, são observados nessa época do ano. Tal padrão climatológico, associado com a intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e propagação de ondas de leste no litoral da região Nordeste do Brasil, são bem simulados pelo modelo. Os máximos de chuva sobre a Venezuela e a Colômbia, que, em geral, ocorrem nesse período do ano, também estão presentes nessas simulações, apesar de subestimados. Nas simulações do Eta-MIROC5, nota-se superestimativa das chuvas na região que cobre os estados de São Paulo e Minas Gerais. Nas simulações do Eta-HadGEM2-ES, a superestimativa se expande até o Amazonas.

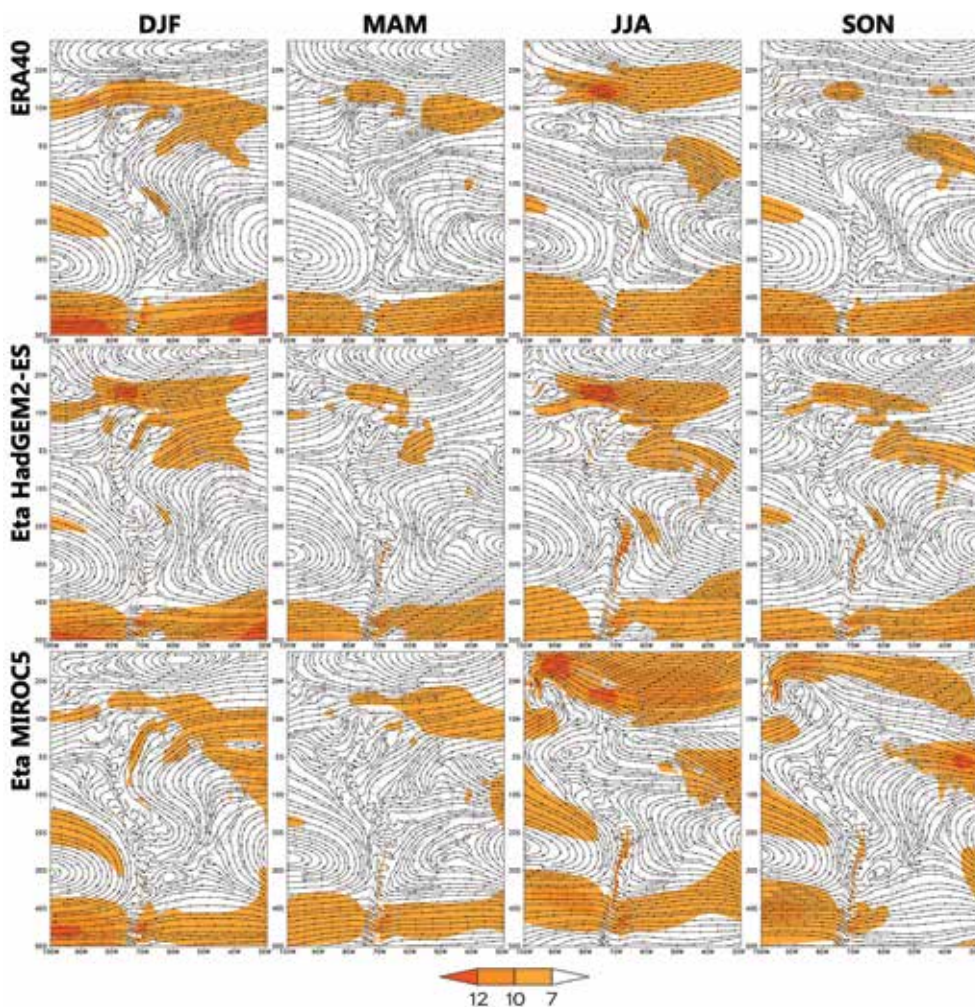
Na primavera, estação de transição entre o inverno e o verão, e quando as monções sul-americanas começam a se desenvolver, em geral, os modelos apresentam maior dificuldade em simular adequadamente várias de suas caracte-

rísticas climatológicas. Apesar de o modelo ter corretamente simulado a ausência de chuva na região Nordeste do Brasil, ele expandiu a área seca ao norte desta região. Do inverno para a primavera, o modelo simula corretamente a expansão da banda de precipitação do noroeste para o sudeste do Brasil. Contudo, enquanto o Eta-HadGEM2-ES superestima os máximos de chuva no sul do Brasil, o Eta-MIROC5 os subestima.

3.3 Circulação em baixos níveis

São apresentados a seguir os campos sazonais da circulação em baixos níveis em 850hPa (figura 5), simulada pelo modelo e observada com base nos dados da reanálise do ECMWF. De maneira geral, nota-se que a sazonalidade em baixos níveis é bem representada pelo modelo Eta, ou seja, a circulação associada ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul está presente e posicionada de acordo com a reanálise. Também em baixos níveis, nota-se uma intensificação do fluxo a leste dos Andes, promovendo maior transporte de umidade para a Argentina no inverno. O Eta-MIROC5 apresenta ventos mais intensos do que a reanálise na região tropical, nas estações de inverno e primavera.

Figura 5 – Climatologia sazonal do vento representado por linhas de corrente e isotacas (m/s) em 850 hPa no período 1961–1990, construída a partir de dados observados – CRU (linha superior), Eta-HadGEM2-ES (linha do centro) e Eta-MIROC5 (linha inferior)

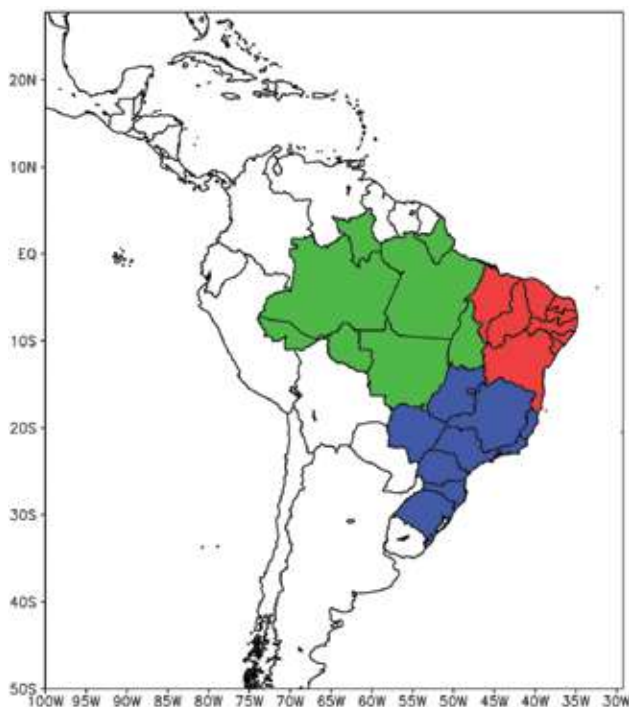


Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) verão (DJF); (2) outono (MAM); (3) inverno (JJA); e (4) primavera (SON).

4 Simulações do clima futuro

A investigação das projeções do clima futuro do modelo regional Eta envolve uma análise detalhada das mudanças nas características do clima na escala de tempo sazonal sobre a América do Sul. Para tanto, são analisados campos médios sazonais da temperatura do ar a 2 m de altura e da precipitação, comparando-os com os dados simulados pelo modelo no clima presente. Outro aspecto analisado é a distribuição de frequência da precipitação e da temperatura do ar sobre três regiões selecionadas, as quais foram denominadas: Noroeste (NO), que inclui toda a região Norte e o estado do Mato Grosso; Nordeste do Brasil (NE); e Centro-Sul (CS), que compreende as regiões Sul e Sudeste e os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul (figura 6).

Figura 6 – Domínio do modelo Eta e os três subdomínios de estudo



Nota: Noroeste (NO), em verde, Nordeste (NE), em vermelho, e Centro-Sul (CS), em azul.

4.1 Temperatura do ar

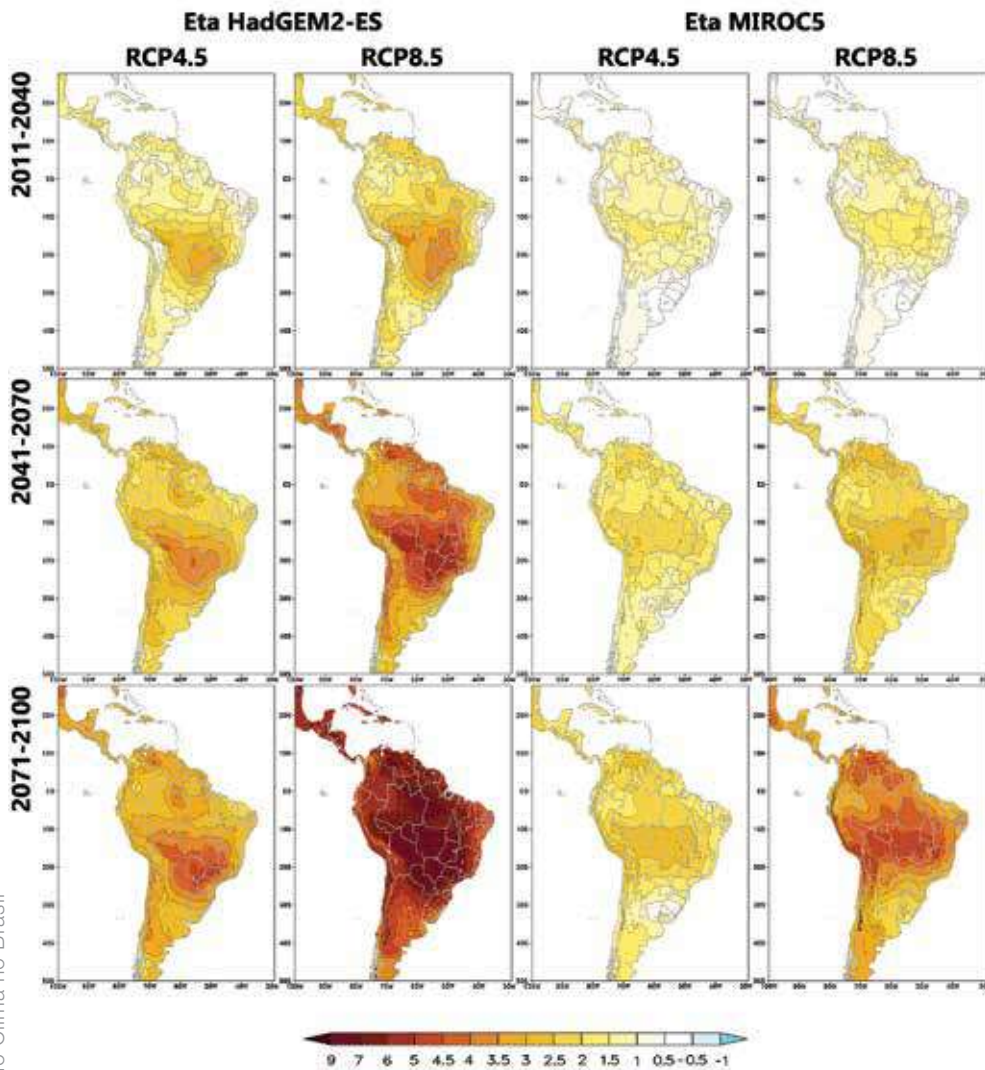
A seguir, apresentam-se as médias sazonais e a distribuição de frequência da temperatura do ar para os três períodos futuros, 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100, considerando-se os dois cenários de emissões: RCP 4.5 e RCP 8.5.

4.1.1 Médias sazonais

As figuras 7 a 10 mostram os campos das diferenças sazonais médias de temperatura do ar entre os climas futuros nos três períodos e o clima presente, respectivamente para o verão, o outono, o inverno e a primavera.

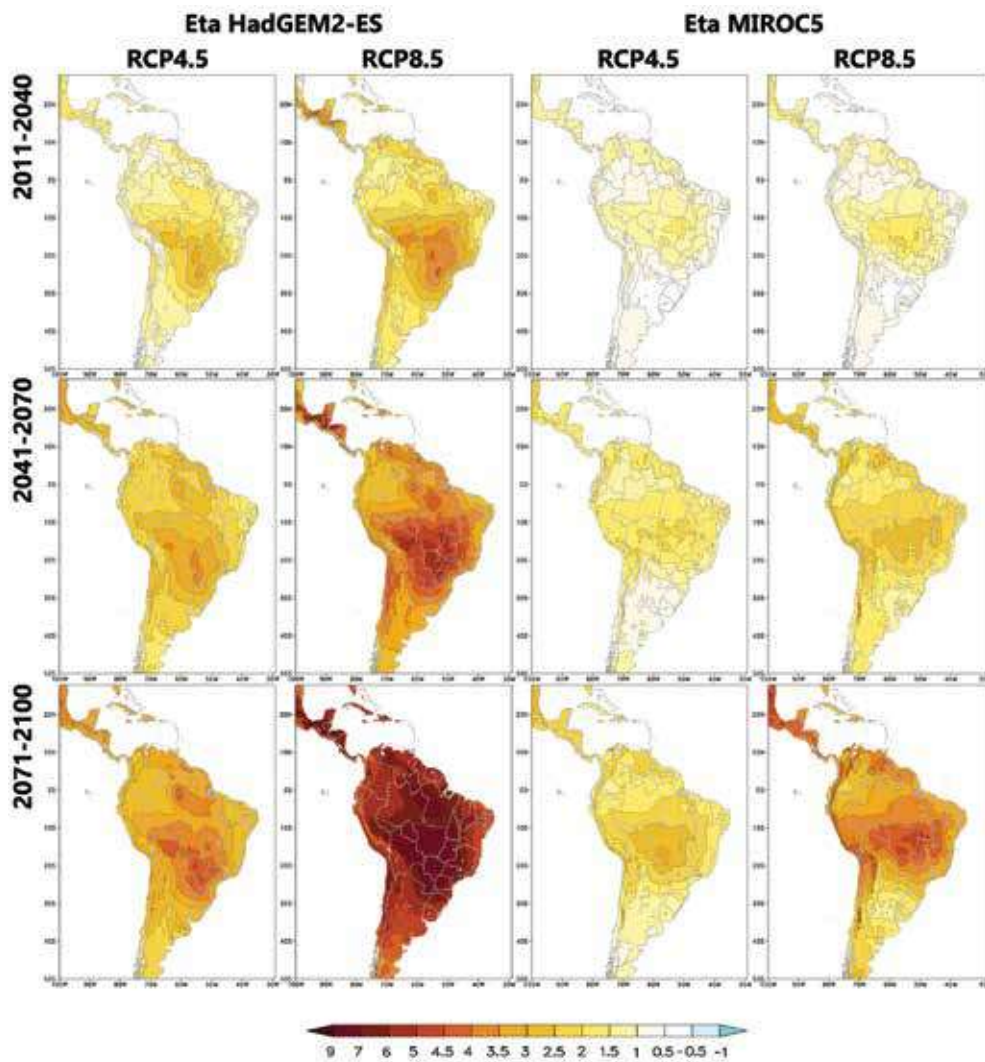
As projeções indicam aumento da temperatura continental em ambos os cenários de emissões e em todas as estações do ano, no entanto, os aumentos são mais intensos no cenário RCP 8.5. Em relação às simulações, nota-se claramente que o Eta-HadGEM2-ES é mais sensível ao aumento dos gases de efeito estufa em comparação com o Eta-MIROC5. No futuro próximo, 2011–2040, no verão austral por exemplo, o Eta-MIROC5 atinge um aquecimento de cerca de 1,5°C a 2°C, enquanto que o Eta-HadGEM2-ES atinge aumentos de até 4°C. A área mais sensível, ou seja, com maior aquecimento, está localizada na parte central e sudeste do Brasil, área essa, que apresenta alta densidade populacional, em razão, principalmente, da presença das maiores regiões metropolitanas brasileiras. À medida que a concentração de CO₂ equivalente aumenta ao longo dos anos, a área de maior aquecimento se expande em direção ao norte, atingindo a região Amazônica e grande parte do Nordeste brasileiro. No final do século 21, 2071–2100, os valores máximos das diferenças predominam em quase toda a América do Sul, incluindo também parte da América Central, com valores da ordem de 8-9°C no cenário RCP 8.5 e 3-4°C no cenário RCP 4.5, com magnitudes, em geral, semelhantes em todas as estações do ano.

Figura 7 – Diferença da temperatura média (°C) no verão (DJF), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



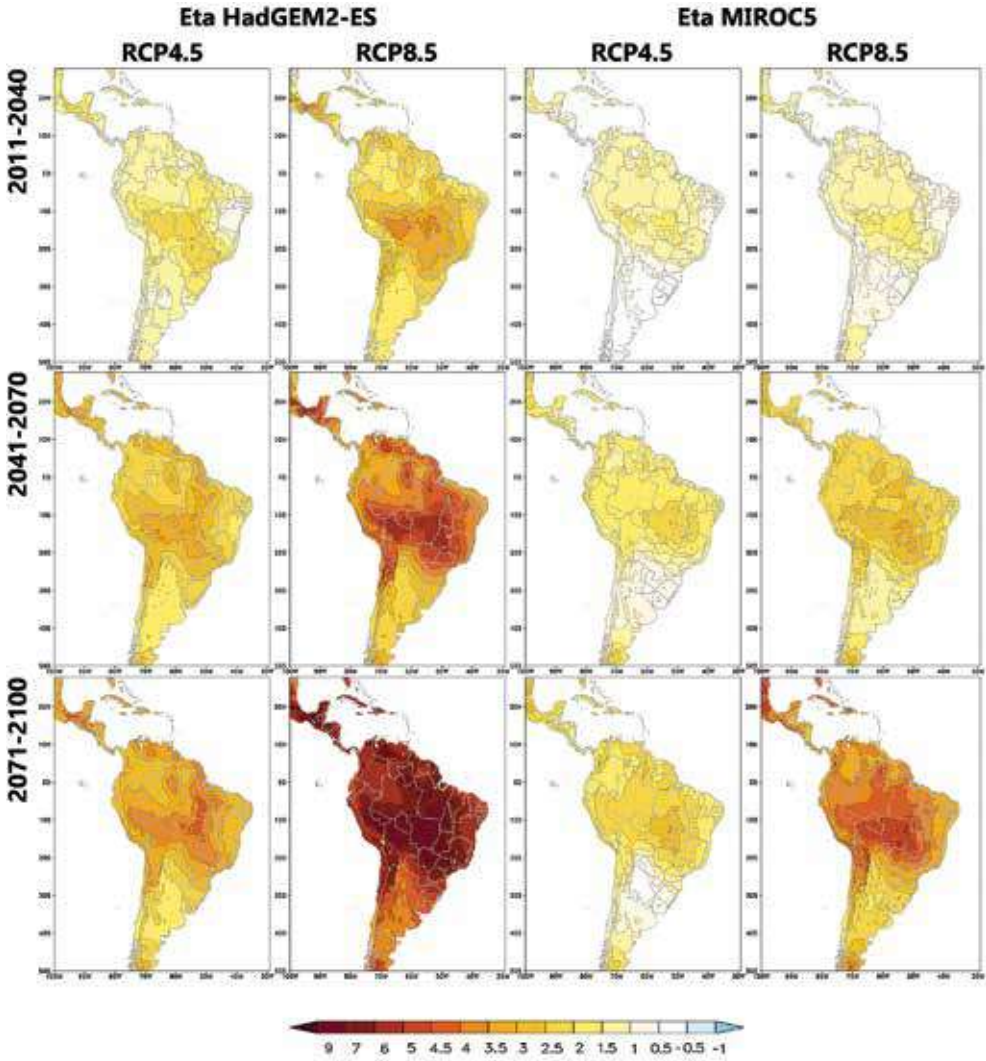
Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 8 – Diferença da temperatura média (°C) no outono (MAM), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



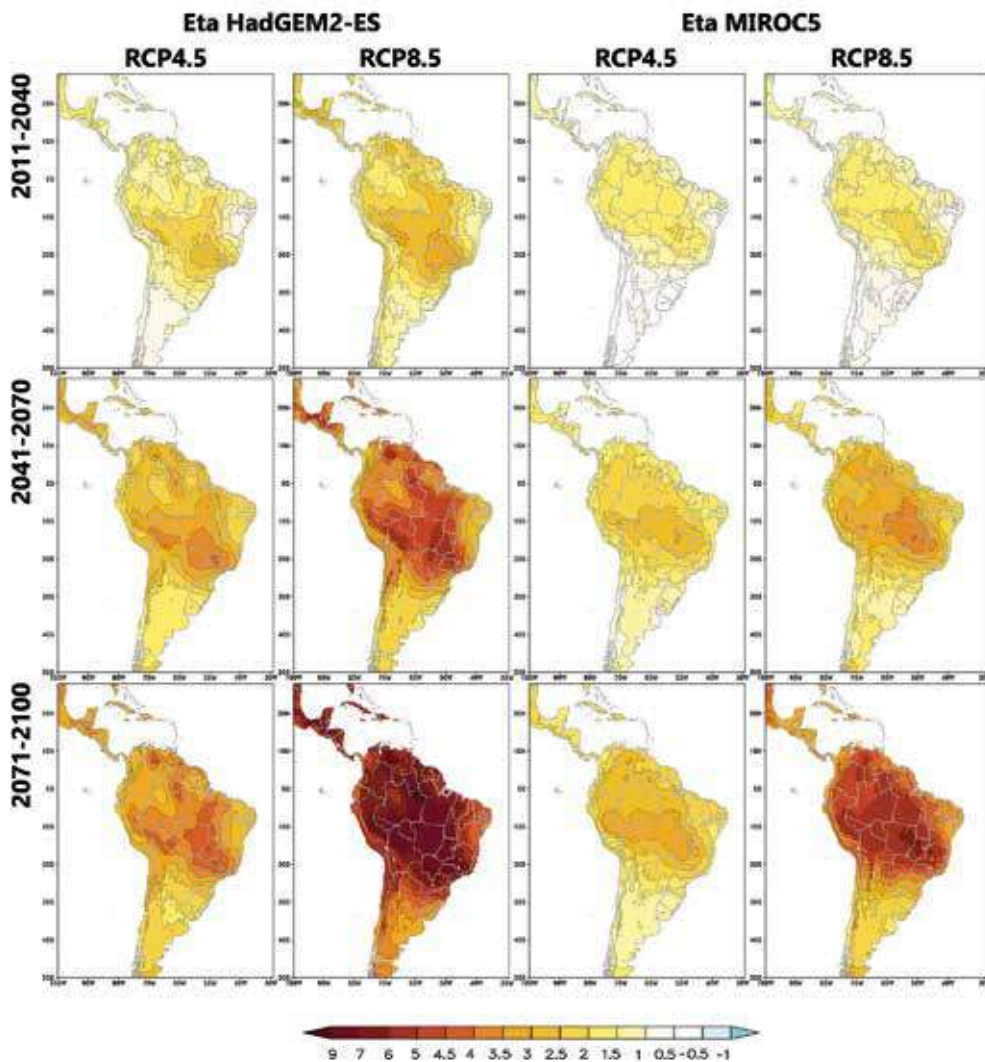
Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 9 – Diferença da temperatura média (°C) no inverno (JJA), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 10 – Diferença da temperatura média (°C) na primavera (SON), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)

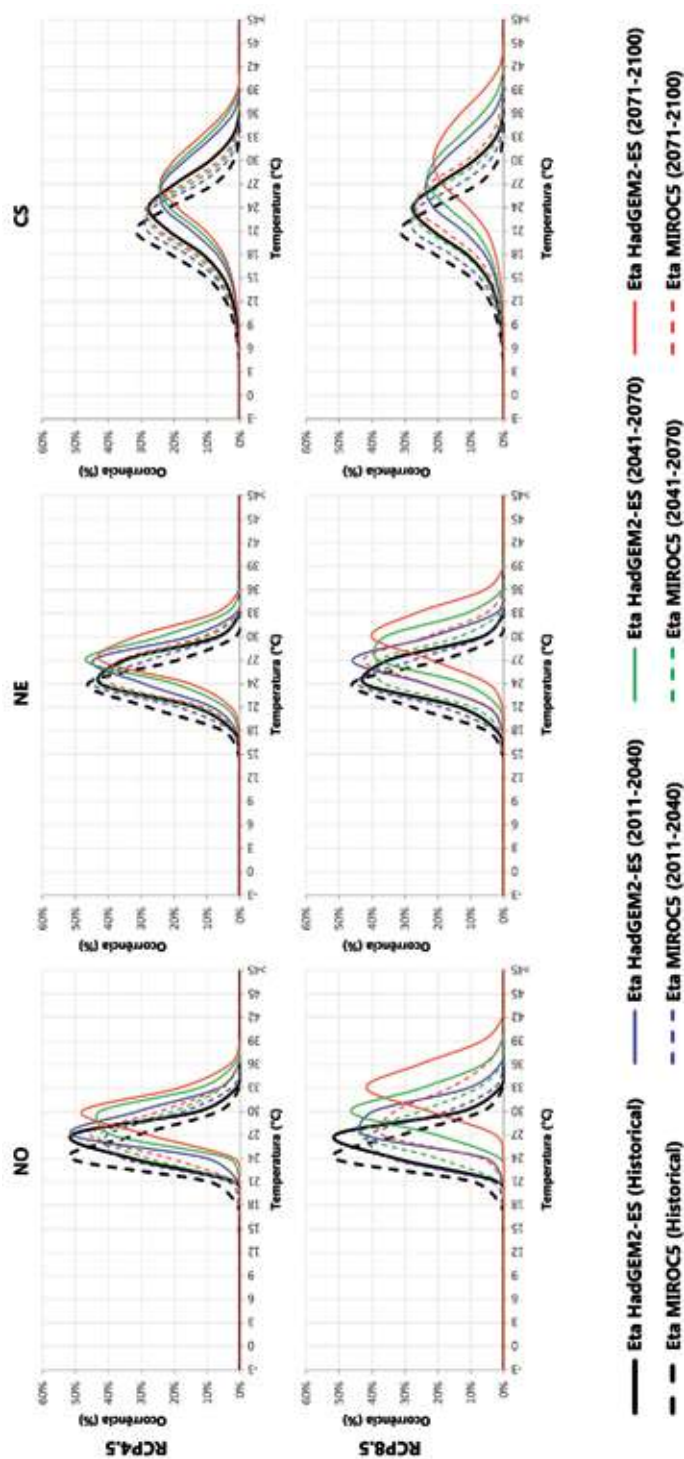


Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

4.1.2 Distribuição de frequência

As distribuições de frequência das temperaturas médias diárias para as três regiões são mostradas na figura 11. O período histórico se refere ao clima presente, de 1961 a 1990. A distribuição estreita nas regiões NO e NE reflete a menor variabilidade da temperatura na região tropical, enquanto a distribuição mais ampla no CS revela a maior variabilidade das regiões subtropicais. O deslocamento do pico de máxima frequência de ocorrência, em direção a categorias de temperaturas mais elevadas com o tempo se verifica nas três regiões avaliadas. Esse deslocamento corresponde a um aumento de cerca de 3°C no RCP 4.5 e 6°C no RCP 8.5. Além disso, surgem categorias de temperaturas mais elevadas, da ordem de 36–39°C, no cenário RCP 4.5, e de 42–45°C, no cenário RCP 8.5, no final do século para as regiões NO e CS. No NE, nota-se também a ocorrência de categorias com valores extremos de temperatura, de cerca de 33–36°C no cenário RCP 4.5 e de 36–39°C no cenário RCP 8.5.

Figura 11 – Distribuição de frequência (%) da temperatura média diária (°C), para RCP 4.5 (linha superior) e RCP 8.5 (linha inferior), para as regiões NO (esquerda), NE (centro) e CS (direita)



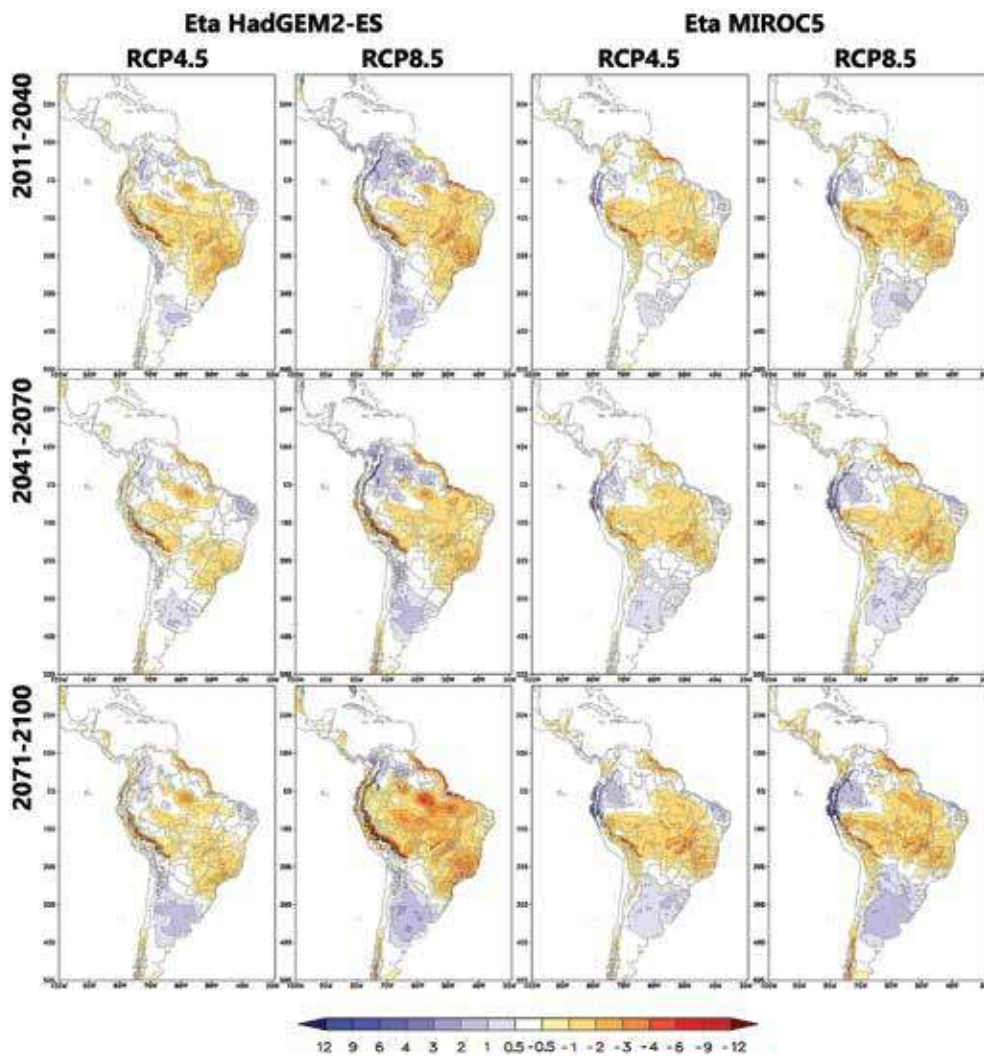
4.2 Precipitação

Assim como apresentado para temperatura do ar, analisa-se também os campos médios sazonais e a distribuição de frequência da precipitação.

4.2.1 Médias sazonais

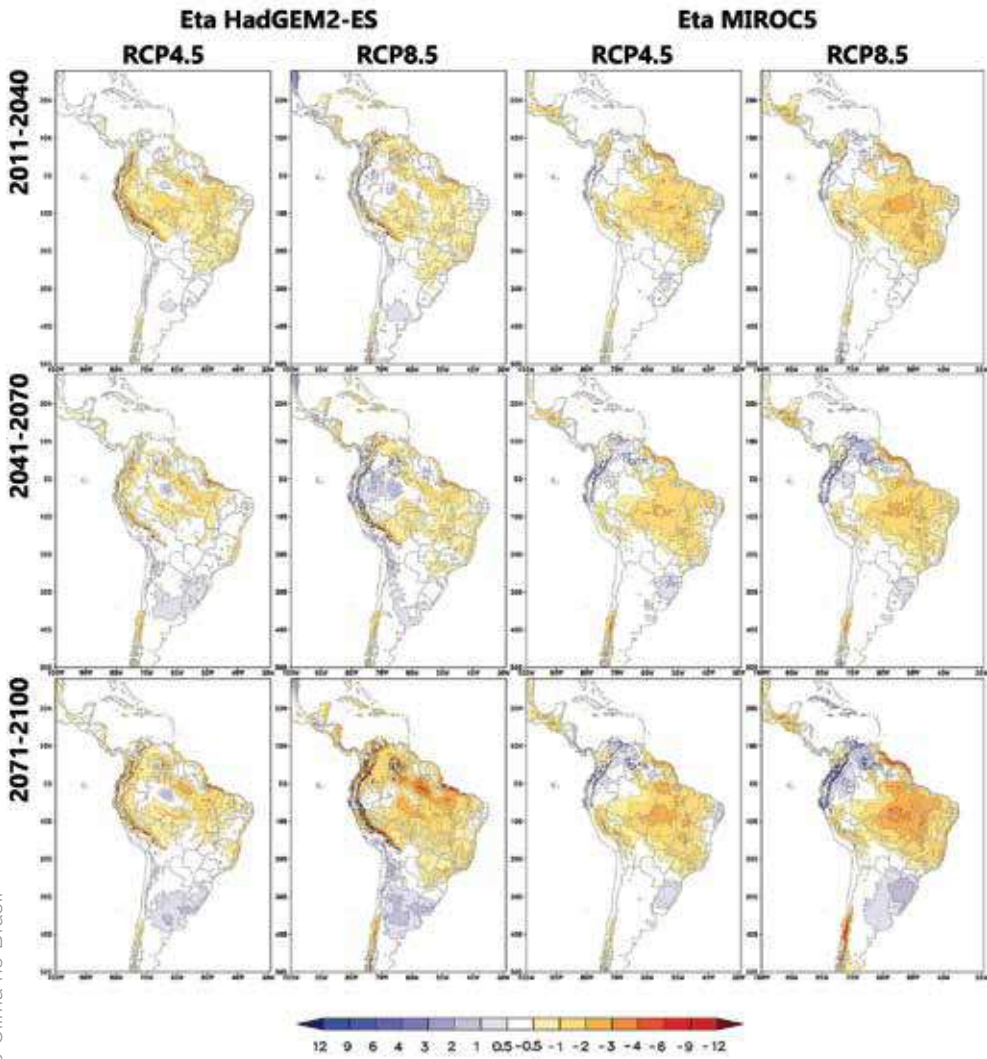
As figuras 12 a 15 apresentam os campos das mudanças na precipitação projetadas pelo modelo Eta para os três períodos futuros e para os dois cenários.

Figura 12 – Diferença da precipitação média (mm/dia) no verão (DJF), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



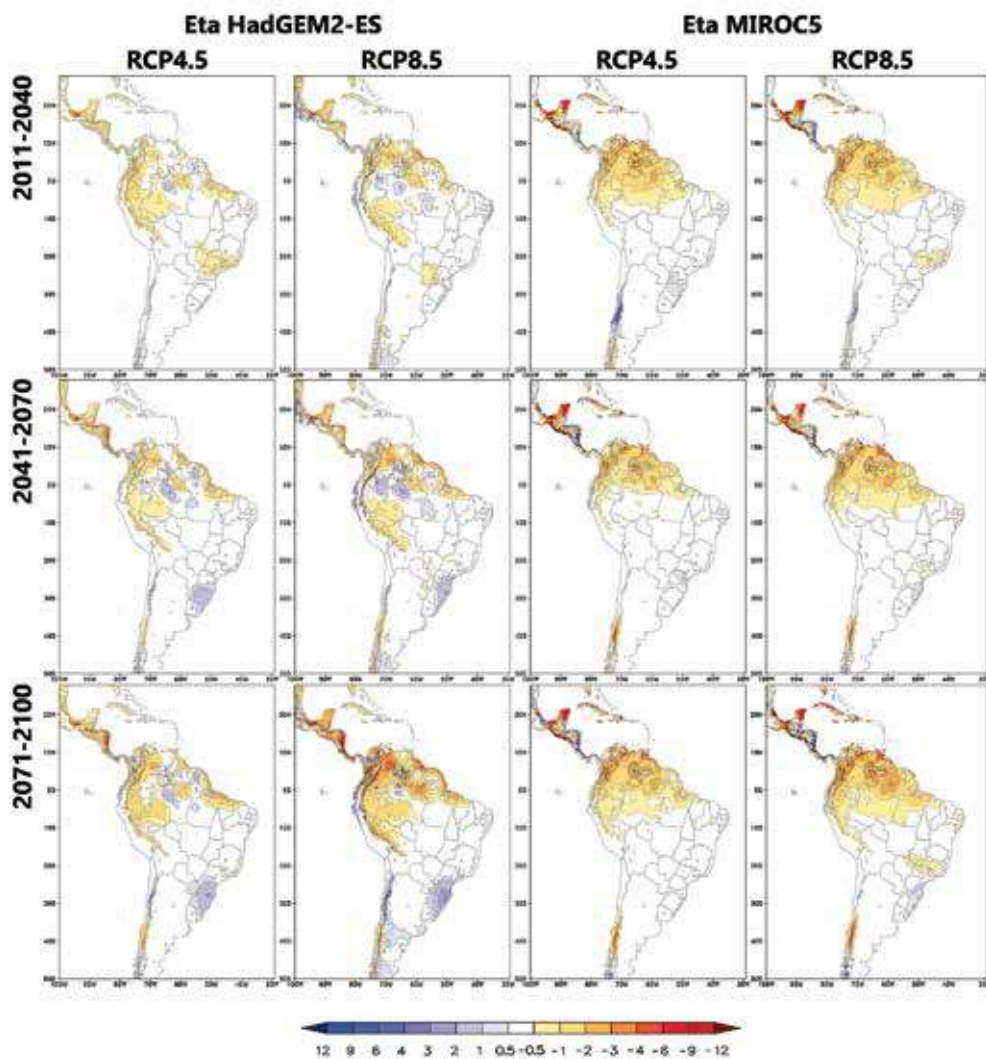
Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 13 – Diferença da precipitação média (mm/dia) no outono (MAM), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



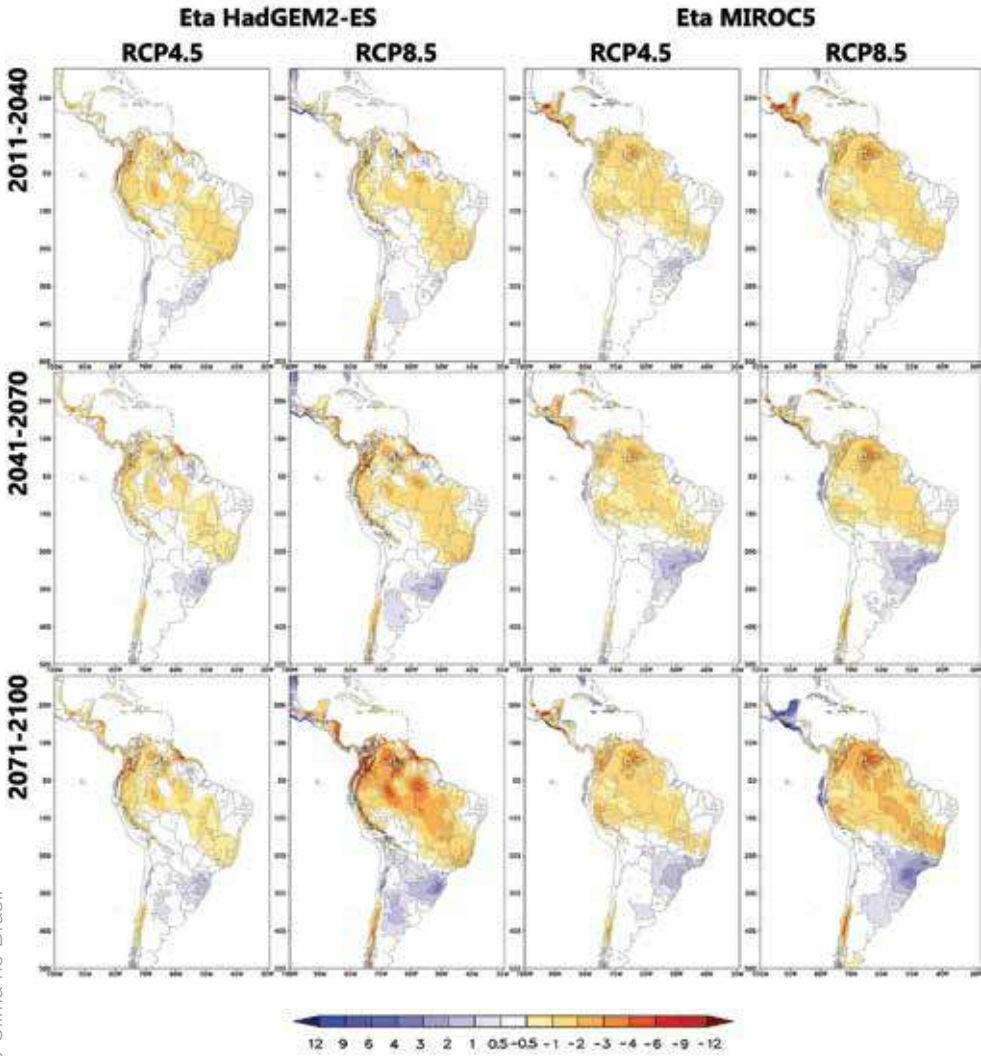
Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 14 – Diferença da precipitação média (mm/dia) no inverno (JJA), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

Figura 15 – Diferença da precipitação média (mm/dia) na primavera (SON), entre os períodos do futuro e do presente (1961–1990)



Nota: as colunas da esquerda para a direita referem-se a: (1) Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5; (2) Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5; (3) Eta-MIROC5 RCP 4.5; e (4) Eta-MIROC5 RCP 8.5. Os períodos futuros são 2011–2040 (linha superior), 2041–2070 (linha intermediária) e 2071–2100 (linha inferior).

A precipitação durante o verão é, em grande parte, associada à atuação da ZCAS. Nos anos com poucos eventos de ZCAS ou naqueles em que tal sistema não se estabelece, anomalias negativas de precipitação são observadas em grande parte do país. Nos verões de 2014 e 2015, por exemplo, anomalias de -5 mm/dia foram observadas em todo o Centro-Oeste e o Sudeste do Brasil, reduzindo os níveis de armazenamento dos grandes reservatórios de água, com graves consequências tanto para a geração de energia elétrica quanto para o consumo humano. As projeções para os três períodos futuros mostram, para o verão (figura 12), uma redução acentuada da precipitação em grande parte do país, principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, cujo período chuvoso ocorre exatamente nesta época do ano. De acordo com tais projeções, espera-se menor número de eventos ZCAS ou diminuição de sua capacidade de produzir chuvas, com consequente redução nos totais pluviométricos. Comparando-se os resultados de ambos os cenários RCPs e ambos os modelos, observa-se uma diminuição mais acentuada da precipitação no final do século (2071–2100) do que nos demais períodos em ambos os modelos. Além disso, no cenário RCP 8.5, a redução da precipitação é mais acentuada do que aquela observada com a utilização do cenário RCP 4.5. A simulação do Eta-HadGEM2-ES apresenta diminuição mais forte da chuva do que o Eta-MIROC5. Utilizando o Eta-MIROC5 e o cenário RCP 8.5, nota-se no final do século (2071–2100) reduções de chuva superiores a 4 mm/dia em grande parte do Brasil central e da região Sudeste, atingindo até mesmo a região Sul. Isso indica que os verões no final do século podem ser semelhantes aos ocorridos em 2014 e 2015.

Por outro lado, diferenças positivas de precipitação no verão são observadas no sudeste da América do Sul, incluindo principalmente o Rio Grande do Sul, o Uruguai e o centro da Argentina. Valores em torno de $+2$ mm/dia são notados no Eta-HadGEM2-ES e no Eta-MIROC5 com ambos os cenários, desde 2011–2040 até 2071–2100, contudo abrangendo uma área maior no cenário RCP 8.5 e no final do século (2071–2100). No Eta-MIROC5 com RCP 8.5, verifica-se, em 2071–2100, expansão da área com aumento da precipitação, nas regiões desde Bahia Blanca na Argentina até o sul do Paraná e também todo o Paraguai.

Um aumento da precipitação no verão também é observado no noroeste da região amazônica, sendo mais pronunciado e abrangendo maior área em 2011–2040 e 2041–2070 no Eta-HadGEM2-ES e no cenário RCP 8.5, com valores em torno de +3 mm/dia. Na parte norte da região Nordeste do Brasil, ocorre também aumento da precipitação no futuro em todas as projeções, exceto para o Eta-HadGEM2-ES no RCP 8.5, que mostra redução da precipitação em toda essa região.

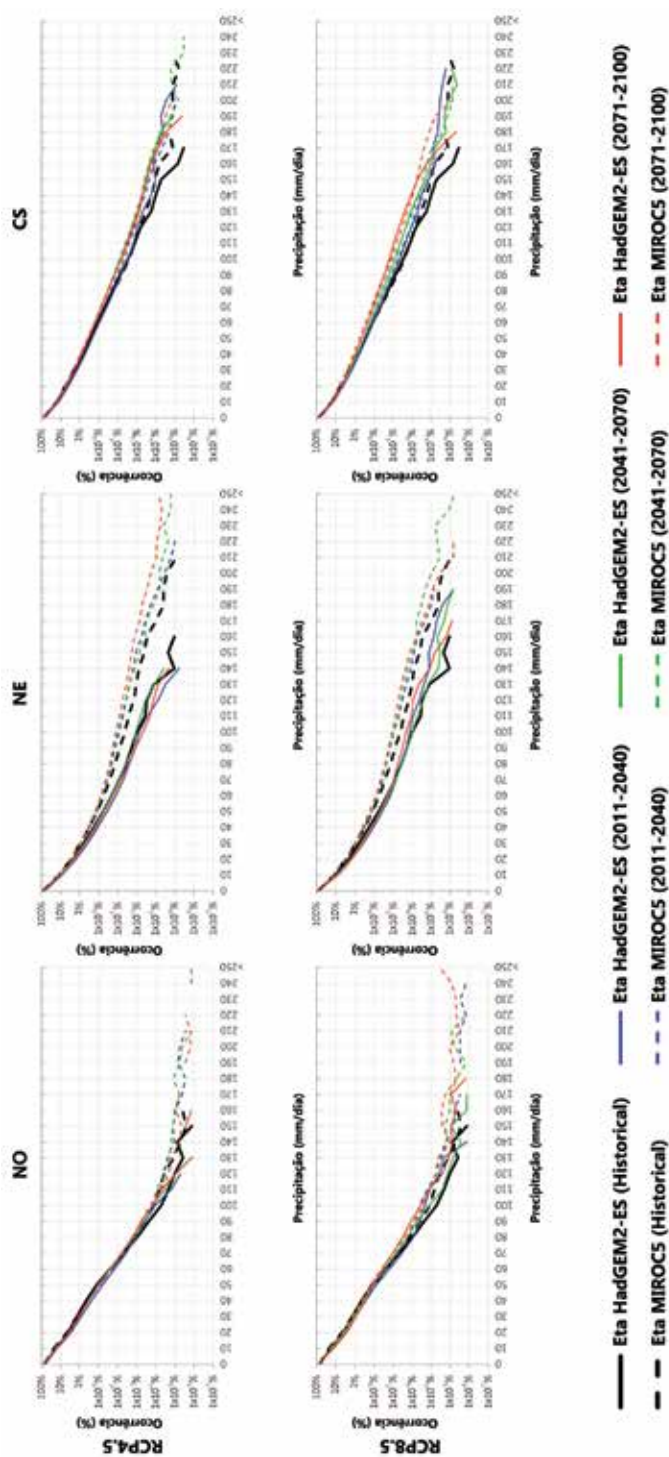
No outono (figura 13) e na primavera (figura 15), o padrão de diferenças de precipitação entre o futuro e o presente é semelhante à estação do verão, com redução da precipitação nas regiões Sudeste e Centro-Oeste e no leste da região Norte, e com aumento da precipitação no sudeste da América do Sul. No noroeste da região amazônica, o aumento de chuva projetado no verão permanece durante o outono para os períodos de 2041–2070 e 2071–2100 apenas com Eta-MIROC5. No extremo norte da região Nordeste do Brasil, predominam diferenças negativas durante o outono e valores próximos a normalidade na primavera.

No inverno (figura 14), que é o período seco para a maior parte do país, observa-se redução da precipitação no noroeste da América do Sul, principalmente no final do século (2071–2100) e no RCP 8.5. Para o Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5, no período de 2071–2100, observa-se reduções de precipitação superiores a -1 mm/dia atingem todo o noroeste da América do Sul, estendendo-se até o Amazonas e o Pará. Ainda no inverno, projeta-se aumento da precipitação na região Sul do Brasil, mas apenas nas simulações do Eta-HadGEM2-ES e a partir da década de 2040.

4.2.2 Distribuição de frequência

A distribuição de frequência da precipitação diária para as regiões NO, NE e CS é apresentada na figura 16. O eixo logaritmo linear é aplicado às curvas de distribuição da precipitação de forma a suavizar as taxas de precipitação mais elevadas que são muito menos frequentes do que as categorias de precipitação mais fracas. De forma geral, projeta-se maior frequência de eventos diários com chuvas intensas (superiores a aproximadamente 100 mm/dia) no futuro do que no presente, principalmente

Figura 16 – Distribuição de frequência (%) da precipitação diária (mm/dia), para RCP 4.5 (linha superior) e RCP 8.5 (linha inferior), para as regiões NO (esquerda), NE (centro) e CS (direita)



no cenário RCP 8.5. Assim, apesar da redução geral nos totais pluviométricos na região CS durante o verão, eventos de chuvas intensas podem ser mais frequentes no futuro do que no presente. De modo geral, o Eta-MIROC5 produz eventos mais intensos de chuva do que o Eta-HadGEM2-ES, principalmente no NE, em que, no futuro, ocorrem chuvas superiores a 250 mm/dia, enquanto, de acordo com o Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5 só chegam a 190 mm/dia. No evento de abril de 2010 ocorrido no Rio de Janeiro, foi totalizado 323 mm de chuva no Sumaré entre os dias 5 e 6. Em janeiro de 2011, no evento da região Serrana do Rio de Janeiro o total pluviométrico diário chegou a 243 mm/dia. Esses exemplos mostram que, apesar de raros, já no clima atual, ocorrem grandes acumulados de precipitação diária, superiores a 250 mm no CS.

5 Considerações finais

Neste capítulo, apresentou-se uma avaliação das simulações elaboradas com modelo regional Eta aninhado aos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 no clima presente (1961–1990) e também uma análise das projeções elaboradas com Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o futuro nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

As avaliações das simulações no clima presente mostram que a sazonalidade da temperatura do ar e da precipitação são bem representados pelo modelo, contudo existem diferenças entre as simulações e a observação. A temperatura é subestimada pelo modelo, principalmente quando aninhado ao MIROC5. No Eta-HadGEM2-ES, ocorre superestimativa da temperatura sobre a região do Chaco (norte da Argentina, Bolívia e Paraguai) no verão e no outono. Em relação a precipitação, ocorre em geral uma subestimativa da chuva no verão, principalmente quando o modelo Eta é aninhado ao HadGEM2-ES. No inverno e na primavera, ocorre em geral uma superestimativa das chuvas, principalmente no litoral das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

As simulações futuras mostram um clima mais quente em toda a América do Sul. Os máximos de aquecimento se localizam na região Centro-Oeste do Brasil em todas as estações do ano e, até o final do século, se estendem para as regiões Norte, Nordeste e Sudeste. No final do século, esses máximos de aquecimento

podem variar entre 2° e 8°C. Com relação a precipitação as projeções indicam clima mais seco no verão na maior parte do Brasil, com máximos de redução nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. Essa redução é notada em todos os períodos futuros. Aumentos da precipitação são projetados no norte do Nordeste e no Sul do Brasil.

Os resultados aqui destacados devem ser utilizados com cautela, visto o reduzido número de simulações (quatro), o aspecto caótico da atmosfera e as incertezas nas gerações dos cenários. Uma forma de considerar as incertezas seria incluir simulações forçadas por mais alguns modelos globais ou mesmo aumentar o número de membros dos modelos globais utilizados neste trabalho, a exemplo dos trabalhos de Chou *et al.* (2012) e Marengo *et al.* (2012).

O modelo regional Eta está em constante desenvolvimento. Detalhamento ainda maior, atingindo-se uma escala local, pode ser obtido a partir da versão não-hidrostática na resolução horizontal de 5 km do modelo. Esse detalhamento permite estudos com discretização em nível municipal. Mudanças no modelo Eta com relação ao tratamento da radiação atmosférica (CAMPOS, 2015), a introdução de dinâmica da vegetação (LYRA, 2015) e inclusão de descrição mais detalhada da superfície (PILOTTO, 2015) são exemplos de desenvolvimentos que podem estender a capacidade do modelo em realizar estudos mais aprimorados das mudanças climáticas, em particular sobre a América do Sul.

Referências

ALVES, L.F.; MARENGO, J.A.; CHOU, S.C. Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo Eta climático sobre o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Fortaleza: CBMET, 2004. Disponível em: <http://www.cbmec.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=2&totalRows_Recordset_busca=694&cgid=22&imageField2.x=34&imageField2.y=7>. Acesso em: 5 set. 2015.

BETTS, A. K.; MILLER, M. J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 693-709, 1986. doi: 10.1002/qj.49711247308.

BLACK, T. L. NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast samples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0434%281994%29009%3C0265%3ATNNM%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 5 set. 2015.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. **Second National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Brasília, DF: MCTI, 2010. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215071.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.

BUSTAMANTE, J. *et al.* Evaluation of April 1999 rainfall forecasts over South America using the Eta Model. **Revista Climanalise**, São José dos Campos, v. 1, n. 1, 1999. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/Eta_forecast_april99.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.

BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J. L.; CHOU, S. C. 5-year Eta Model seasonal forecast climatology over South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: American Meteorological Society, 2006. p. 503-506.

_____. Influência da temperatura da superfície do mar sobre as previsões climáticas sazonais do modelo regional Eta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. p. 2145-2152.

CAMPOS, D. A. **Simulações do modelo Eta utilizando dois esquemas de radiação em condições de céu claro**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JNMBR2>>. Acesso em: 5 set. 2015.

CHEN, F.; JANJIC, Z.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta numerical model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 85, n. 3, p. 391-421, 1997. doi: 10.1023/A:1000531001463.

CHOU, S. C. *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3, p. 635-653, 2012. doi: 10.1007/s00382-011-1002-8.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005. doi:10.5194/npg-12-537-2005.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014a. doi: 10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S. C. *et al.* Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014b. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043.

CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A. Extended range forecasts over South America using the regional eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D8, p.10147-10160, 2000. doi: 10.1029/1999JD901137.

CHRISTENSEN, J. H. *et al.* Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: STOCKER, T. F. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, p. 1217–1308, 2013.

COLLINS, W. J. *et al.* Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011. doi: 10.5194/gmd-4-1051-2011.

COX, P. M. Description of the “TRIFFID” Dynamic Global Vegetation Model. **Hadley Centre Technical Note 24**, Hadley Centre, Met Office, Bracknell, UK, 2001. Disponível em: <http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/9/h/HCTN_24.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553-597, 2011. doi: 10.1002/qj.828.

EK, M. *et al.* Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D22, p. 8851-8867, 2003. doi: 10.1029/2002JD003296.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 32, n. 7, p. 1475–1488, 1975. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<1475:TSEAAAN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<1475:TSEAAAN>2.0.CO;2)>.

FLATO, G. *et al.* Evaluation of Climate Models. In: STOCKER, T. F. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, p. 741-866, 2013.

GIORGI, F. *et al.* Regional climate information – Evaluation and Projections. **IPCC WGI Third Assessment Report**, p. 583-638, 2001. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/tar-10.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.

HASUMI, H. CCSR Ocean Component Model (COCO) Version 4.0. **CCSR Report. Centre for Climate System Research**, 2007. Disponível em: <<http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~hasumi/COCO/coco4.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CHANGE CLIMATE. **Summary for Policymakers, Special Reports on Emission Scenarios – SRES: A Special Report of Working Group III**. New York: Cambridge Univ. Press., 2000.

_____. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report**. Brussels: fev. 2007.

_____. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report**. Brussels: 2013.

KOUSKY, V. E. Pentad Outgoing Longwave Radiation Climatology for the South American Sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 1, p. 217-231, 1988. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=394&id_arquivo=654>. Acesso em: 5 set. 2015.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. A. Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 31, p. 118-133, 1974. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2)>. Acesso em: 5 set. 2015.

LYRA, A. A. **Estudo de vulnerabilidade do bioma Amazônia aos cenários de mudanças climáticas**. 2015. 128 p. Dissertação (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3K3ATEL>>. Acesso em: 5 set. 2015.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade – Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. v. 1. p. 214.

MARENGO, J. A. *et al.* Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012. doi: 10.1007/s00382-011-1155-5.

MESINGER, F. *et al.* The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<1493:TSMCMD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<1493:TSMCMD>2.0.CO;2)>.

MESINGER, F. *et al.* An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3, p. 63-79, 2012. doi: 10.1007/s00703-012-0182-z.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-1990 Mean Monthly Terrestrial Climatology. **Journal of Climate**, v. 12, p. 829-856, 1999. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<0829:RTCSTC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<0829:RTCSTC>2.0.CO;2).

NUMAGUTI, A. *et al.* Study on the climate system and mass transport by a climate model. **Supercomputer monograph report**, v. 3, p. 101, 1997. Disponível em: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39072468. Acesso em: 5 set. 2015.

OYAMA, D. M. Erros sistemáticos no clima da região tropical da América do Sul simulado pelo modelo regional MM5 em baixa resolução horizontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2006. Disponível em: http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=118&cid_arquivo=62. Acesso em: 5 set. 2015.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (Eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014. 464 p.

PESQUERO, J. F. *et al.* Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 75-93, 2009. doi: 10.1007/s00704-009-0123-z.

PILOTTO, I. **Representação dos efeitos de heterogeneidades da superfície sobre o clima local em uma região de paisagem fragmentada na Amazônia utilizando o modelo Eta/NOAH-MP**. 2015. 182 p. Dissertação (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JU9JU8>. Acesso em: 5 set. 2015.

SOUZA, S. S. **Impactos Climáticos Regionais da Mudança de Vegetação no Semi-árido do Nordeste Brasileiro**. 2006. 209 p. Dissertação (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/06.12.13.47>. Acesso em: 5 set. 2015.

TAIKAN, O.; SUD, Y. C. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) – A Global River Channel Network. **Earth Interact**, v. 2, p. 1-37, 1988.

UPPALA, S. M. *et al.* The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, p. 2961-3012, 2005. doi: 10.1256/qj.04.176.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. **Climate Change**, v. 109, p. 95-116, 2011a. doi: 10.1007/s10584-011-0152-3.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: An overview. **Climate Change**, v. 109, p. 5-31, 2011b. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.

WATANABE, M. *et al.* Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. **Progress in Physical Geography**, v. 21, p. 530-548, 1997. doi: 10.1177/030913339702100403.

ZHAO, Q.; BLACK, T. L.; BALDWIN, M. E. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 697-712, 1997. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2)>.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia Inovação, por meio de financiamento do *Global Environmental Facility* (UNDP/BRA/10/G32), e apoio adicional da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Agradecimentos a Martin Juckes, do *British Atmospheric Data Centre*, pela disponibilização dos dados do HadGEM2-ES e a Seita Emori e Tokuta Yokohata, do *National Institute for Environmental Studies*, do Japão, pela disponibilização dos dados MIROC5. A primeira autora agradece ao CNPq pela bolsa PQ308035/2013-5.



Mudanças climáticas e a cobertura vegetal nativa: impactos em um país megadiverso e seus biomas

Marina Zanin

Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia/Museu Paraense Emílio Goeldi

Geiziane Tessarolo

Departamento de Ecologia/Universidade Federal de Goiás (UFG)

Nathália Machado

Departamento de Ecologia/Universidade Federal de Goiás (UFG)

Ana Luisa Mangabeira Albernaz

Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia/Museu Paraense Emílio Goeldi

Resumo

A alteração global do clima é considerada uma das principais ameaças futuras à biodiversidade, por isso, compreender seus efeitos é um dos grandes desafios da atualidade. Dessa forma, investigou-se os efeitos das mudanças futuras no clima sobre a cobertura da vegetação nativa do solo brasileiro, assumindo-a como um substituto para a biodiversidade. As análises utilizadas envolveram a reclassificação da cobertura nativa do solo em grupos que apresentam nichos climáticos únicos, a seleção do método de predição de distribuição baseado em nicho climático mais robusto e, por fim, a predição da distribuição para cenários futuros. De acordo com suas similaridades climáticas, as coberturas nativas do solo foram agrupadas em duas classes gerais: formações florestais e vegetações abertas. Observou-se que as alterações no clima futuro podem levar à retração do nicho climático das formações florestais e à expansão das vegetações abertas. Essas alterações atingem diferentemente os biomas brasileiros. Os biomas Caatinga e Cerrado apresentam maior estabilidade climática e, conseqüentemente, na distribuição da cobertura nativa do solo. Dessa forma, do ponto de vista conservacionista, eles podem ser considerados os de menor preocupação. Por outro lado, a Mata Atlântica apresenta regiões de estabilidade climática, mas também regiões vulneráveis. O total de área vulnerável do bioma é grande se levarmos em consideração o total de remanescente florestal, tornando esse bioma bastante vulnerável às mudanças no clima futuro. A Amazônia é o bioma mais ameaçado pelas mudanças no clima, pois é predita uma extensa retração do nicho climático das coberturas nativas do solo, especialmente na região oriental. Os efeitos negativos da mudança no clima podem, ainda, agir de forma sinérgica com outras mudanças de natureza antrópica, como a perda e fragmentação de habitats, com impactos possivelmente catastróficos à conservação da biodiversidade brasileira.

Palavras-chave: Brasil. Formações florestais. Vegetações abertas. Modelagem de distribuição potencial. Nicho ecológico. Mudança climática.

1 Introdução

O declínio da biodiversidade mundial atingiu proporções alarmantes, com taxas somente comparáveis às registradas nas grandes extinções em massa do passado (PIMM *et al.*, 2014). Dentre as causas de perda da diversidade biológica, destacam-se a perda de hábitat, a fragmentação, a caça e a invasão de espécies exóticas (IUCN, 2013). No entanto, nos últimos anos a alteração global do clima, resultante principalmente de atividades antrópicas, emerge como uma nova causa e de grande relevância (DAWSON *et al.* 2011; BELLARD *et al.*, 2012; CAHILL *et al.*, 2012).

Devido à importância e à complexidade do tema, tem sido produzido um vasto conhecimento sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre diferentes porções da biodiversidade, em trabalhos que focam desde processos e padrões de taxa *alvos* (FORREST *et al.*, 2012) a biomas (FALEIRO *et al.*, 2013; LEMES *et al.*, 2013) e, até mesmo, todo o globo (FODEN *et al.*, 2013). Esses trabalhos demonstram que diferentes respostas ecológicas podem surgir em consequência das alterações climáticas, tais como migração ou deslocamento da distribuição das espécies para locais com condições mais adequadas (HICKLING *et al.*, 2006), adaptações às novas condições (MØLLER *et al.*, 2008) ou, ainda, extinções (CAHILL *et al.*, 2012).

A principal abordagem utilizada nesses trabalhos consiste no uso de modelos de distribuição geográfica, que foram desenvolvidos e aplicados principalmente ao estudo de padrões de espécies (ARAÚJO; NEW, 2007; RANGEL; LOYOLA, 2012; FORDHAM *et al.*, 2013). Isso porque o principal conceito trabalhado nessas extrapolações é o de nicho ecológico fundamental, no qual o espaço ecológico potencialmente adequado é projetado em uma área geográfica representada em um mapa (ELITH; LEATHWICK, 2009). O uso de modelagem de distribuição tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, especialmente pela facilidade de obter dados ambientais que viabilizam o estudo de padrões de distribuição das espécies, mesmo para cenários futuros como os de mudanças climáticas (ELITH; LEATHWICK, 2009). O amplo uso dessa ferramenta levou ao desenvolvimento de novas técnicas que, por sua vez, permitem aos pesquisadores inovar

nas abordagens de seus trabalhos e modelar não só a distribuição das espécies, mas também distribuição de traços ecológicos (THUILLER *et al.*, 2006) e diversidade (FODEN *et al.*, 2013).

Embora essas inovações sejam bastante importantes, elas estão sujeitas a qualidade dos dados, sejam eles climáticos ou biológicos. Dessa forma, um dos maiores desafios para compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade está na obtenção de dados de qualidade. Esse é o atual cenário do Brasil, um país de amplo território e destacada biodiversidade, que possui uma grande lacuna de conhecimento sobre a distribuição e a ecologia de suas espécies. Além disso, o conhecimento existente possui viés taxonômico e espacial, sendo espécies de vertebrados terrestres e regiões próximas a grandes centros urbanos os mais conhecidos (LEWINSOHN; PRADO, 2002). Essa é uma grande preocupação do ponto de vista da conservação, já que a ausência de conhecimento sobre a biodiversidade nacional dificulta avaliações mais precisas sobre os processos envolvidos em sua manutenção, e pode sofrer efeitos catastróficos por causa das mudanças no clima.

Embora seja foco de muitos estudos no momento, os efeitos da mudança no clima sobre a biodiversidade são ainda amplamente desconhecidos, apesar de serem reconhecidamente negativos para a maioria das espécies (HELSEY; LAI, 2004; KITCHENER *et al.*, 2006). Esses efeitos podem ainda ser diferenciados de acordo com a região e com a escala de interpretação dos processos de mudança. O Brasil possui seis biomas – Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampas e Pantanal –, que possuem diferentes regimes de uso do solo, densidade humana e leis para garantir a conservação ambiental. Dessa forma, cada bioma brasileiro pode estar sob diferente intensidade de impacto devido às mudanças no clima.

Com o intuito de compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade brasileira, utilizou-se um eficiente e atual arcabouço conceitual e analítico fundamentado em ferramentas de modelagem de distribuição baseado em nicho (figura 1). Além disso, em razão da dificuldade de obter dados satisfatórios sobre toda a biodiversidade, utilizou-se a cobertura do solo nativa como um substituto (*surrogate*, em inglês) da biodiversidade do país.

A cobertura do solo pode caracterizar habitats para muitas espécies e, portanto, pode ser considerado um bom indicador da biodiversidade brasileira. Há uma clara relação entre o padrão de distribuição da cobertura do solo e os regimes de chuva e temperatura, mostrando seu potencial de ser predito por variáveis climáticas, bem como de ser afetado pelas alterações futuras no clima (RICHARDS, 1996; ABER; MELILLO, 2001). Adicionalmente, o uso da cobertura nativa do solo evita o viés taxonômico e espacial do conhecimento existente sobre a biodiversidade brasileira. Dessa forma, estudar os efeitos das mudanças climáticas sobre a cobertura nativa do solo é uma eficiente abordagem para inferir padrões gerais sobre a biodiversidade.

Neste capítulo, descreve-se e quantifica-se os efeitos futuros da mudança no clima sobre as coberturas nativas do solo no Brasil, bem como mapeia-se as áreas mais vulneráveis e que precisam de mais atenção em relação a estratégias de conservação. Em virtude das particularidades de cobertura vegetal e uso do solo de cada bioma brasileiro, sumariza-se também os impactos previstos para cada bioma, contribuindo diretamente para o delineamento de estratégias de conservação regional.

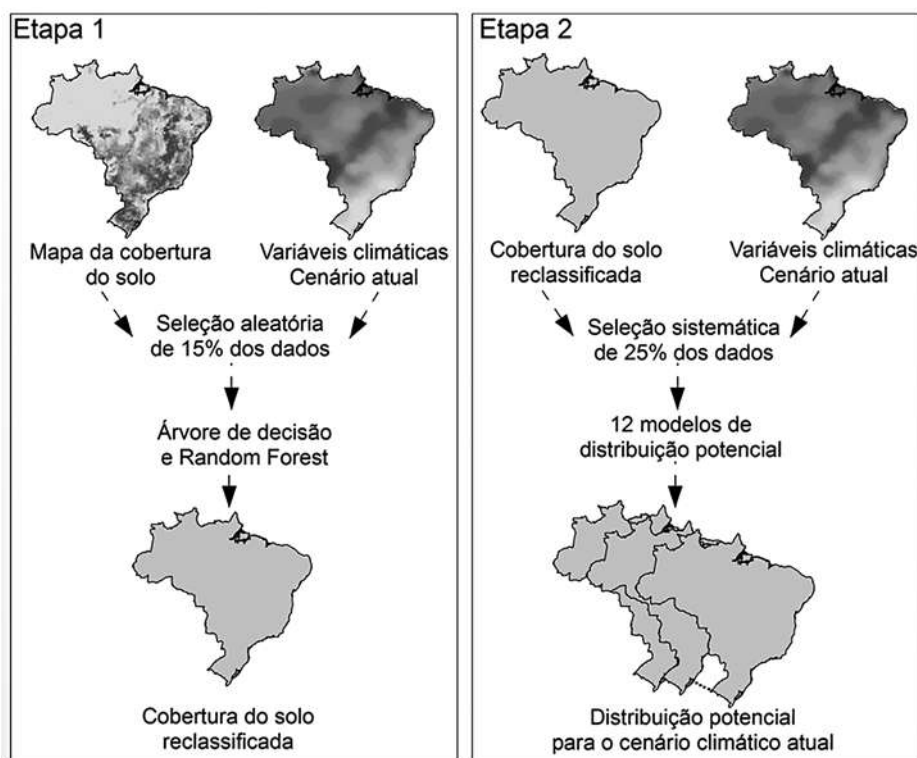
2 Métodos

2.1 Área de estudo e processamento dos dados

Este trabalho foi desenvolvido para os limites do território brasileiro, que totaliza mais de 8.500.000 km². Os dados sobre a distribuição da cobertura vegetal atual foram obtidos da base de dados *GlobCover* (disponível em: <<http://due.esrin.esa.int/globcover>>), que tem sido uma das principais fontes de dados usados em estudos ecológicos. O *GlobCover* é coordenado pela Agência Espacial Europeia (ESA) e disponibiliza dados sobre a cobertura vegetal global em resolução de 300 m, derivados de séries temporais do sensor *Meris* (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) (BONTEMPS *et al.*, 2011). As classes de cobertura vegetal são definidas de acordo com sistema de classificação de cobertura da terra (LCCS – *Land Cover Classification System*, na sigla em inglês) e totalizam 22 classes para todo o globo, 18 delas ocorrendo no Brasil.

Os dados climáticos do presente consistiram em 19 variáveis obtidas a partir do *WorldClim – Global climate data* (<www.worldclim.com>; tabela 1). Os dados do clima atual consistem em uma interpolação a partir de dados de estações meteorológicas fixas e distribuídas por todo o globo (HIJMANS *et al.*, 2005). Já os dados climáticos futuros consistiram de extrapolações derivadas do modelo climático global HadGEM2-ES do IPCC AR5 (disponível em: <<http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models>>), para cenários de emissão RPC 4.5 e 8.5 e para os anos de 2050 e 2070. Tais cenários são baseados na evolução de emissões de forçantes radioativas (RF). O cenário RCP 4.5 corresponde a emissões média-baixas, enquanto que o cenário RCP 8.5 corresponde a altos valores de emissões, alcançando estabilidade de 4.2 e 8.3W² de emissão em 2100, respectivamente.

Figura 1 – Abordagem metodológica adotada neste trabalho para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a cobertura nativa do solo no Brasil



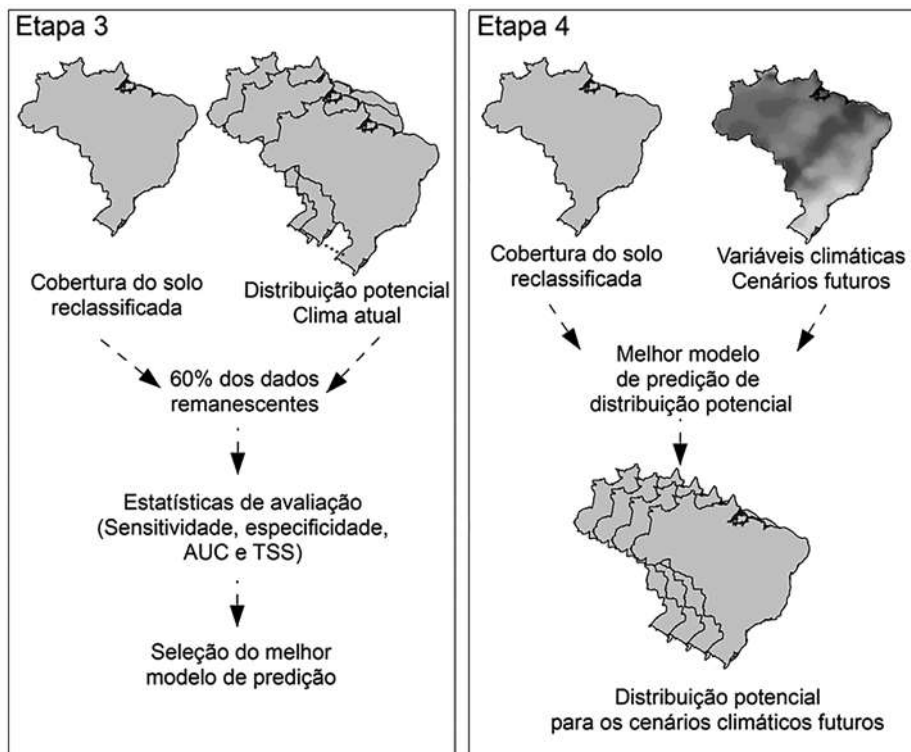


Tabela 1 – Variáveis climáticas utilizadas neste trabalho

Variável	Sigla
Média da temperatura anual	Bio1
Amplitude da média diurna	Bio2
Isotermalidade	Bio3
Sazonalidade da temperatura	Bio4
Temperatura máxima do mês mais quente	Bio5
Temperatura mínima do mês mais frio	Bio6
Amplitude anual da temperatura	Bio7
Temperatura média do trimestre mais chuvoso	Bio8
Temperatura média do trimestre mais seco	Bio9
Temperatura média do trimestre mais quente	Bio10
Temperatura média do trimestre mais frio	Bio11

(continua)

Variável	Sigla
Precipitação anual	Bio12
Precipitação do mês mais chuvoso	Bio13
Precipitação do mês mais seco	Bio14
Sazonalidade na precipitação	Bio15
Precipitação no trimestre mais chuvoso	Bio16
Precipitação no trimestre mais seco	Bio17
Precipitação no trimestre mais quente	Bio18
Precipitação no trimestre mais frio	Bio19

Nota: as variáveis foram utilizadas para avaliação da similaridade climática entre categorias de cobertura nativa do solo e modelagem de sua distribuição atual e futura.

Fonte: derivadas do *WorldClim Global Climate*. (disponível em: <<http://www.worldclim.org>>).

Uma vez que os dados originais diferem em resolução (300 m para a cobertura vegetal, 1 km para os dados climáticos atuais e 20 km para as projeções climáticas do Eta-HadGEM2 ES), utilizou-se a resolução de 20 km como base para padronizar as informações. Para tal, usou-se uma malha única cobrindo toda extensão continental do território nacional com células de tamanho 20 km *versus* 20 km. A cada célula da malha foram adicionadas informações sobre a categoria de cobertura nativa do solo predominante e o valor médio das variáveis ambientais. As células categorizadas como de uso antrópico foram excluídas das análises, uma vez que o padrão de distribuição dessas áreas é determinado por outras variáveis, que vão além das variáveis de âmbito climático utilizadas nesse trabalho.

2.2 Avaliação de similaridade climática entre categorias de cobertura do solo

Alguns tipos de cobertura do solo podem ter o mesmo nicho climático, mesmo sendo distintos em composição de espécies e dinâmica ecológica. Por isso, foi necessário avaliar a similaridade do nicho climático entre as categorias de cobertura do solo, para o qual foi utilizado o método de árvore de decisão. A árvore de decisão é um modelo lógico representado por uma árvore binária que mostra como a variável

resposta (neste caso, categoria de cobertura do solo) pode ser predita pelas variáveis explanatórias (neste caso, variáveis climáticas) (BREIMAN *et al.*, 1984). O modelo divide o conjunto de dados inicial (células da malha) em subconjuntos homogêneos, utilizando uma das variáveis exploratórias a cada divisão, até um subconjunto de amostras indivisível (neste caso, de alta homogeneidade de nicho climático).

A árvore de decisão não consiste em uma análise de agrupamento clássica, porém mostra-se mais promissora que os métodos de agrupamentos convencionais e apresenta vantagens considerando os objetivos desse capítulo. Métodos de agrupamento clássicos apresentam limitações como a arbitrariedade na definição *a priori* do número de grupos, como no método k-médias (LEGENDRE; LEGENDRE, 1998), ou do ponto de corte do dendograma de agrupamento, como no método de agrupamento hierárquico (LEGENDRE; LEGENDRE, 1998).

O resultado da árvore de decisão é um modelo em forma de árvore o mais subdividida possível, que pode ser superparametrizada (*over-fitted*). Para esse problema, o número ótimo de divisões da árvore foi definido a partir de uma avaliação da previsão de erro em adição a uma nova divisão, por meio de mil validações cruzadas (*crossvalidation*), ou seja, por meio do balanço entre acurácia da previsão e complexidade do modelo (BREIMAN *et al.*, 1984). Esse método não está sujeito a superparametrização pelo uso de variáveis redundantes, pois a abordagem por meio de árvore de decisão seleciona apenas aquelas variáveis eficientes para criar a subdivisão dos dados. A homogeneidade de cada subconjunto final foi medida utilizando o índice de Gini, o mais adequado para dados categóricos (BREIMAN *et al.*, 1984).

Para avaliar a importância de cada variável ambiental em prever a cobertura nativa do solo, foi realizada a análise *randomForest*, que consistiu na construção de mil árvores de decisão aleatórias por meio de amostragem de *bootstrap*, excluindo variáveis preditoras a cada modelo e combinando os resultados de todos os modelos (BREIMAN, 2001). Assim, comparando o resultado da acurácia entre tais modelos, é possível avaliar a importância relativa de cada variável na previsão da categoria de cobertura nativa do solo (CUTLER *et al.*, 2007).

As variáveis apontadas pelas análises como importantes para agrupar e prever as coberturas do solo foram utilizadas como variáveis explanatórias nos

modelos de distribuição potencial por serem aquelas mais aptas a prever sua distribuição a partir de seu nicho climático. Assim, o uso dessas variáveis, provavelmente, aumenta a robustez da distribuição predita e evita a superparametrização dos modelos derivada do uso de variáveis redundantes.

Para decidir quais categorias de cobertura do solo deveriam ser agregadas, avaliou-se a probabilidade média das células de uma determinada categoria ser predita em cada uma das demais categorias. A dispersão das probabilidades de predição é capaz de mostrar: as categorias de cobertura do solo com altas probabilidades de acerto na predição; as categorias frequentemente preditas dentro de outra categoria (devido à similaridade climática) e, portanto, agrupadas em uma única classe; e, ainda, aquelas que não apresentam robustez para serem preditas pelo clima, sendo descartadas da modelagem de distribuição geográfica.

A análise por meio da árvore de decisão foi realizada com 15% das células da malha selecionadas aleatoriamente (figura 1). As análises foram realizadas no programa R, utilizando o pacote *rpart* (BREIMAN, 2001) e *randomForest* (LIAW; WIENER, 2002).

2.3 Modelagem da distribuição geográfica

Atualmente, existem muitos métodos desenvolvidos para estimar o nicho potencial, no entanto, eles são utilizados majoritariamente para estimar distribuição potencial de espécies (passada, atual ou futura) a partir da combinação de variáveis ambientais e da ocorrência das espécies (ELITH; LEATHWICK, 2009). Todos os modelos existentes podem gerar uma predição de igual qualidade para a distribuição potencial gerada (ARAÚJO; NEW, 2007).

Entre os modelos, existem três categorias principais (envelopes bioclimáticos/métodos de distâncias, modelos estatísticos e modelos de inteligência artificial) que se diferenciam pela sua complexidade, generalidade e precisão.¹ Outra abordagem que tem ganhado destaque é a previsão conjunta (*ensemble forecasting*,

¹ Para uma revisão dos principais modelos existente, ver Araújo e New (2007) e Rangel e Loyola (2012).

em inglês), utilizada para diminuir a incerteza na distribuição predita relacionada ao modelo utilizado. Essa abordagem utiliza como base a predição de uma série de modelos e considera como a distribuição final aquelas áreas de consenso entre as predições, eliminando possíveis erros de distribuição associados à natureza do método utilizado (ARAÚJO; NEW, 2007; DINIZ-FILHO *et al.*, 2009).

Para avaliar a distribuição futura das coberturas nativas do solo em território brasileiro, selecionou-se um conjunto de modelos que contempla a variedade de técnicas e conceitos existentes por trás dos modelos preditivos de distribuição, permitindo uma análise exploratória dos métodos e a seleção daqueles mais acurados para comparar as predições (figura 1). Os métodos de modelagem de distribuição geográfica utilizados consistiram em nove modelos individuais e três consensos de cada categoria, sendo eles:

- a) envelopes bioclimáticos/métodos de distâncias: Bioclim (BUSBY, 1991), distância de Gower (CARPENTER *et al.*, 1993), distância de Mahalanobis (FARBER; KADMON, 2003) e consenso de envelopes bioclimáticos/métodos de distâncias;
- b) modelos estatísticos: modelo linear generalizado (*Generalized Linear Models – GLM*) (MCCULLAGH; NELDER, 1989), modelos aditivos generalizados (*Generalized Additive Models – GAM*) (HASTIE; TIBSHIRANI, 1990), regressões adaptativas multivariadas de *Splines* (*Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS*) (FRIEDMAN, 1991) e consenso de modelos estatísticos;
- c) modelos de inteligência artificial: máxima entropia (*Maximum Entropy Modelling – MaxEnt*) (PHILLIPS *et al.*, 2006), algoritmo genético para a produção de conjunto de regras (*Genetic Algorithm for Rule Set Production – GARP*) (STOCKWELL; PETERS, 1999), *randomForest* (BREIMAN, 2001) e consenso de modelos de inteligência artificial.

A abordagem preditiva se iniciou pela modelagem da distribuição geográfica da cobertura nativa do solo para o clima atual (figura 1). Essa etapa foi realizada

a partir de 25% das células da área de estudo, selecionadas de forma sistemática. A amostragem sistemática consiste em uma seleção regular e por meio de intervalos fixos entre as células de toda a área de estudo, o que permite uma coleta livre de viés espacial e proporciona uma cobertura mais ampla da variabilidade ambiental da área. Essa abordagem tem apresentado bons resultados na seleção de modelos de distribuição geográfica, aumentando a acurácia do ajuste das curvas de respostas geradas pelos modelos (TESSAROLO *et al.*, 2014).

Os 25% de células de entrada utilizados nessa etapa da modelagem foram divididos aleatoriamente em 75% para calibração e 25% para a validação. Esse procedimento foi repetido 10 vezes e, em cada réplica, seus resultados foram usados para gerar mapas preditivos para cada método individualmente. A prevalência dos dados na etapa de calibração foi o método de limiar de conversão das probabilidades em dados binários. O consenso para cada grupo de métodos foi gerado pela média das previsões de cada algoritmo, ponderada pelo valor da Estatística de Habilidade Verdadeira (*True Skill Statistic* – TSS; ALLOUCHE *et al.*, 2006), calculada na etapa de validação realizada durante o processo de modelagem (validação interna). Utilizou-se a plataforma *Bioensemble*, desenvolvida por pesquisadores ligados à Rede CLIMA, subrede de biodiversidade (DINIZ-FILHO *et al.*, 2009), para gerar as previsões dos modelos isolados, bem como a previsão conjunta (consensos).

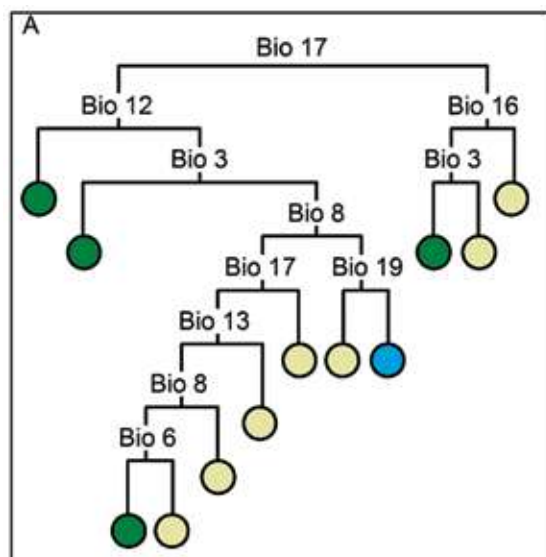
O resultado das previsões geradas para o clima atual foi avaliado externamente usando quatro métricas: sensibilidade, especificidade, *Area Under ROC Curve* (AUC) e TSS. Os métodos e as métricas foram escolhidos de forma a abranger a maior variação de técnicas utilizadas por pesquisadores na atualidade. Essa segunda etapa de validação foi realizada por meio dos 60% das células da malha de base de dados não utilizados nas etapas anteriores (15% da árvore de decisão e 25% para predição pelos modelos de distribuição). Os métodos de modelagem que apresentaram valores maiores que 0,8 para, no mínimo, três métricas de avaliação foram considerados suficientemente acurados para prever a distribuição das coberturas do solo. O melhor modelo foi utilizado para avaliar a distribuição potencial das coberturas do solo em cenário climático futuro.

3 Resultados e discussão

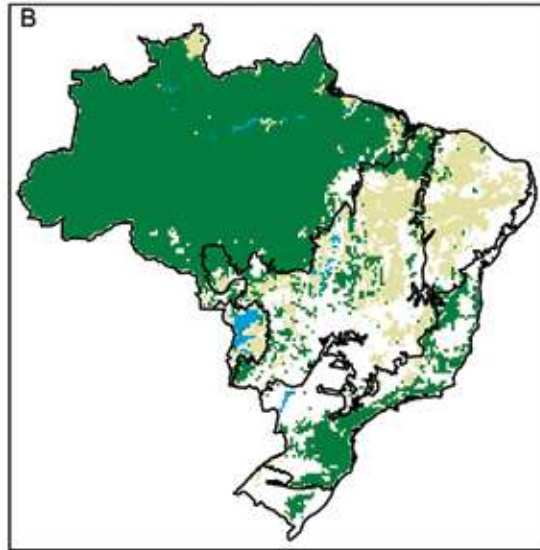
3.1 Agrupamentos das categorias de cobertura do solo e seleção das variáveis climáticas

As coberturas nativas do solo foram eficientemente classificadas pela árvore de decisão (Kappa = 0,69, p-value < 0,001, porcentagem de hábitat corretamente classificado = 88,63%), mostrando que a cobertura do solo pode ser eficientemente predita pelas variáveis climáticas. A árvore de decisão final foi composta por 11 nós, gerada por oito variáveis e classificou a cobertura do solo em três categorias de nicho climático único (figura 2).

Figura 2 – Classificação da cobertura nativa do solo baseada em nicho climático, de acordo com o método de árvore de decisão



Nota: (A) esquema de classificação gerado pelo método, no qual se observa oito variáveis agrupando as categorias de cobertura nativa do solo em três grupos climaticamente distintos, definidos pelas cores finais (ver tabela 1 para consultar os códigos das variáveis).



Nota: (B) espacialização da classificação obtida por meio da árvore de decisão. Cada cor, em ambas as figuras, representam um grupo de cobertura nativa do solo: formações florestais, em verde; vegetações abertas, em bege; e pastagem ou floresta estacional regularmente alagada, em azul.

As variáveis mais apropriadas para descrever o nicho climático das coberturas nativas do solo foram: isotermalidade, temperatura mínima do mês mais frio, temperatura média do trimestre mais chuvoso, precipitação anual, precipitação do mês mais chuvoso, precipitação no trimestre mais chuvoso, precipitação no trimestre mais seco e precipitação do trimestre mais frio (figura 2).

As três categorias de vegetação nativa identificadas pela árvore de decisão foram: floresta ombrófila densa ou floresta semidecidual, vegetação arbustiva densa e pastagem ou floresta estacional regularmente alagada. Dessa forma, as demais categorias de cobertura nativa do solo foram agregadas dentro das três categorias acima mencionadas.

As células de floresta ombrófila densa regularmente alagada e floresta estacional semidecidual fechada e(ou) ombrófila regularmente alagada por águas salinas foram frequentemente classificadas como floresta ombrófila densa ou floresta semidecidual (figura 3). Isso demonstra que essas três categorias compartilham o

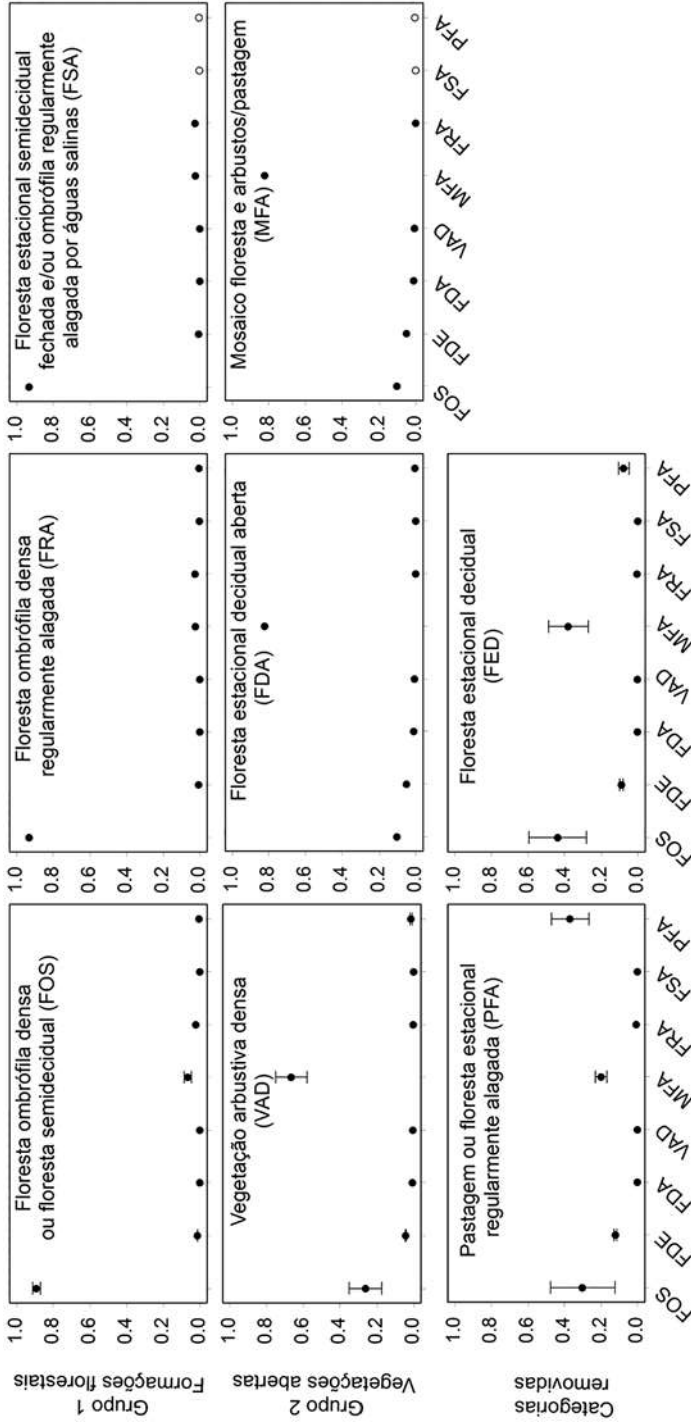
nicho climático. Por isso, agrega-se essas três categorias em um único grupo. Devido à natureza florestal dessas vegetações, chama-se esse grupo de formações florestais (figura 3).

Já as categorias floresta estacional decidual aberta e mosaico floresta e vegetação arbustiva/pastagem foram frequentemente classificadas como vegetação arbustiva densa. Por se tratarem de vegetações arbustivas e abertas, esse grupo foi denominado de vegetações abertas.

A terceira categoria indicada pela árvore de decisão foi pastagem ou floresta estacional regularmente alagada, que aparentemente não apresenta sobreposição climática com outras categorias (figura 3). Isso se deu por particularidades dos regimes climáticos que regulam essa categoria de cobertura do solo. Mesmo sendo classificada como um nicho climático único, a média de probabilidade de predição não é alta (figura 3). A pastagem ou floresta estacional regularmente alagada difere também dos demais grupos em escala, pois se distribui por apenas 1% do território, enquanto as formações florestais cobrem 56% do território nacional e as vegetações abertas cobrem 14%. Essas particularidades e a baixa probabilidade média limitam conclusões quando comparadas aos dois grupos anteriores. Por isso, essa categoria foi removida dos resultados subsequentes.

As células com floresta estacional decidual densa foram as de menor consistência climática, pois sua classificação é igualmente provável dentro dos grupos de formações florestais e vegetações abertas (figura 3). Dessa forma, floresta estacional decidual densa não apresenta grande identidade climática quando comparada com as outras categorias e, portanto, também foram removidas das análises subsequentes.

Figura 3 – Eficiência na predição de categorias de cobertura nativa do solo feita pela árvore de decisão

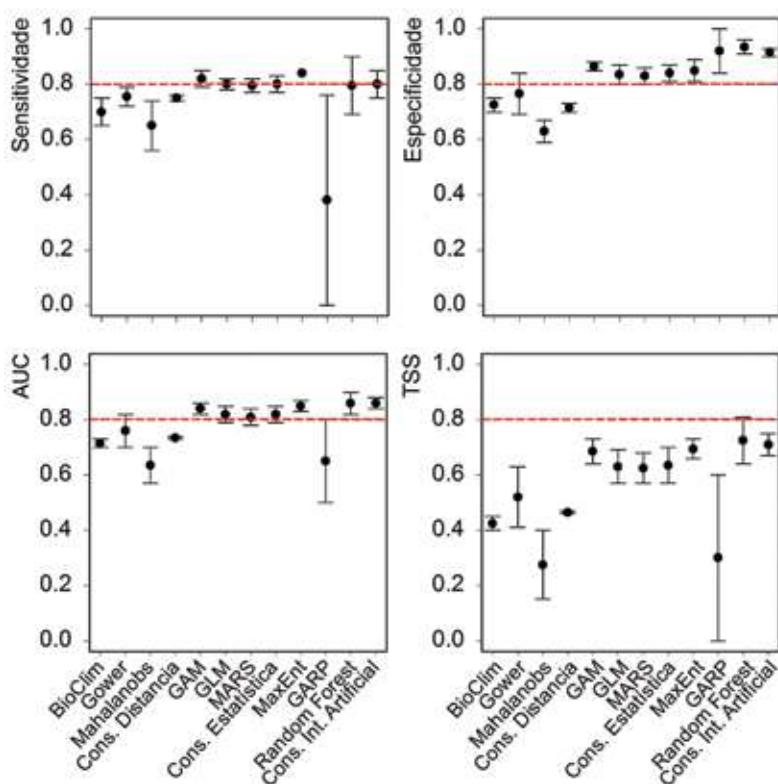


Nota: cada gráfico representa um conjunto de células da malha de dados definida por uma categoria de cobertura nativa do solo (título central dos gráficos), que foi avaliada de acordo com a probabilidade média (e desvio padrão) de ser previsto em outras categorias de cobertura do solo. A dispersão das probabilidades define em que categoria a cobertura do solo foi agrupada. Os códigos apresentados no eixo horizontal são descritos no topo de cada gráfico e representam as categorias de cobertura do solo.

3.2 Seleção do modelo de distribuição e acurácia das predições

Inicialmente, foram rodados 240 modelos de distribuição geográfica baseado no cenário climático atual, que convergiram em 24 predições de distribuição. No entanto, muitas das predições geradas foram inconsistentes com a distribuição original, mostrando que os métodos de modelagem de distribuição podem falhar em estimar a distribuição geográfica. Dentre os algoritmos utilizados neste arcabouço metodológico, o *MaxEnt* apresentou a melhor *performance* (figura 4).

Figura 4 – Dispersão dos valores de ajuste dos modelos de distribuição geográfica das categorias de cobertura do solo baseado no cenário climático atual, mostrando que o método de entropia máxima (*MaxEnt*) foi o mais adequado de acordo com os critérios deste trabalho



Nota: os modelos de distribuição geográfica são detalhados no texto.

Técnicas de modelagem diferem na capacidade de capturar a relação entre a distribuição e as variáveis ambientais, porém métodos complexos como os de inteligência artificial, categoria na qual se enquadra o *MaxEnt*, têm se mostrado mais eficientes, por proporcionarem melhores ajustes (TSOAR *et al.*, 2007; ELITH; LEATHWICK, 2009). O método *MaxEnt* estima a distribuição seguindo o princípio da máxima entropia, que busca uma distribuição mais próxima à uniforme, ou seja, mais restrita aos valores esperados da distribuição estimada para cada variável, de modo a corresponderem à média empírica dos valores observados (PHILLIPS *et al.*, 2006; ELITH *et al.*, 2011). Ele tem se destacado na literatura por sua eficiência em gerar previsões (PHILLIPS *et al.*, 2006; ELITH *et al.*, 2011). A robustez do modelo quando comparado ao método de consenso foi surpreendente, pois o consenso é uma das técnicas mais utilizadas na atualidade e tem apresentado as melhores previsões (MARMION *et al.*, 2009). No entanto, os consensos são sensíveis à inclusão de modelos com baixo desempenho, pois dependem da qualidade de cada modelo individualmente (ARAÚJO; PETERSON, 2007). Outro fator é que os consensos têm a característica de subestimar a distribuição, o que provavelmente acarretou muitos erros de omissão e, consequentemente, em baixas estatísticas de ajuste. Dessa forma, o método *MaxEnt* foi usado para prever as distribuições das formações florestais e vegetações abertas nos quatro cenários climáticos futuros.

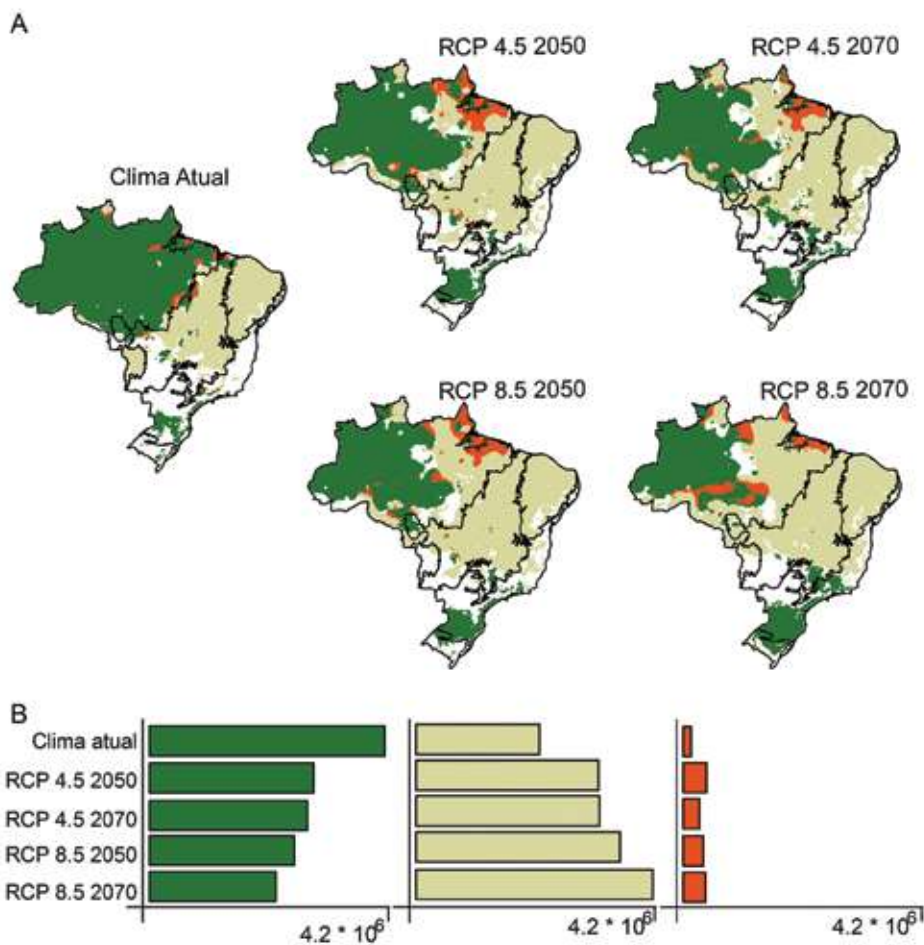
Diferentemente da distribuição de espécies, as coberturas do solo não devem se sobrepor, porque originalmente elas não coocorrem. Dessa forma, considerou-se, como áreas de incerteza, aquelas localidades onde a formação florestal e vegetações abertas tiveram sua distribuição sobreposta em um mesmo cenário climático (figura 5). A área total de incerteza foi pequena, considerando a escala do estudo (de 1,8% a 5% do território, de acordo com o cenário climático), aumentando a confiabilidade das inferências, tanto do ponto de vista estatístico quanto biológico.

3.3 Mudanças nas coberturas nativas do solo mediadas por cenários climáticos futuros: o panorama nacional

Comparando a distribuição atual e futura, para os anos 2050 e 2070, observa-se que as formações florestais são as mais ameaçadas, pois esse grupo de cobertura do solo terá o espaço climático ótimo reduzido, o que possivelmente repercutirá também em redução da distribuição (figura 5). Essa redução é intensificada no cenário pessimista e com o passar dos anos, podendo chegar 50% da distribuição atual (figura 5b). A perda de cobertura florestal ocorre, principalmente, no norte e no oeste de sua distribuição (figura 5a). Em contrapartida, observa-se que há uma potencial expansão das vegetações abertas (figura 5b), principalmente a norte e oeste do território brasileiro (figura 5a), que também se intensifica com o cenário pessimista e com o tempo.

Os padrões de mudança da cobertura nativa do solo sugerem uma substituição espacial das formações florestais por vegetações abertas. Esses resultados poderiam reforçar a hipótese de savanização de algumas regiões do Brasil (SILVÉRIO *et al.*, 2013). Existem várias evidências de ameaças das mudanças climáticas sobre ambientes florestais (DAVIDSON; ARTAXO, 2004; FYLLAS *et al.*, 2009; DAVIDSON *et al.*, 2012). No entanto, a hipótese de savanização é pouco testada e deveria receber mais atenção por parte de comunidade acadêmica, uma vez que as evidências existentes são em escala local (SILVÉRIO *et al.*, 2013).

Figura 5 – Distribuição potencial (A) e área total (B, em km²) dos grupos de cobertura nativa do solo para cenário climático atual e em cenários futuros



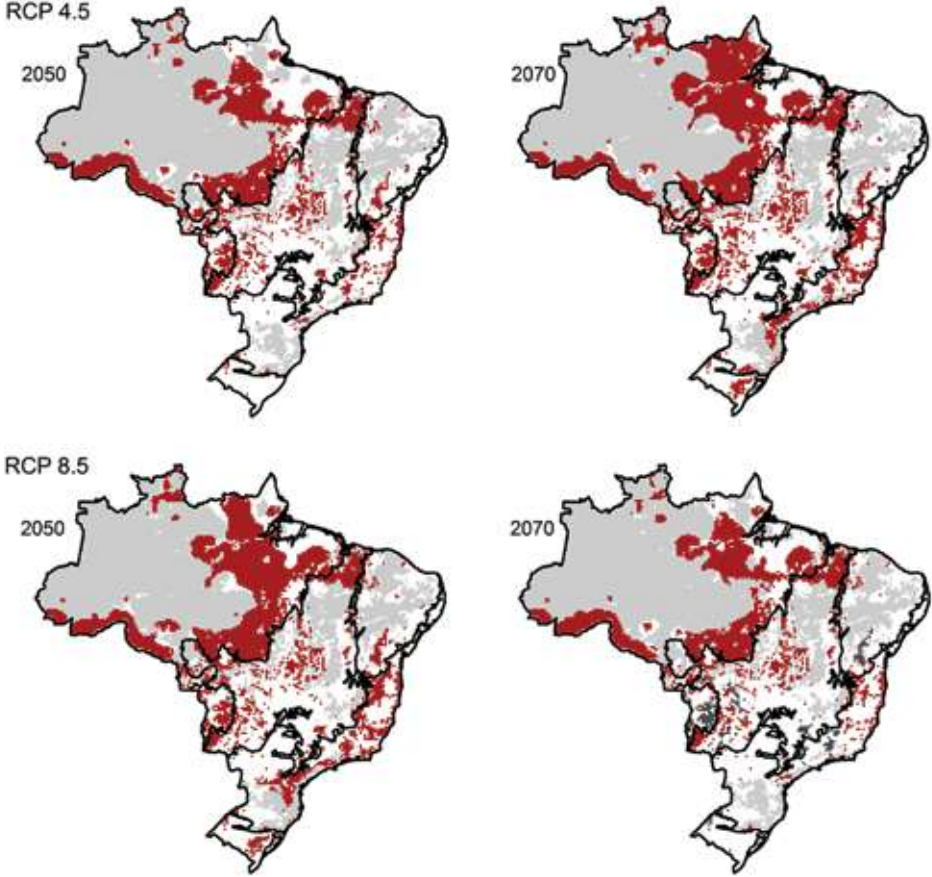
Nota: formações florestais estão representadas em verde e vegetações abertas, em bege. As localidades onde ambas as categorias sobrepuseram em distribuição foram consideradas como áreas incerteza de distribuição e estão representados em laranja.

É importante ressaltar que a expansão das coberturas nativas do solo, independente da categoria ou localidade, é pouco provável do ponto de vista ecológico. A velocidade e intensidade das mudanças climáticas tornariam improvável

veis a evolução adaptativa ou mesmo a dispersão de espécies para áreas adequadas (PARMESAN, 2006), pois a escala temporal para a qual foram geradas as predições consiste em um futuro próximo (2050 e 2070). Dessa forma, a expansão da cobertura nativa que poderia atenuar os impactos sobre algumas categorias de cobertura do solo provavelmente não ocorrerá, aumentando as consequências negativas das mudanças no clima futuro.

Mesmo sem uma previsão do real processo ecológico que ocorrerá nessas áreas de instabilidade climática (onde foi prevista substituição da cobertura do solo), pode-se assumir que essas localidades são as mais vulneráveis (figura 6). De acordo com os resultados, uma proporção alarmante do território brasileiro é indicada como vulnerável (figura 6). Essas localidades apresentarão uma mudança no regime climático que certamente levará a uma mudança na composição e, provavelmente, na estrutura vegetacional. Nesse sentido, as áreas de vulnerabilidade merecem atenção do ponto de vista estratégico para a conservação da biodiversidade, pois são áreas onde os prejuízos causados pelas mudanças no clima devem ser gerenciados ou mitigados.

Figura 6 – Comparação da cobertura nativa do solo atual e futura, indicando áreas de instabilidade climática que levariam a uma potencial substituição

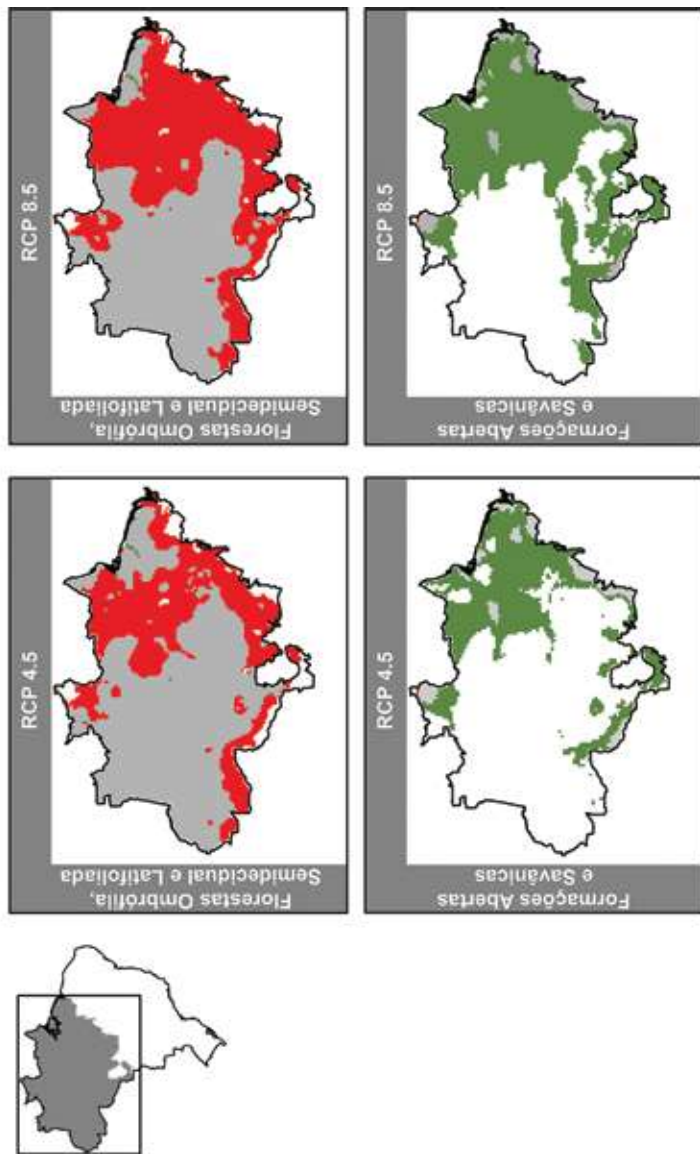


Nota: as áreas de estabilidade (áreas onde não se prediz mudança na cobertura do solo) são representadas em cinza. As áreas de vulnerabilidade (áreas em que a cobertura nativa do solo atual não é predita em cenário climático futuro) são representadas em vermelho. As áreas com uso do antrópico solo são representadas em branco e não foram avaliadas neste trabalho.

3.4 Os biomas brasileiros e as ameaças da mudança no clima

Os biomas brasileiros sofrerão diferentes pressões em consequência das mudanças no clima. A Amazônia e a Mata Atlântica seriam os mais afetados, pois eles possuem maior proporção de sua área coberta por formações florestais, categoria para a qual é predita uma redução do espaço climático ótimo. Na Amazônia, a redução do nicho climático para as formações florestais será a mais intensa (figura 7), especialmente na porção oriental e sul, fronteira com o bioma Cerrado. Essa região está sob forte influência antrópica, tendo seus habitats originais amplamente reduzidos e fragmentados (FEARNSIDE, 2015). O processo de perda e fragmentação que ocorre nessa região consiste em uma expansão da fronteira agrícola nacional, conhecida como arco do desmatamento, que apresenta as maiores taxas de conversão de floresta tropical do mundo (FEARNSIDE *et al.*, 2009). Há uma potencial expansão do nicho climático das vegetações abertas para a região do arco de desmatamento (figura 7), porém o uso antrópico do solo será claramente uma barreira física para a expansão real da cobertura de vegetações abertas.

Figura 7 – Distribuição de cobertura nativa do solo frente às mudanças climáticas na Amazônia, separada por grupo de cobertura e cenário climático



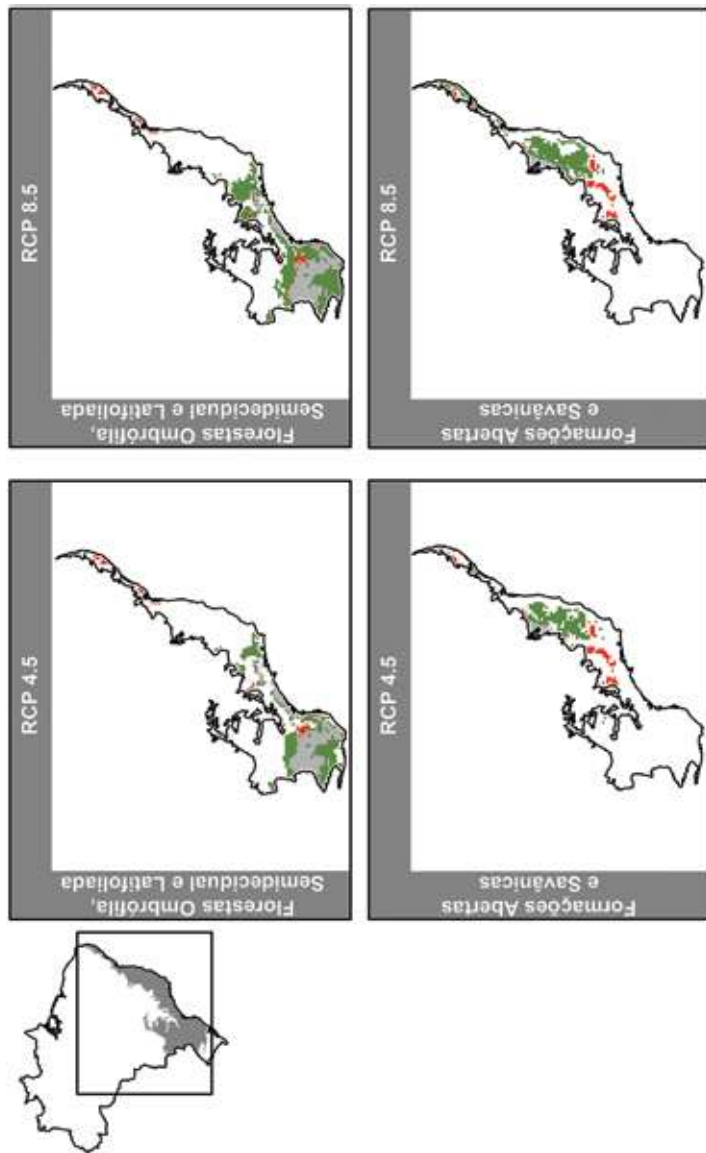
Nota: em vermelho, localidades onde é prevista a retração do nicho climático da cobertura do solo. Em verde, localidades onde é prevista a expansão do nicho climático. Em cinza, áreas de estabilidade, onde o nicho climático atual é previsto para o cenário climático futuro.

A Mata Atlântica, por sua vez, apresentará uma pequena porção de estabilidade em sua área florestal, especialmente na porção sul do bioma (figura 8). Há uma potencial expansão do nicho climático para ambos os grupos de cobertura do solo, desde o norte ao sul. Mesmo com essa potencial expansão da cobertura nativa do solo, a Mata Atlântica pode ser considerada o bioma mais ameaçado do Brasil. Apesar dos efeitos do clima serem aparentemente mais intensos sobre a Amazônia, a Mata Atlântica possui o histórico de conversão do hábitat mais antigo, sendo o bioma com menor proporção de vegetação nativa remanescente (RIBEIRO *et al.*, 2009) e com maior densidade populacional. Nesse sentido, a expansão da vegetação natural predita pelos modelos provavelmente não ocorrerá, pois os locais já estão ocupados por uso antrópico. Como medida de manejo para a conservação do bioma, sugere-se que localidades indicadas como climaticamente estáveis ou de potencial expansão do nicho climático sejam propostas como áreas apropriadas para a restauração de áreas degradadas. Essas localidades representam uma oportunidade de aumentar o sucesso de restauração de áreas degradadas, pois o nicho climático propício estará presente.

O Cerrado e a Caatinga poderão perder seus enclaves de formações florestais (figuras 9 e 10). No entanto, a cobertura nativa do solo desses biomas é predominantemente composta por vegetações abertas, que apresentará pouca retração de espaço climático ótimo. Dessa forma, esses biomas seriam aqueles de menor preocupação quanto aos impactos das mudanças climáticas do ponto de vista de distribuição da cobertura nativa do solo. Por outro lado, é importante ressaltar que esse cenário não representa ausência de preocupação e ameaças para esses biomas, uma vez que a perda dos enclaves de formações florestais pode representar perda de espécies especialistas de hábitat e(ou) endêmicas.

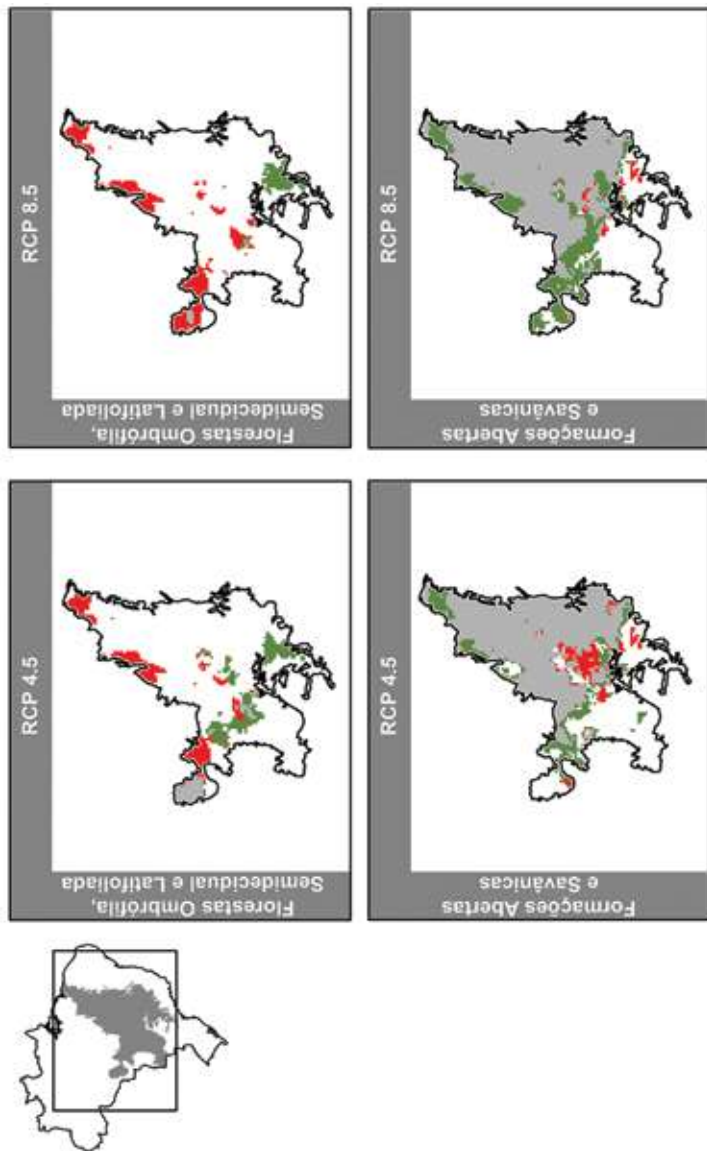
O Pantanal e os Pampas não são eficientemente caracterizados pelos dois grupos de cobertura do solo analisados neste trabalho, tornando inconsistentes as interpretações dos impactos futuros do clima para esses biomas. Estes possuem pequena extensão territorial quando comparados aos demais biomas nacionais, apresentando coberturas do solo particulares e diferentes regimes climáticos. Por isso, inferências sobre os impactos da mudança do clima sobre o Pantanal e os Pampas necessitam ser feitas por meio de uma abordagem diferente de estudo, considerando variações na cobertura do solo e clima em escala local a regional.

Figura 8 – Distribuição de cobertura nativa do solo frente às mudanças climáticas na Mata Atlântica, separada por grupo de cobertura e cenário climático



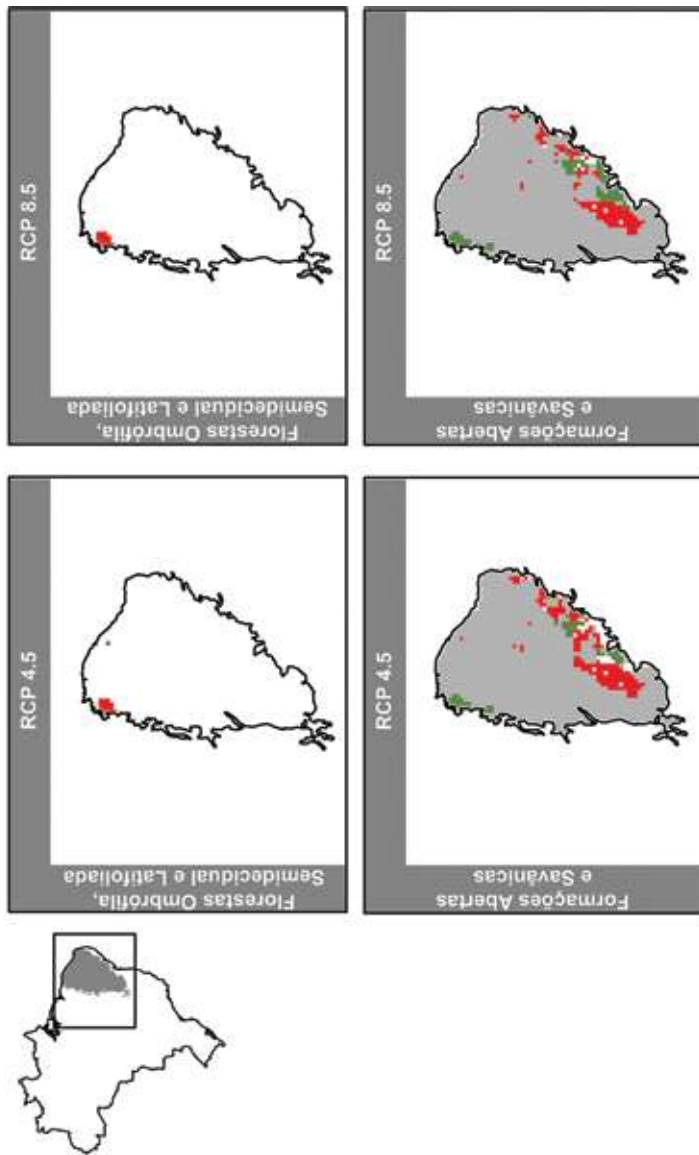
Nota: em vermelho, localidades onde é prevista a retração do nicho climático da cobertura do solo. Em verde, localidades onde é prevista a expansão do nicho climático. Em cinza, áreas de estabilidade, onde o nicho climático atual é previsto para o cenário climático futuro.

Figura 9 – Distribuição de cobertura nativa do solo frente às mudanças climáticas no Cerrado, separada por grupo de cobertura e cenário climático



Nota: em vermelho, localidades onde é prevista a expansão do nicho climático. Em cinza, áreas de estabilidade, onde o nicho climático atual é previsto para o cenário climático futuro.

Figura 10 – Distribuição de cobertura nativa do solo frente às mudanças climáticas na Caatinga, separada por grupo de cobertura e cenário climático



Nota: em vermelho, localidades onde é prevista a retração do nicho climático da cobertura do solo. Em verde, localidades onde é prevista a expansão do nicho climático. Em cinza, áreas de estabilidade, onde o nicho climático atual é previsto para o cenário climático futuro.

4 Considerações finais

Dentre os impactos que as mudanças futuras do clima podem causar sobre a cobertura nativa do solo em território brasileiro, destacou-se a retração do espaço climático ótimo para formações florestais e a expansão das vegetações abertas. No entanto, essa expansão pode não se concretizar devido às barreiras antrópicas existentes atualmente e que também tenderão a ser ampliadas no futuro.

Identificou-se, ainda, que mudanças no clima afetarão quatro dos seis biomas brasileiro, mostrando que as mudanças climáticas poderão se tornar uma ameaça real à biodiversidade brasileira. A Amazônia é, aparentemente, o bioma sobre maior risco, pois sua vegetação é massivamente representada por coberturas florestais, que serão aparentemente as mais afetadas pelas mudanças no clima.

Prever os futuros impactos das mudanças climáticas nos permite planejar estratégias mais adequadas para atenuar potenciais ameaças à conservação da biodiversidade. Dessa forma, os resultados provêm uma informação útil sobre os efeitos da mudança no clima sobre a os biomas brasileiros e sua biodiversidade, dando suporte para que as entidades competentes desenvolvam as estratégias de conservação adequadas.

Referências

- ABER, J. D.; MELILLO, J. M. **Terrestrial ecosystems**. 2 ed. Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing, 2001.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of Applied Ecology**, London, v. 43, p. 1223-1232, 2006.
- ARAÚJO, M. B.; NEW, M. Ensemble forecasting of species distributions. **Trends in Ecology & Evolution**, Cambridge, v. 22, n. 1, p. 42-47, 2007.
- ARAÚJO, M. B.; PETERSON, T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. **Ecology**, Washington, v. 93, n. 7, p. 1527-1539, 2007.
- BELLARD, C. *et al.* Impacts of climate change on the future of biodiversity. **Ecology Letters**, Malden, v. 15, p. 365-377, 18 jan. 2012.

BONTEMPS, S. *et al.* **GlobCover 2009**. Louvain: UCLouvain & ESA Team, 2011.

BREIMAN, L. **Random forest**. Berkeley, California: University of California, 2001.

BREIMAN, L. *et al.* A. **Classification and regression trees**. Washington DC: Chapman & Hall/CRC, 1984.

BUSBY, J. R. Bioclim – A bioclimatic analysis and prediction system. In: MARGULES, C. R.; AUSTIN, M. P. (Eds.). **Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis**. Canberra: CSIRO, 1991. p. 64-68.

CAHILL, A. E. *et al.* How does climate change cause extinction? **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 280, n. 1750, p. 1890-1890, nov. 2012.

CARPENTER, G. *et al.* A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. **Biodiversity and Conservation**, New York, v. 680, n. 2, p. 667-680, 1993.

CUTLER, D. R. *et al.* Random forests for classification in ecology. **Ecology**, Washington, v. 88, n. 11, p. 2783-2792, 2007.

DAVIDSON, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, London, v. 481, n. 7381, p. 321-8, 2012.

DAVIDSON, E.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biology**, Malden, v. 10, n. 5, p. 519-529, 2004.

DAWSON, T.; JACKSON, S.; HOUSE, J. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. **Science**, New York, v. 332, p. 53-58, 2011.

DINIZ-FILHO, J. A. F. *et al.* Conservation biogeography and climate change in the brazilian cerrado. **Natureza & Conservação**, Curitiba, v. 7, p. 100-112, 2009.

ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 40, n. 1, p. 677-697, 2009.

ELITH, J. *et al.* A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. **Diversity and Distributions**, Malden, v. 17, n. 1, p. 43-57, 2011.

FALEIRO, F. V.; MACHADO, R. B.; LOYOLA, R. D. Defining spatial conservation priorities in the face of land-use and climate change. **Biological Conservation**, London, v. 158, p. 248-257, 2013.

FARBER, O.; KADMON, R. Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. **Ecological Modelling**, Severna Park, v. 160, p. 115-130, 2003.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation soars in the Amazon. **Nature**, London, v. 521, n. 32, p. 423, 2015.

FEARNSIDE, P. M. *et al.* Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, n. 9, p. 1968-1978, 2009.

FODEN, W. B. *et al.* Identifying the world's most climate change vulnerable species: a systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals. **PloS one**, San Francisco, v. 8, n. 6, p. e65427, 2013.

FORDHAM, D. A. *et al.* Tools for integrating range change, extinction risk and climate change information into conservation management. **Ecography**, Lund, v. 36, n. 9, p. 956-964, 2013.

FORREST, J. L.; WIKRAMANAYAKE, E.; SHRESTHA, R.; AREENDRAN, G.; GYELTSHEN, K.; MAHESHWARI, A.; MAZUMDAR, S.; NAIDOO, R.; THAPA, G. J.; THAPA, K. Conservation and climate change: Assessing the vulnerability of snow leopard habitat to treeline shift in the Himalaya. **Biological Conservation**, London, v. 150, n. 1, p. 129-135, 2012.

FRIEDMAN, J. Multivariate adaptive regression splines. **The Annals of Statistics**, Durham, v. 19, n. 1, p. 1-141, 1991.

FYLLAS, N. *et al.* Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate. **Biogeosciences**, Munich, v. 6, p. 2677-2708, 2009.

HASTIE, T. J.; TIBSHIRANI, R. J. **Generalized additive models**. [s.l.]: Chapman & Hall/CRC, 1990.

HELSER, T. E.; LAI, H. L. A Bayesian hierarchical meta-analysis of fish growth: with an example for North American largemouth bass, **Micropterus salmoides**. **Ecological Modelling**, Severna Park, v. 178, n. 3-4, p. 399-416, 2004.

HICKLING, R. *et al.* The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. **Global Change Biology**, Malden, v. 12, n. 3, p. 450-455, 2006.

HIJMANS, R. J. *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, Malden, v. 25, p. 1965-1978, 2005.

IUCN – INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **The IUCN red list of threatened species**. Version 2015-4. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org>>. Acesso em: jan. 2016.

KITCHENER, A. C.; BEAUMONT, M. A.; RICHARDSON, D. Geographical variation in the clouded leopard, *Neofelis nebulosa*, reveals two species. **Current Biology**, Cambridge, v. 16, n. 23, p. 2377-2383, 2006.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 1998.

LEMES, P.; MELO, A. S.; LOYOLA, R. D. Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, New York, v. 23, n. 2, p. 357-368, 2013.

LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. **Biodiversidade brasileira**: síntese do estado atual do conhecimento. Brasília: Contexto, 2002.

LLAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by randomForest. **R News**, Wien, v. 2, n. 3, p. 18-22, 2002.

MARMION, M. *et al.* Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. **Diversity and Distributions**, Malden, v. 15, n. 1, p. 59-69, 2009.

MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**. 2. ed. Boston, MA: Springer US, 1989.

MØLLER, A.; RUBOLINI, D.; LEHIKONEN, E. Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. **PNAS**, Washington, v. 105, n. 42, p. 16195-16200, 2008.

PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 37, n. 1, p. 637-669, 2006.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, Severna Park, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.

PIMM, S. L. *et al.* The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. **Science**, New York, v. 344, n. 6187, p. 1246752, 2014.

RANGEL, T. F.; LOYOLA, R. D. Labeling ecological niche models. **Natureza & Conservação**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 119-126, 2012.

RIBEIRO, M. C. *et al.* M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, London, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RICHARDS, P. W. **The tropical rain forest: an ecological study**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

SILVÉRIO, D. V. *et al.* Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, London, v. 368, n. 1619, p. 20120427, 2013.

STOCKWELL, D.; PETERS, D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. **International Journal of Geographical Information Science**, New York, v. 13, n. 2, p. 143-158, 1999.

TESSAROLO, G. *et al.* Uncertainty associated with survey design in Species Distribution Models. **Diversity and Distributions**, Malden, v. 20, p. 1258-1269, 2014.

THUILLER, W. *et al.* Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. **Diversity and Distributions**, Malden, v. 12, n. 1, p. 49-60, 2006.

TSOAR, A. *et al.* A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distributions. **Diversity and Distributions**, Malden, v. 13, n. 4, p. 397-405, 2007.

Agradecimentos

Nós agradecemos ao Carlos Eduardo Grelle e ao Rafael Loyola pelas contribuições feitas ao trabalho. Este trabalho é fruto do projeto de cooperação internacional do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud), BRA/10/g32 – Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, executado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).



Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas

Eduardo Delgado Assad

Embrapa Informática Agropecuária/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Aryeverton Fortes de Oliveira

Embrapa Informática Agropecuária/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Alan Massaru Nakai

Embrapa Informática Agropecuária/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Eduardo Pavão

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud)

Giampaolo Pellegrino

Embrapa Informática Agropecuária/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

José Eduardo Monteiro

Embrapa Informática Agropecuária/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Resumo

Procurou-se mostrar quais as principais vulnerabilidades para agricultura, diretamente vinculadas ao aquecimento global. Desde 2001, estudos de impacto na agricultura vêm sendo feitos, principalmente no café, na soja, no milho, na cana-de-açúcar, no arroz, no feijão, na mandioca, dentre outros. A partir do último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), e utilizando as simulações dos modelos mais recentes referentes aos cenários das mudanças climáticas até o ano de 2100, foram feitas projeções de impactos para as principais culturas brasileiras e que dizem respeito à agricultura familiar, como milho, milho safrinha, feijão e arroz, e de quão vulneráveis estão estas culturas se a temperatura continuar subindo nas atuais taxas (0,3°C) por década. Ao mesmo tempo, foi feito um esforço de caracterizar os eventos extremos que vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos. Projeções para os próximos anos referentes a frequência de ocorrência de temperaturas diárias superiores à 34°C foram feitas para todo o país, e atingem todos os agricultores. O mesmo foi feito para as chuvas extremas, ou seja, estimadas as frequências de ocorrência de chuvas intensas em todo o país, o que tem consequências imediatas na erosão dos solos, em perdas de fertilizantes e na desestruturação dos solos, além de perda de produtividade das culturas. Todas as simulações foram feitas a partir dos modelos do último relatório do IPCC AR5, com os cenários extremos RCP 4.5 e RCP 8.5. Até o momento, sem a redução das emissões de gases de efeito estufa, os resultados apontam para o cenário mais extremo, que é o RCP 8.5.

Palavras-chave: Agricultura familiar. Eventos extremos. Aquecimento global. Milho. Feijão. Arroz.

1 Introdução

A agricultura é um setor de importância fundamental para a economia brasileira e, a partir da segunda metade do século passado, passou por grandes transformações em função do avanço do conhecimento em agricultura tropical e da modernização das técnicas de cultivo. Ainda que alvo de controvérsias, atualmente baseada em críticas sobre o modelo adotado pela chamada “revolução verde”, este momento da agricultura brasileira – e mundial inquestionavelmente – resultou em aumento da produtividade e redução dos custos na atividade agrícola, permitindo elevar expressivamente a produção mundial de alimentos.

No Brasil, há 30 anos, os níveis de produtividade que, em muitas regiões não chegavam à metade do que se observa atualmente, aumentaram devido ao aprimoramento das técnicas de cultivo, do melhoramento genético e das práticas de manejo do solo. A produção atual chega à 190 milhões de toneladas de grãos, podendo potencialmente chegar à 330 milhões de toneladas sem aumento de área plantada (ROQUETTI FILHO, 2013).

Além desses, outro fator que pode ser listado como uma importante ferramenta para a redução das perdas e a melhoria no aprimoramento da tomada de decisão no setor agropecuário foi a aplicação no conhecimento em climatologia, modelagem e análise espacial para a elaboração de zoneamentos agrícolas, permitindo definir as melhores épocas de semeadura para diferentes variedades e tipos de solo.

Esse tipo de aplicação, além das consequências diretas de orientação ao produtor, teve também papel importante para o planejamento do setor agrícola brasileiro, permitindo aos órgãos da gestão pública antever os riscos da produção agropecuária e definir com mais clareza os custos do financiamento público da agricultura brasileira.

A questão dos riscos é especialmente importante quando se trata de agricultura, pois a despeito do bom nível tecnológico, da grande capacidade de produção de alimentos e da importância do setor agrícola para a economia brasileira, dentre as atividades econômicas modernas, a atividade agropecuária é a que está sujeita aos maiores riscos de perdas e oscilações nos volumes produzidos, com impactos negativos para toda a sociedade (ASSAD *et al.*, 2013).

Apesar do risco de insucesso ser uma característica intrínseca do agronegócio, é um elemento que pode ser gerenciado e avaliado objetivamente. A produção agrícola pode variar intensamente de um ano para outro e entre regiões relativamente próximas, por fatores relacionados a infestação de pragas e doenças, condições de mercado ou clima, causando grande variação temporal nos rendimentos obtidos pelos produtores e nos preços praticados pelo mercado – um aspecto nem sempre desejável na maioria das atividades econômicas.

Nos últimos 15 anos, um importante fator de risco tem de ser levado em consideração, que são os eventos extremos provocados pelo aquecimento global. Diversos estudos no Brasil, Assad e Pinto (2008), Assad *et al.* (2013), Assad *et al.* (2015), Siqueira *et al.* (1994), Margulis *et al.* (2011), Marin *et al.* (2013) e Evenson *et al.* (1998) deixam evidente esse impacto, a partir de estudos de vulnerabilidade da produção de grãos face a eventos extremos e alterações climáticas. Mesmo tipo de análises tem sido feita exaustivamente em outros países (CLINE, 2007; DESCHENES *et al.*, 2007; FERNANDES *et al.*, 2011; KJELLSTROM *et al.*, 2009; NELSON *et al.*, 2010).

Neste trabalho, procura-se avaliar os impactos do aquecimento global na agricultura a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, indicados a partir do último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – Fifth Assessment Report (AR5)*.

2 Metodologia

Para quantificar os impactos, foi necessário preparar e adaptar o Simulador de Cenários Agrícolas (SCenAgri) desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) nos últimos 10 anos.

O SCenAgri é um sistema computacional criado pela Embrapa Informática Agropecuária com o objetivo de prover computação de alto desempenho para apoiar os pesquisadores da Embrapa na investigação dos impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira. O sistema foi desenvolvido com base em um modelo de balanço hídrico (Bipzon) e atualmente Sarrazon (AFHOLDER *et al.*, 1997),

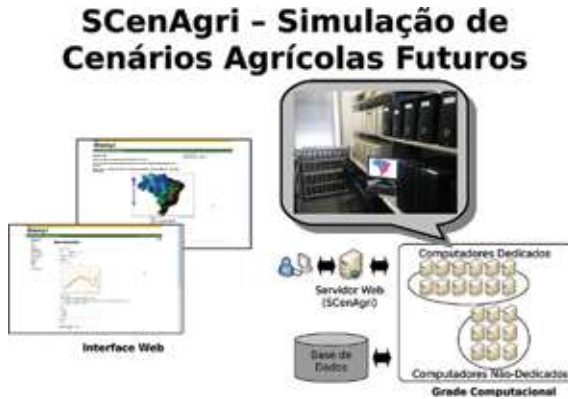
e permite que seus usuários simulem cenários agrícolas futuros utilizando dados de diversos modelos de projeções climáticas regionalizadas. Do ponto de vista computacional, o SCenAgri foi construído utilizando tecnologias de alto desempenho. O sistema foi implantado sobre uma grade de computadores, composta por dezenas de máquinas, e utiliza a tecnologia Hadoop/MapReduce para distribuir a execução das simulações entre os computadores da grade. Uma interface web flexibiliza o acesso ao sistema pelos usuários, que podem realizar novas simulações e recuperar resultados obtidos anteriormente por meio da internet.

Na sua base de dados, o sistema hoje tem 3.575 estações pluviométricas gerando dados diários com séries de pelo menos 30 anos e está preparado para simular os riscos climáticos para 19 culturas anuais e nove culturas perenes. Estão também incorporados no simulador pelo menos 20 modelos globais de projeções futuras do clima, três modelos regionais e, atualmente, o modelo Eta-HadGEM2-ES. Nas figuras 1 e 2, são ilustradas as soluções de *hardware* encontradas para o funcionamento do SCenAgri.

Figura 1 – Solução de infraestrutura para o SCenAgri



Figura 2 – Esquema de simulação de cenários futuros no SCenAgri, a partir da base de dados e do *Grid* instalado na Embrapa Informática Agropecuária



3 Preparação do simulador e obtenção dos resultados

Para avaliar os impactos da mudança do clima sobre as culturas agrícolas, foi necessário atualizar o simulador para incorporação das projeções de modelo climático, parametrização das culturas e processamento teste e extração inicial de informações de simulação. Assim, as etapas da preparação do simulador foram:

- incorporação dos dados do modelo regional Eta inicializado com o modelo global do CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5, no simulador para agricultura SCenAgri-EMBRAPA;
- avaliação de funcionalidades e capacidade de utilização dos dados;
- evolução dos extremos de temperatura (T_{max} e T_{min}) no Brasil;
- mapeamento da ocorrência de extremos de temperatura nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5;
- mapeamento da climatologia das temperaturas e da chuva para os períodos indicados;

- f) definição dos conjuntos de parâmetros de cada uma das culturas a serem simuladas;
- g) simulação das culturas para o período presente e 1961–2005 e para o futuro 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5;
- h) avaliação do impacto na área de baixo risco provocado pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nas culturas em questão.

3.1 Incorporação dos dados do modelo regional Eta inicializado com o modelo global do CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5, no simulador para agricultura SCenAgri da Embrapa

Foram utilizados os resultados os dados do modelo regional Eta, inicializado com o modelo global CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5,¹ para a modelagem agroclimatológica. Para tanto os dados foram organizados em períodos diários, mensais e anuais e, posteriormente, utilizados no SCenAgri, da Embrapa.

3.1.1 Testes, projeções climáticas e calibrações do modelo

Após a assimilação, os dados de temperatura e precipitação foram simulados para os períodos de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2099, em relação à linha de base de 1961–2005. Uma vez realizadas as simulações de temperatura e de precipitação, elas foram calibradas com os dados hidrometeorológicos de uma série de entidades brasileiras (Agência Nacional de Águas – ANA, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, Embrapa, Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp), disponíveis na Embrapa. O sistema hidrometeorológico Agritempo possui uma rede de 1.200 estações meteorológicas e 4 mil pluviômetros em todo o território nacional (figura 3) e conta com pelo menos 30 anos de registros de dados cuja qualidade foi testada até 2013.

¹ Ver capítulo 2 deste livro.

Figura 3 – Distribuição espacial das estações hidrometeorológicas brasileiras disponíveis no sistema Agritempo



Com vistas a obter a evolução de temperatura no modelo climático ao longo do tempo, adotando como base o ano de 1990, calculou-se a diferença do valor das temperaturas mensais para cada um dos períodos indicados: 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100.

Para cada coordenada espacial (x, y) em um modelo climático M , a variação de temperatura é estimada pela seguinte expressão:

$$\Delta TMM(m, a, x, y) = TMM(m, a, x, y) - TMM(m, 1990, x, y),$$

em que $TMM(m, a, x, y)$ é a média móvel de 11 anos para o mês m do ano a em relação ao ponto (x, y) .

Para cada estação hidrometeorológica catalogada no banco de dados nacional Agritempo, foi possível determinar o valor de ΔTM para cada um dos modelos climáticos e, em seguida, a $\Delta TMMAX$ e a $\Delta TMMIN$ para cada ano/mês.

A fim de obter a temperatura utilizada nas simulações do impacto sobre as culturas agrícolas (TS) para cada coordenada geográfica (x, y) correspondente a uma estação hidrometeorológica, a TS foi calculada da seguinte maneira.

$$TS(m, a, x, y) = TR(m, x, y) + \Delta TMM(m, a, x, y),$$

em que $TR(m, x, y)$ é a temperatura real no local (x, y) no mês m e $\Delta TMM(m, a, x, y)$ é a variação de temperatura para um determinado modelo M no mês m e no ano de interesse a .

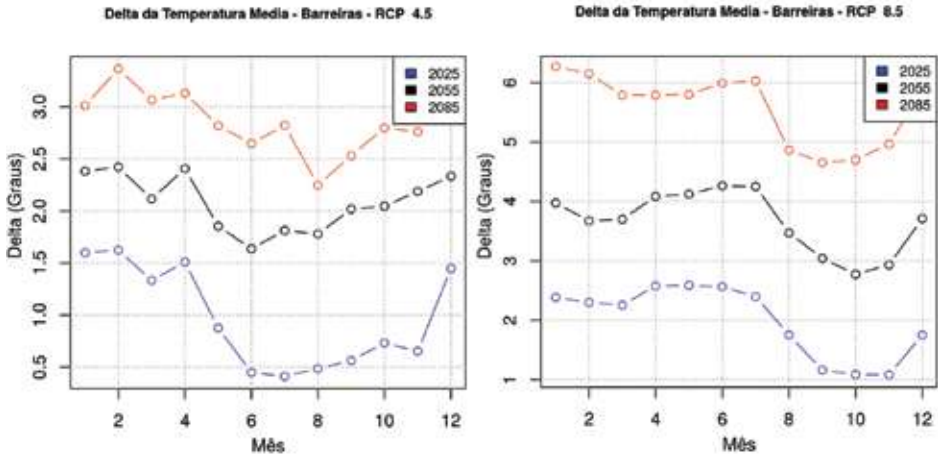
Além de calcular ΔTM , também foram obtidos os valores máximos e mínimos dos modelos ($\Delta TMMAX$ e $\Delta TMMIN$). O padrão foi repetido em todas as estações testadas no Brasil, permitindo, assim, o desenvolvimento de cenários de aumento de temperatura no cenário RCP 4.5 e no cenário RCP 8.5 para 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2099. Estudo similar foi feito por Carvalho *et al.* (2011), testando o modelo do Hadley Centre e verificando possíveis correções com o filtro de Kalman. Quatro localidades foram selecionadas (tabela 1) para verificar a coerência do modelo. A escolha foi baseada na localização das estações em biomas diferentes.

Tabela 1 – Estações selecionadas para verificação do modelo adotado, Eta-HadGEM2-ES

Municípios	Latitude	Longitude
Barreiras	-12,153	-44,99
Petrolina	-9,393	-40,508
Pelotas	-31,772	-52,343
Brasília	-15,78	-47,93

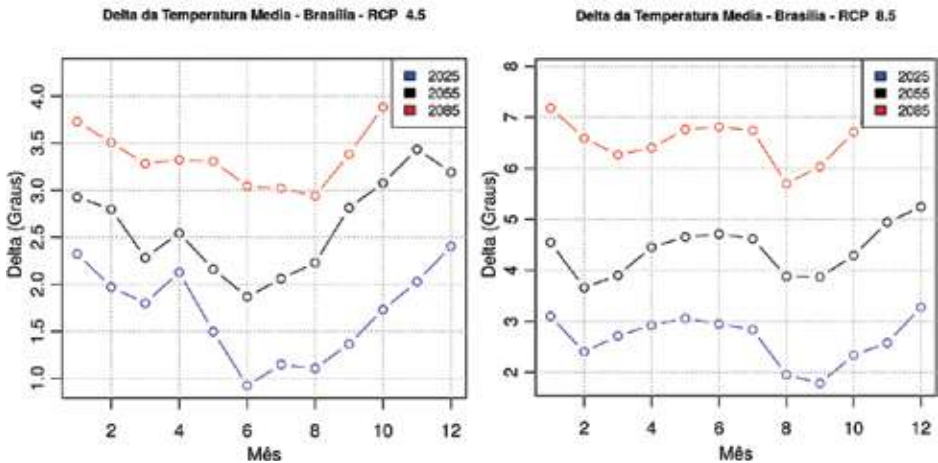
A variação da temperatura foi estimada a partir do delta ou diferença existente entre o período de base e o período futuro. Os resultados foram os seguintes.

Figura 4 – Evolução da temperatura para o município de Barreiras



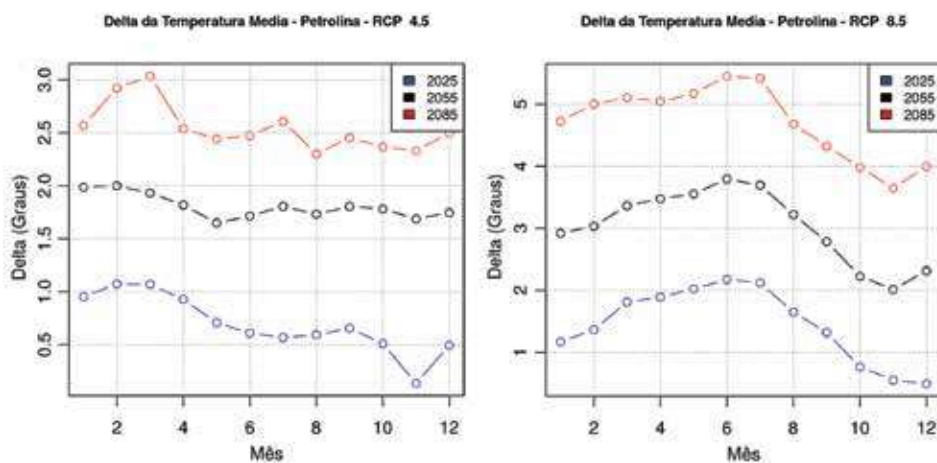
No limite entre o bioma Cerrado e o semiárido, no cenário RCP 4.5, a variação de temperatura atinge 3°C no verão e 2,5°C no inverno. Já no cenário RCP 8.5, a diferença chega a mais de 4°C.

Figura 5 – Evolução da temperatura para o município de Brasília



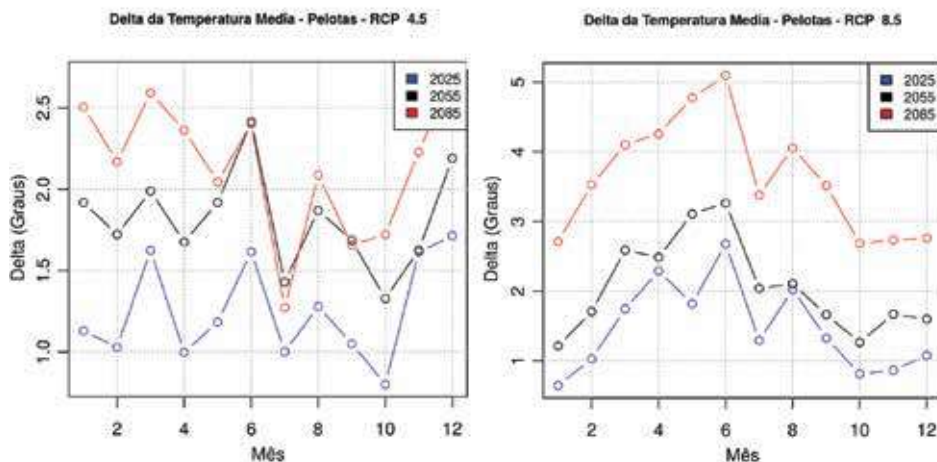
No bioma Cerrado, a situação é mais amena para o cenário RCP 4.5 atingindo aumento de 1 grau até 2085, porém no cenário de alta emissão ou RCP 8.5 atinge 4°C de aumento de temperatura.

Figura 6 – Evolução da temperatura para o município de Petrolina



No cenário RCP 4.5, já em 2025, atinge-se 2,5°C enquanto que, em 2085, é possível ter um pico máximo de 4°C. A situação é mais intensa, como esperado no cenário RCP 8.5, tanto para 2025, quanto para 2085.

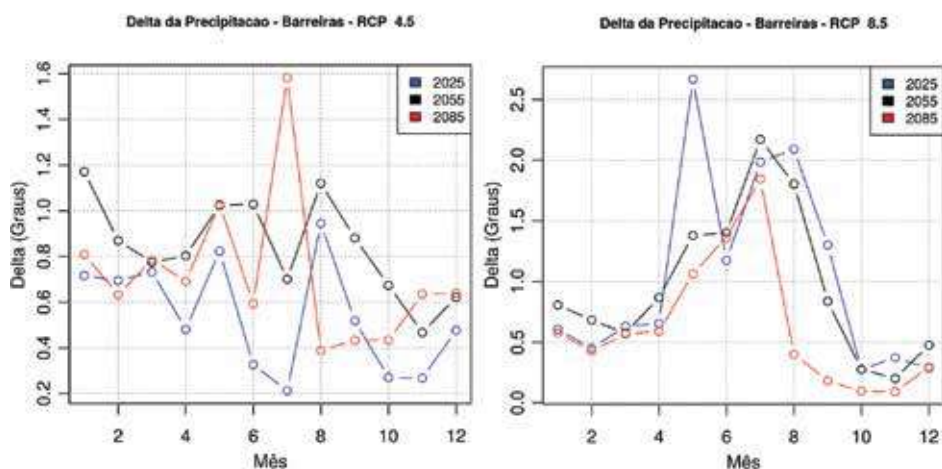
Figura 7 – Evolução da temperatura para o município de Pelotas



No bioma Pampa, há uma grande diferença entre o cenário RCP 4.5 e o RCP 8.5. As amplitudes das diferenças de temperatura não mudam muito, mas o comportamento da temperatura no seu ciclo anual, indica invernos mais quentes, principalmente no cenário RCP 8.5.

Para os testes com a precipitação pluvial, foram feitas análises no passo de tempo mensal, também para os períodos compreendidos entre 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Os gráficos abaixo indicam as variações para os anos de 2025 (ano central do primeiro período), 2055 (ano central do segundo período) e 2085 (ano central do terceiro período).

Figura 8 – Evolução da variação da precipitação para estação de Barreiras

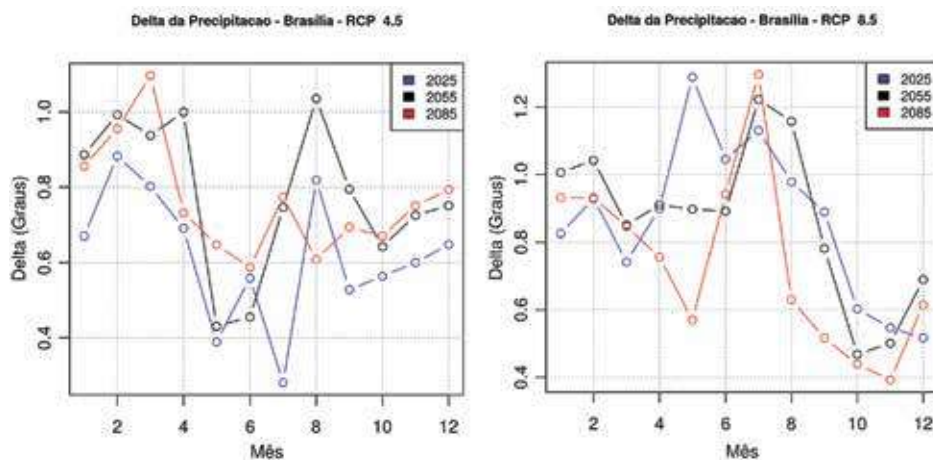


Estes resultados indicam que as análises feitas por Carvalho *et al.* (2014) e Carvalho *et al.* (2013), mostrando as tendências de chuvas máximas e de veranicos em todo Brasil estavam corretas. Faltava a projeção para o futuro, feita então nessas novas simulações e projeções.

A análise da precipitação é mais complexa. Há uma inversão de sinal com relação à chuva para o cenário RCP 4.5 em Barreiras, ou seja, espera-se mais chuva até o ano 2055 no inverno. Esse resultado indica também o que já se conhece com relação ao alto coeficiente de variação da chuva (figura 8).

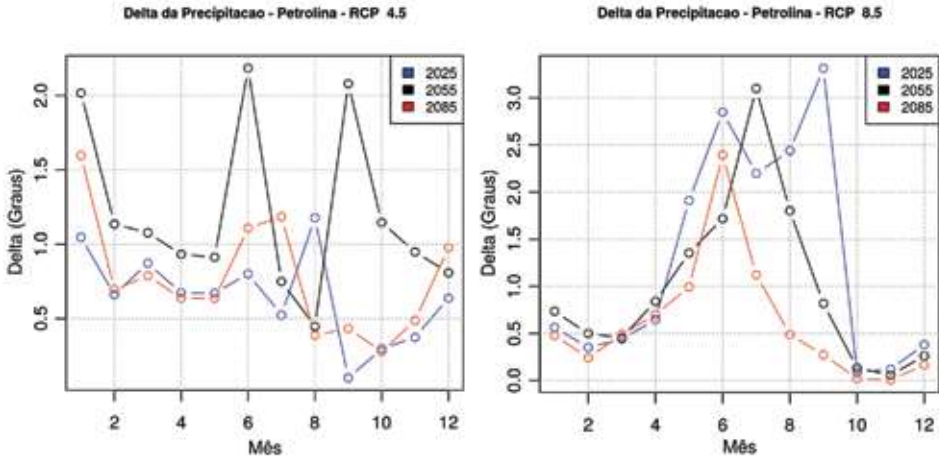
No caso de Barreiras, os valores estimados pelo modelo, indicam um sinal positivo de chuva para o cenário RCP 4.5 e negativo para o cenário RCP 8.5. Ou seja, mantido as emissões baixas, pode chover acima da média na região. Caso as emissões aumentem, a oferta de chuva é menor.

Figura 9 – Evolução da variação da precipitação para estação de Brasília



Mais chuva no inverno e verão tanto para o cenário RCP 4.5 como para o cenário RCP 8.5, e as restrições com relação à chuva aparecem no cenário RCP 8.5, principalmente no período de início de ciclo das culturas, podendo trazer um impacto negativo na produção agrícola, ou seja, redução das áreas de baixo risco climático.

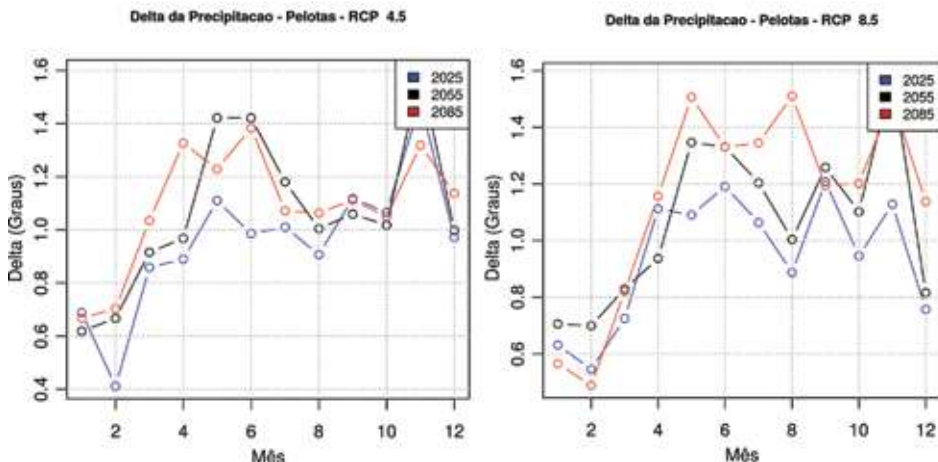
Figura 10 – Evolução da variação da precipitação para a estação de Petrolina



São duas situações: a primeira, no cenário RCP 4.5, indica em todos os períodos redução da precipitação; a segunda, no cenário RCP 8.5 aparece a tendência de aumento ou de anomalias positivas na oferta de chuva no período compreendido entre maio a outubro.

Esses resultados corroboram as indicações de alta incerteza nos modelos principalmente nas regiões semiáridas. O resultado do modelo para o cenário RCP 8.5 indica maior concentração da chuva entre maio e agosto para o período de 2085, o que é mais próximo da climatologia atual. Isso significa menos chuva na região.

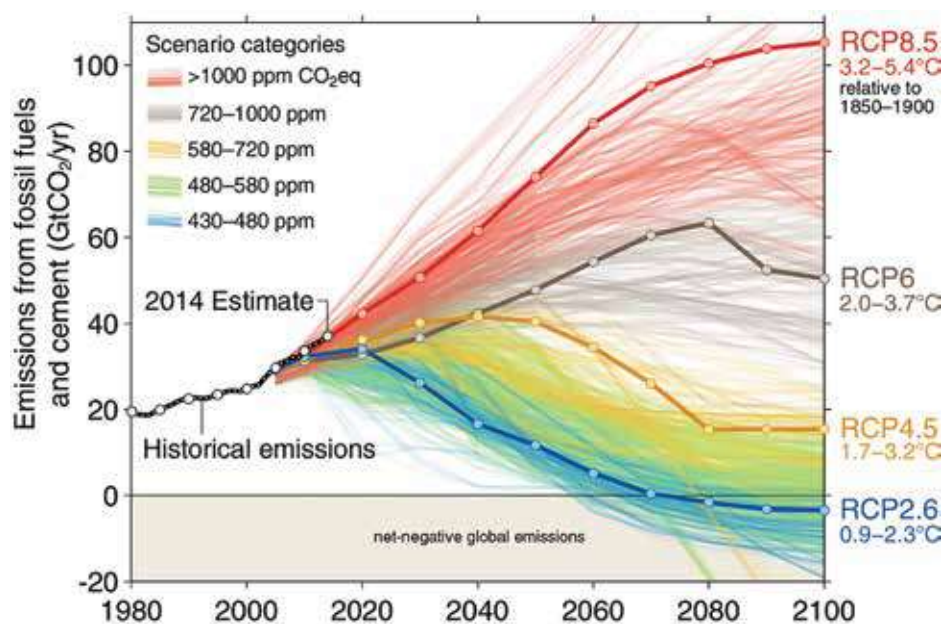
Figura 11 – Variação da precipitação para a estação de Pelotas



Tanto para o cenário RCP 4.5 como para o cenário RCP 8.5, há uma tendência de aumento na oferta de chuva, para os períodos compreendidos entre 2025 e 2085.

Para chegar nesses resultados, foi preciso organizar os dados do modelo regional Eta inicializado com o modelo global do CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5, disponibilizando as informações por latitude e longitude mensais, trimestrais e anuais, corrigidas a partir do período de base de 1961 a 2005. A questão mais importante na avaliação inicial desses cenários é que, segundo o *Global Carbon Project* (Fuss *et al.*, 2014), mostram que as emissões acompanham a linha do cenário RCP 8.5, portanto, o mais impactante, conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Cenários de emissões



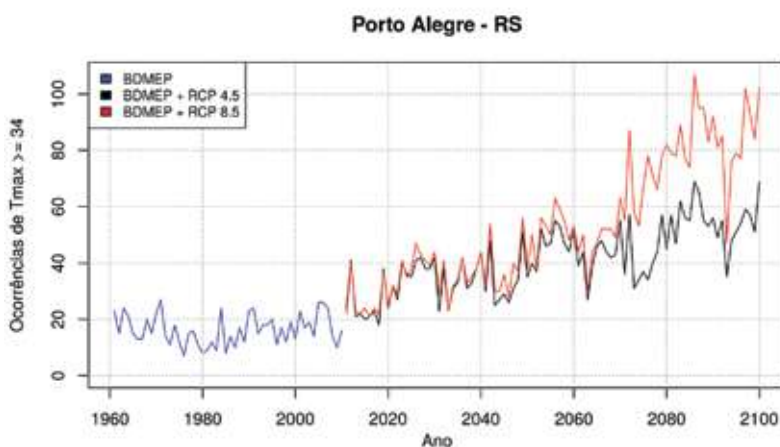
Fonte: Fuss *et al.* (2014)

4 Evolução dos extremos de temperatura (Tmax e Tmin) em localidades do Brasil

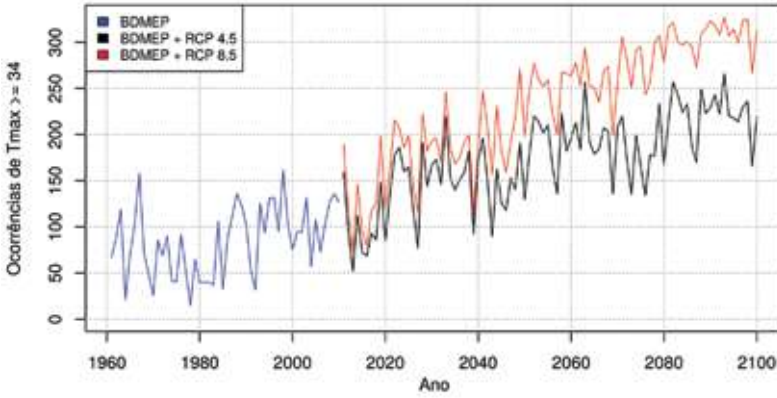
Os últimos relatórios do IPCC indicam que haverá mais incidência de fenômenos extremos, incluindo as temperaturas máximas, os veranicos e as chuvas intensas. A análise do modelo permitiu verificar as tendências dos fenômenos extremos em dois níveis: frequência de ocorrência de temperaturas máximas (todo Brasil); e frequência de ocorrência de geadas (região Sul).

Os resultados estão organizados na forma de gráficos e indicam essas frequências de ocorrência. Foram feitas para 288 estações climáticas no Brasil e acopladas ao modelo Eta-HadGEM2-ES, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados são apresentados na figura 13.

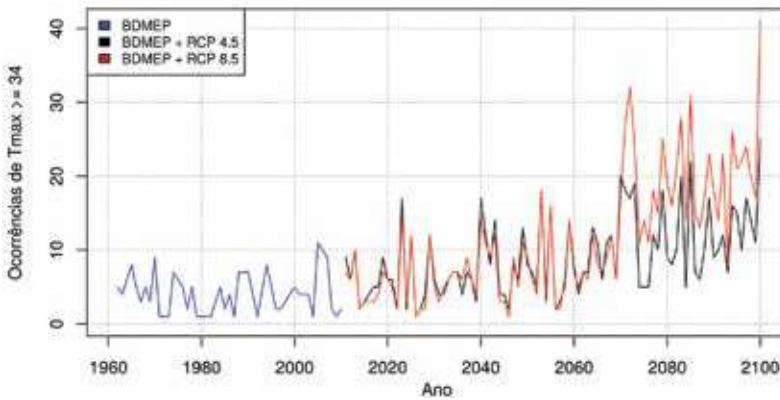
Figura 13 – Frequência de ocorrência de temperaturas máximas superiores a 34°C, em 16 localidades do Brasil



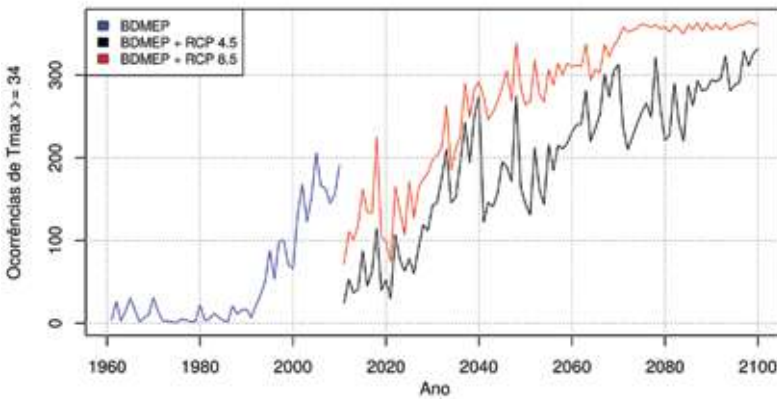
Aracuai - MG



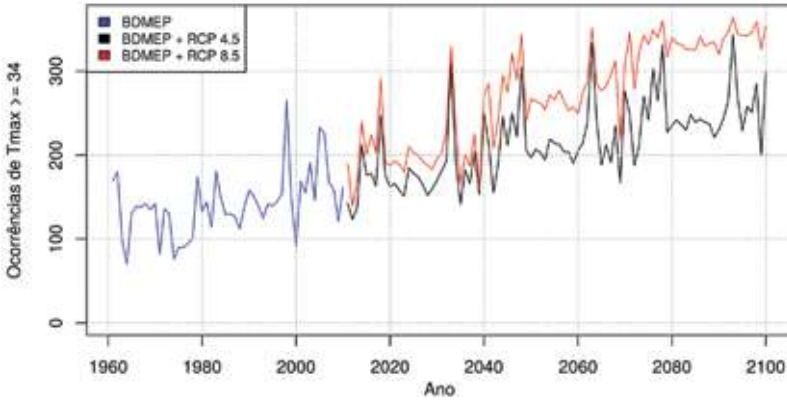
Pelotas - RS



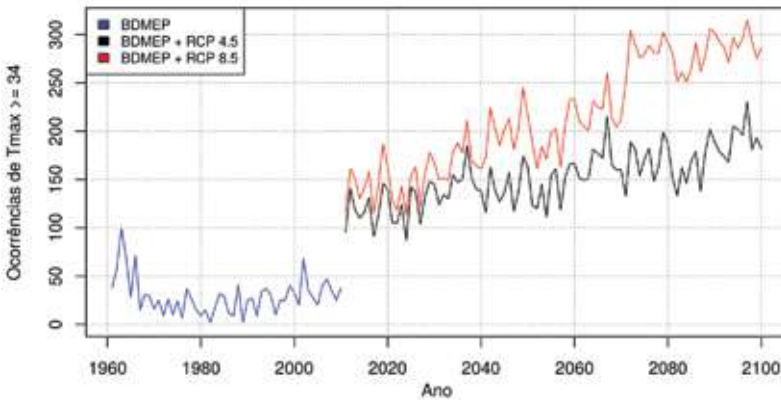
Altamira - PA



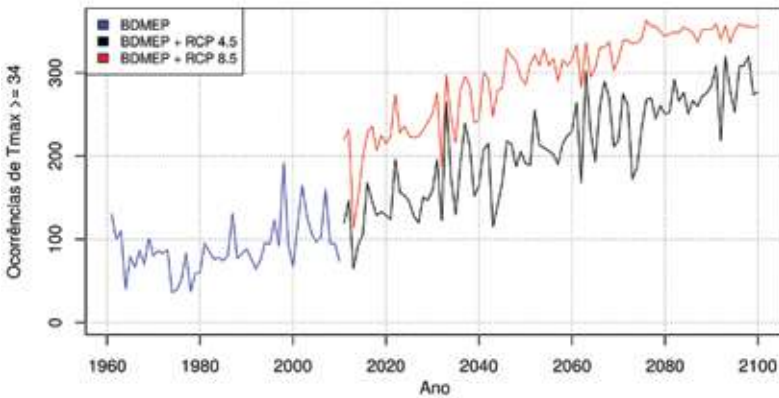
Quixeramobim - CE



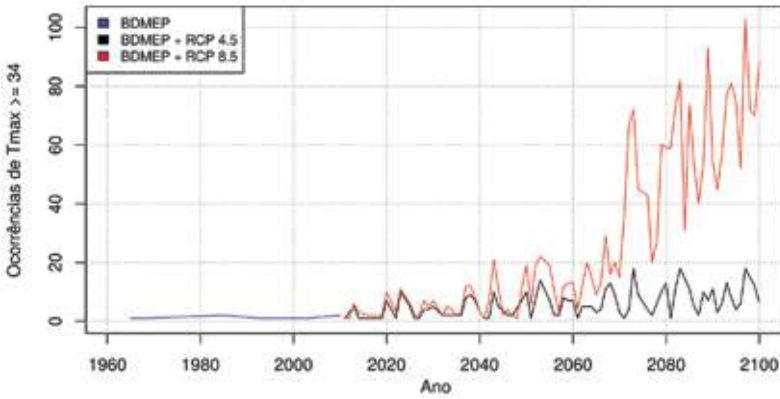
Presidente Prudente - SP



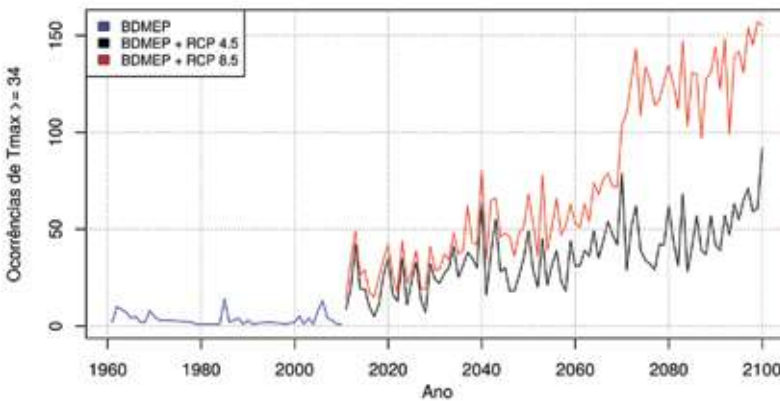
Barreiras - BA



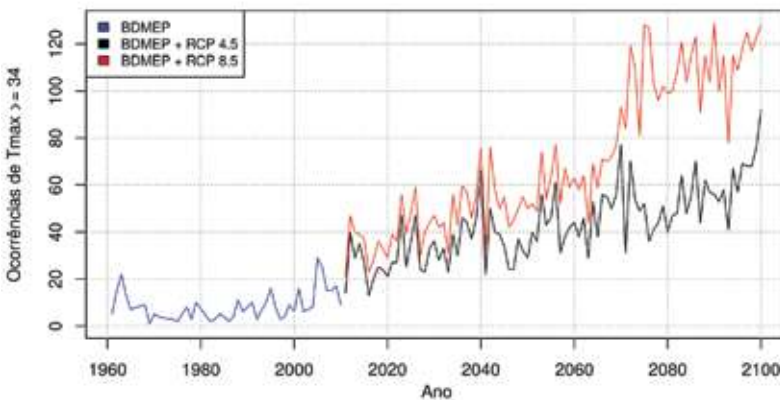
Castro - PR



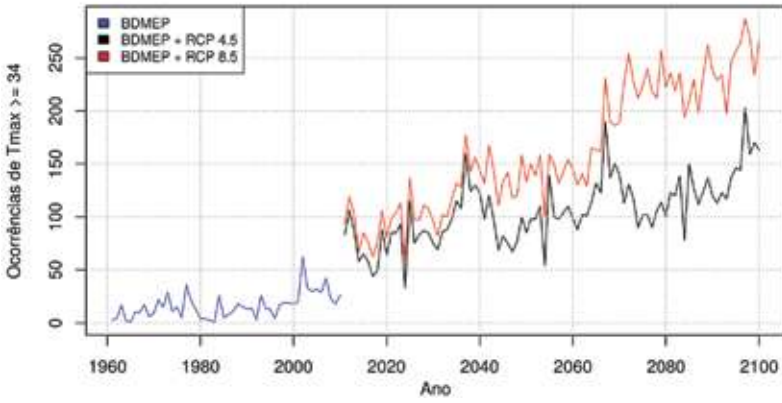
Chapecó - SC



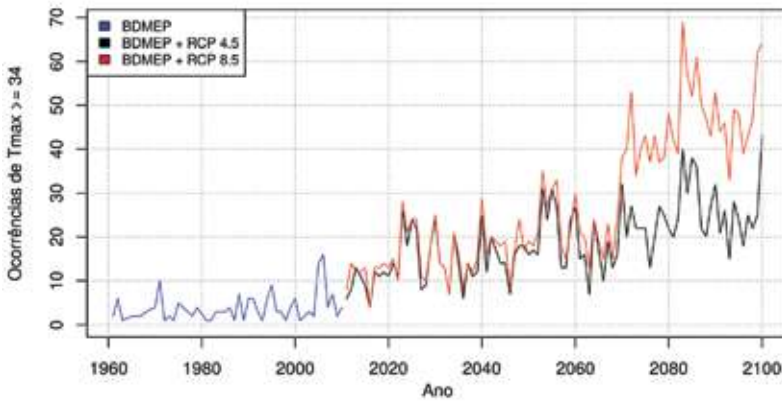
Cruz Alta - RS



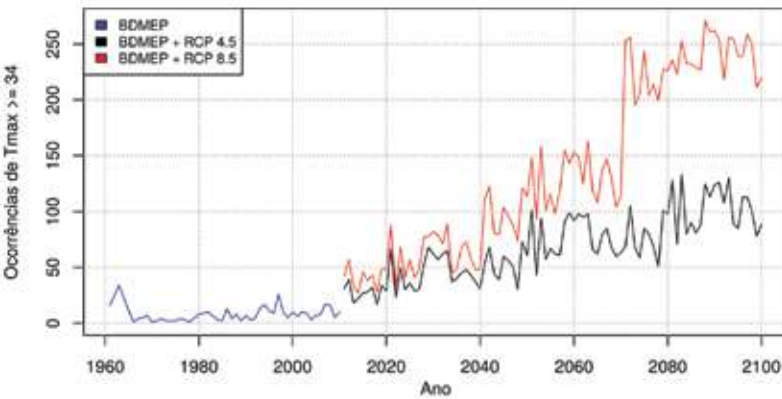
Londrina - PR



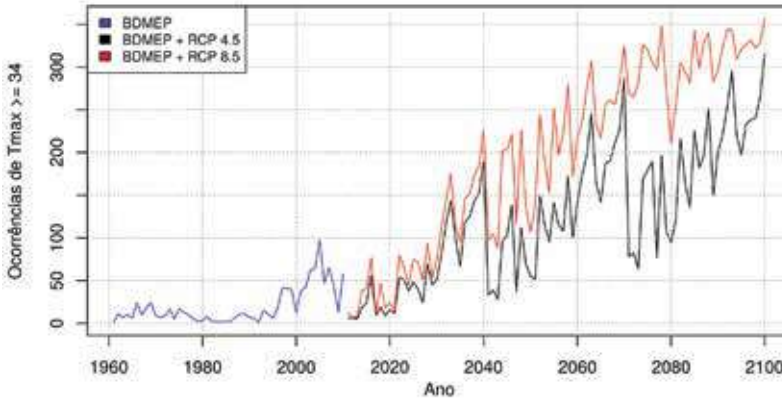
Encruzilhada do Sul - RS



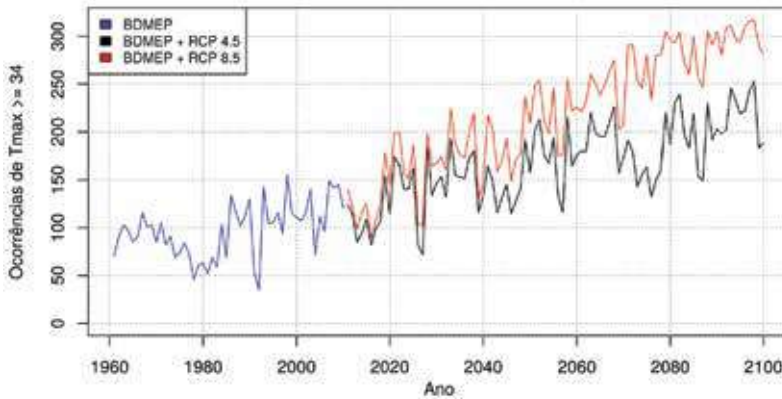
Sete Lagoas - MG



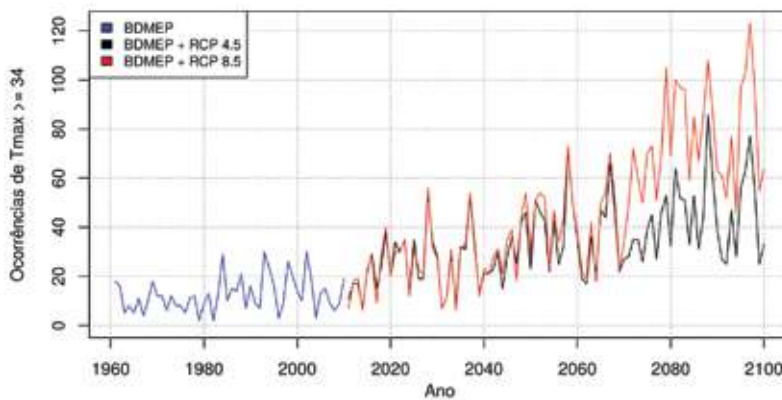
Acarau - CE



Aimores - MG



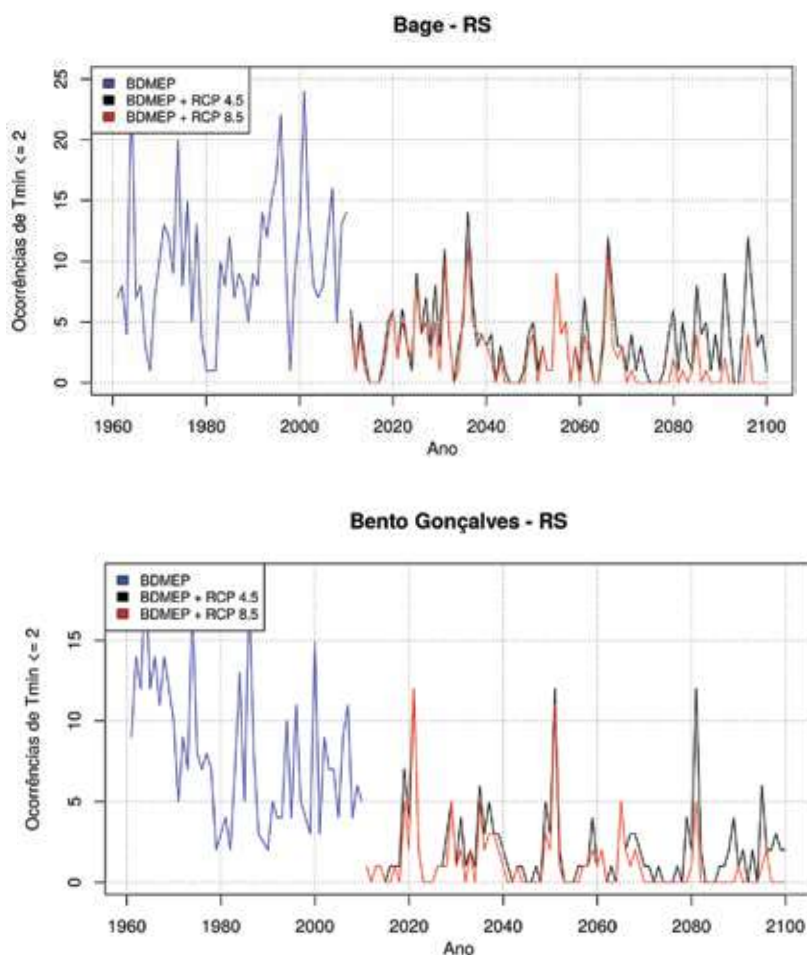
Alto da Boa Vista - RJ



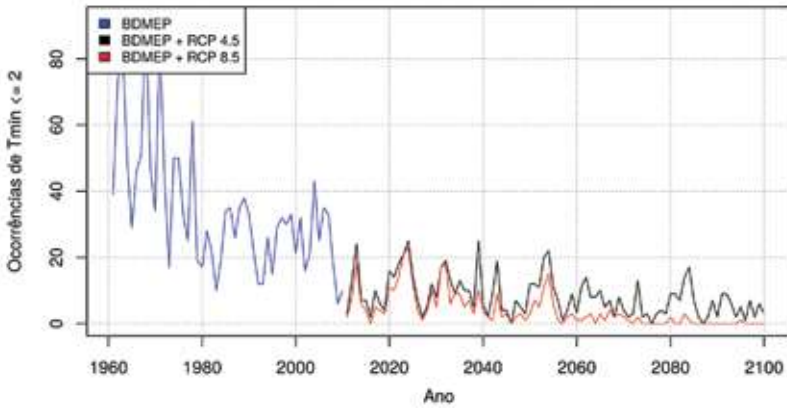
Nota: Em todos os casos, é evidente o aumento da frequência dos fenômenos extremos.

Outro enfoque importante para os eventos extremos são os dias frios. Todas as análises indicam que a temperatura mínima está subindo, portanto, é de se esperar que a frequência de ocorrência de geadas diminua. O foco das análises foi a região Sul, onde se observa maiores frequências de geadas. Nos gráficos a seguir, são ilustradas as possíveis tendências de ocorrência de dias com temperatura inferior a 2°C em algumas cidades do sul do Brasil.

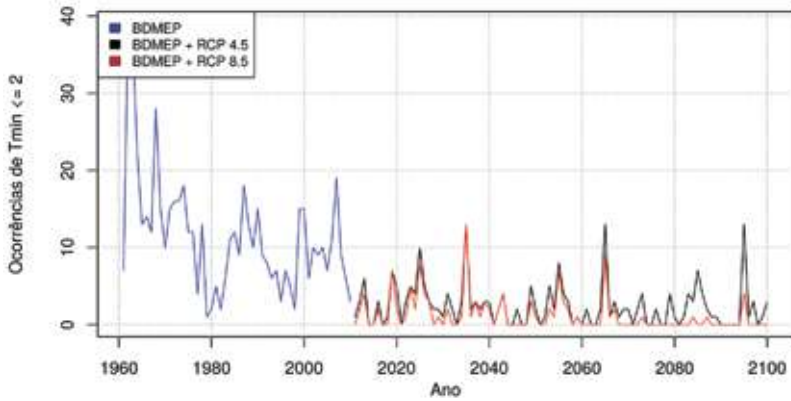
Figura 14 – Ocorrência de dias com temperatura inferior a 2°C em algumas cidades do sul do Brasil



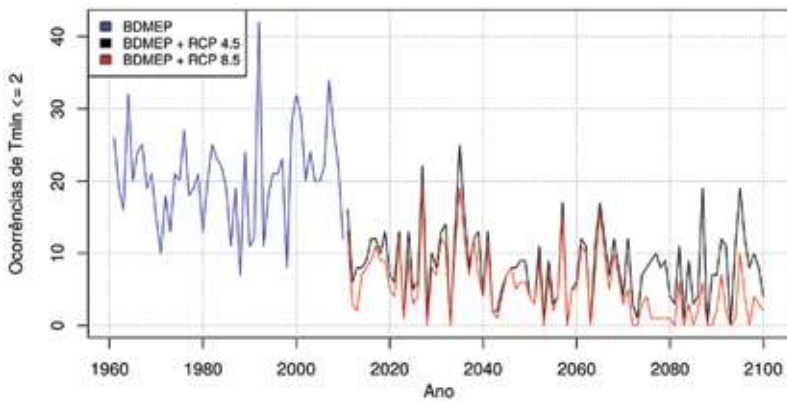
Campos do Jordão - SP



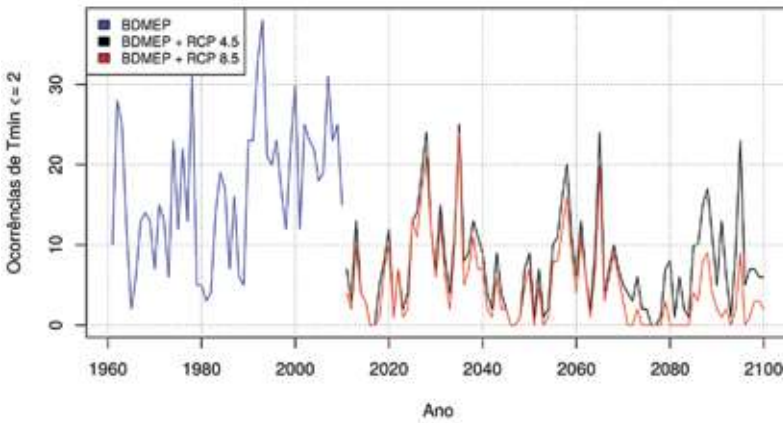
Castro - PR



Cambará do Sul - RS



Bom Jesus - RS



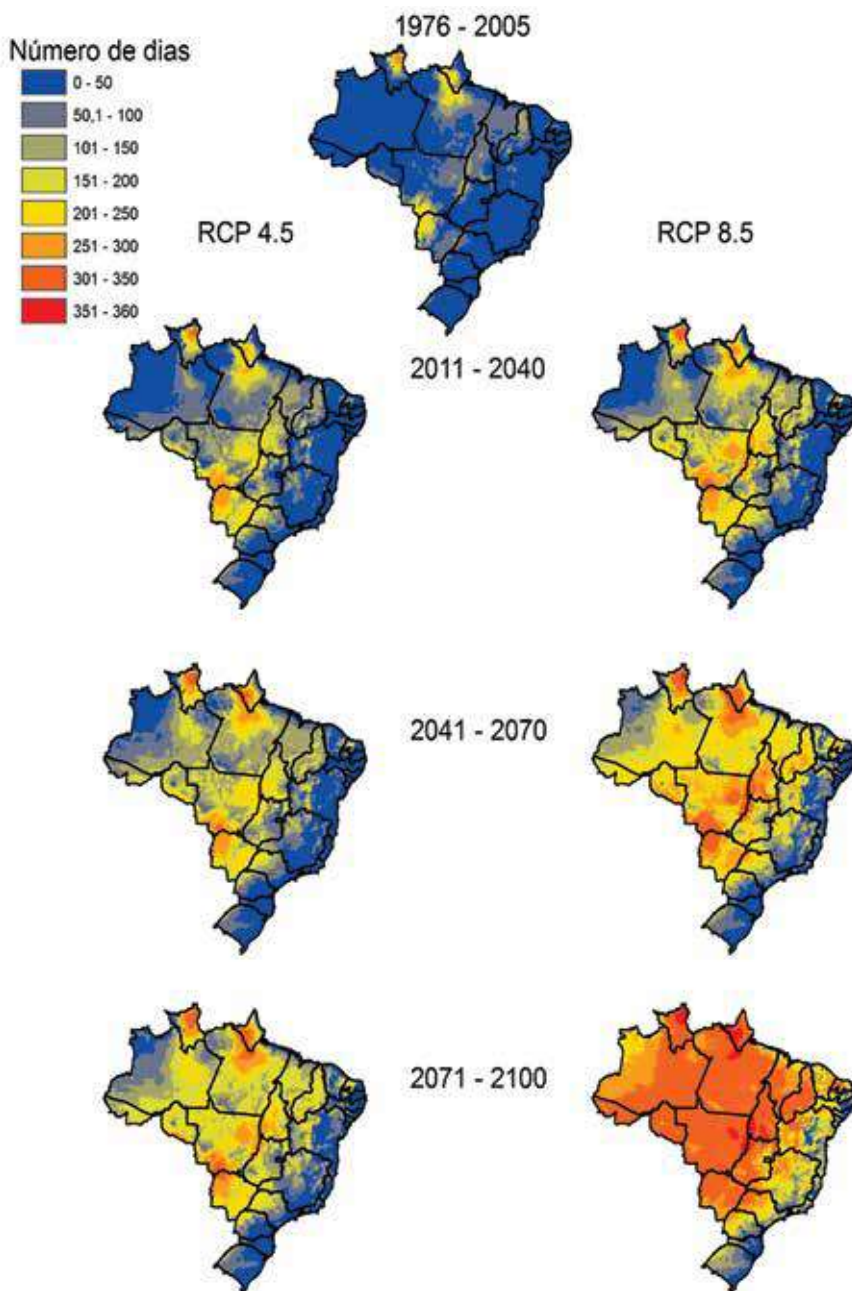
Observa-se a tendência de redução de frequência de dias frios ou geadas na região Sul, o que confirma as tendências dos relatórios anteriores do IPCC que os invernos estão ficando mais quentes. A exceção de Bagé e Bento Gonçalves, a tendência é muito evidente de redução de possíveis geadas na região, ou seja, os invernos serão mais quentes.

5 Mapeamento da ocorrência de extremos de temperatura nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5

Neste item, foi feita a espacialização da frequência de ocorrência de temperaturas acima de 34°C, nos períodos indicados. A figura 15 ilustra a situação para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

As consequências para agricultura com essa alta frequência de ocorrência de temperaturas acima de 34°C é abortamento de flores do café, da laranja e do feijão, morte de frangos em aviários, abortamento nas porcas e redução da produção de leite. No caso específico dos frangos, o limite de temperatura para óbitos é de 28°C. Observe-se que, nas atuais estimativas de emissões, estas seguem a curva do cenário RCP 8.5 o que coloca em risco parte da produção agropecuária do Brasil.

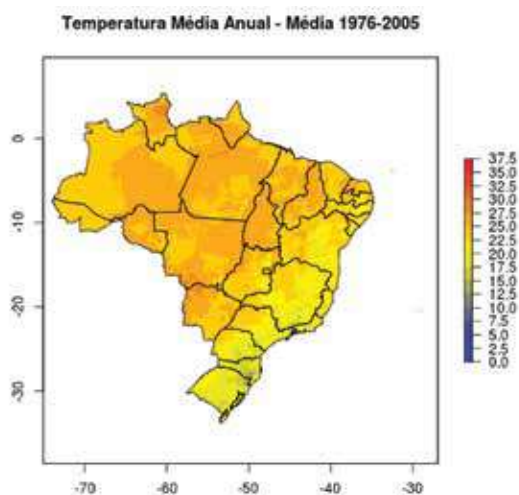
Figura 15 – Distribuição espacial da frequência de ocorrência de dias com temperatura superiores a 34°C – Médias anuais do número de dias com temperaturas máximas acima de 34 graus (ETA-HADGEM2)



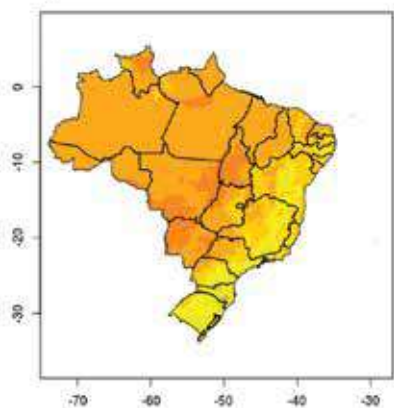
6 Mapeamento da climatologia das temperaturas e chuva para os períodos indicados

A maneira como os dados estão organizados, permitem tanto a análise pontual como visto anteriormente como a análise espaço temporal. Nesse sentido, foram feitos mapeamentos dos extremos de temperatura nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para todo o Brasil, nos períodos de 1990, 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2099, utilizando, como anos centrais, 2025, 2045 e 2085. Os mapas são referentes a climatologia do período, ou seja, analisados em períodos de 30 anos. Os resultados, então organizados na forma de mapas, são os que se seguem (figuras 16 a 18).

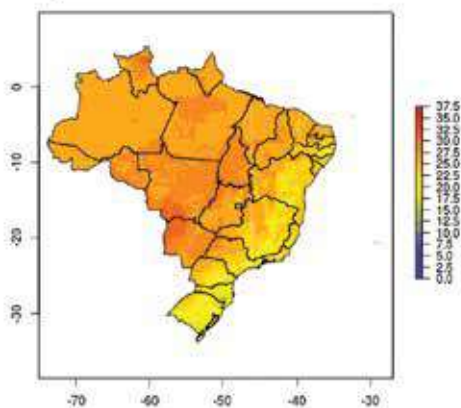
Figura 16 – Climatologia das temperaturas média e máxima anual



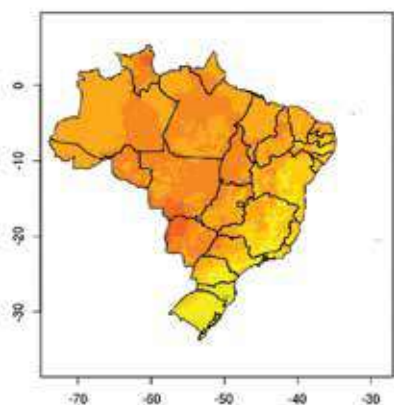
Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2011-2040



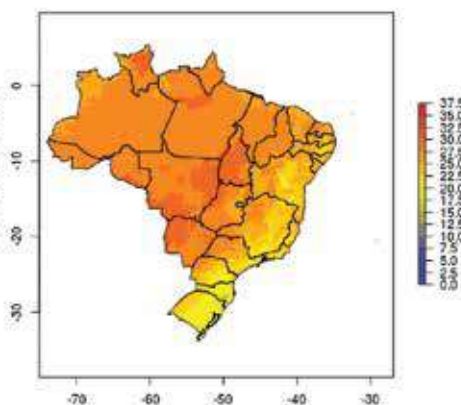
Temperatura Média Anual - RCP 8.5 - Média 2011-2040



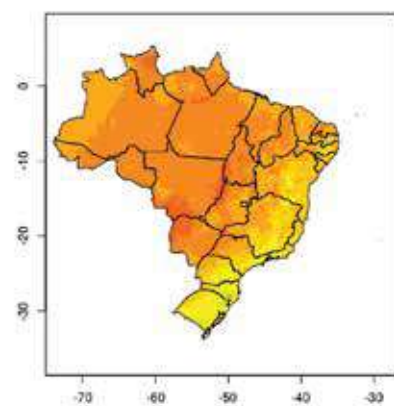
Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2041-2070



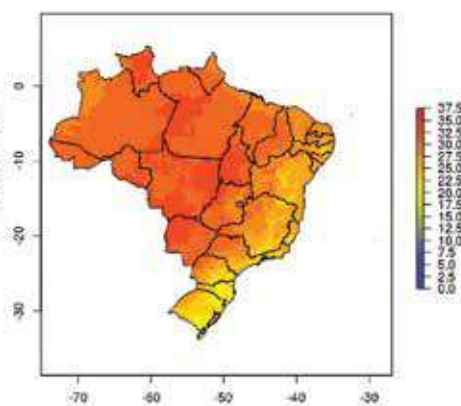
Temperatura Média Anual - RCP 8.5 - Média 2041-2070



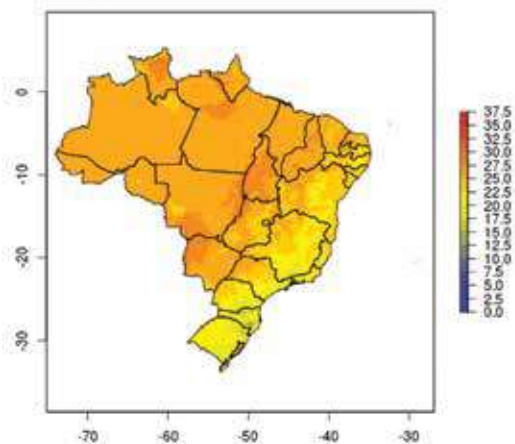
Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2071-2099



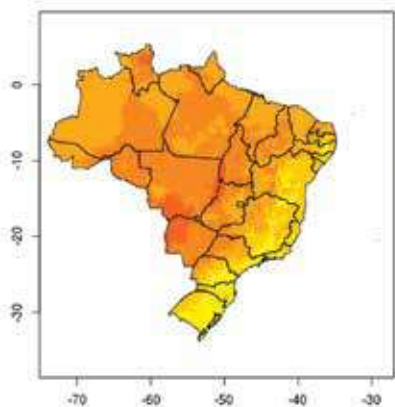
Temperatura Média Anual - RCP 8.5 - Média 2071-2099



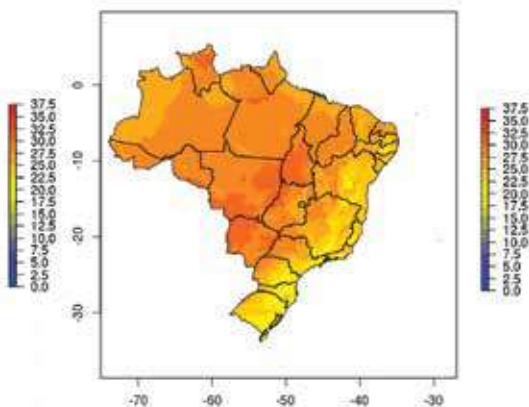
Temperatura Máxima Anual - Média 1976-2005



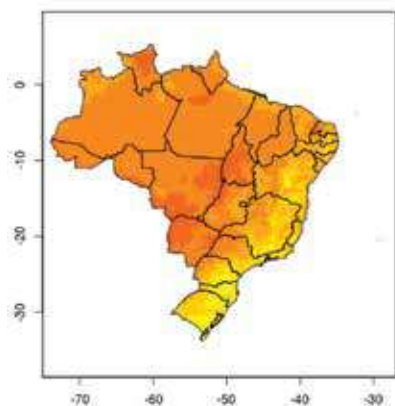
Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2011-2040



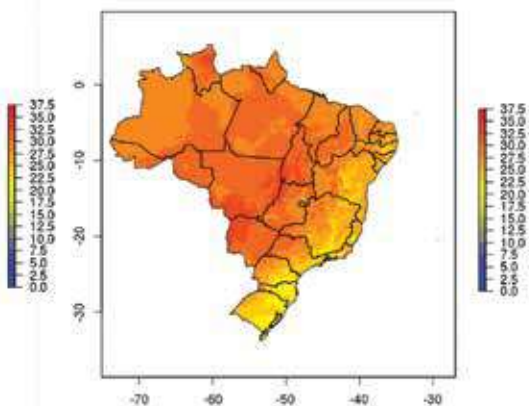
Temperatura Máxima Anual - RCP 8.5 - Média 2011-2040



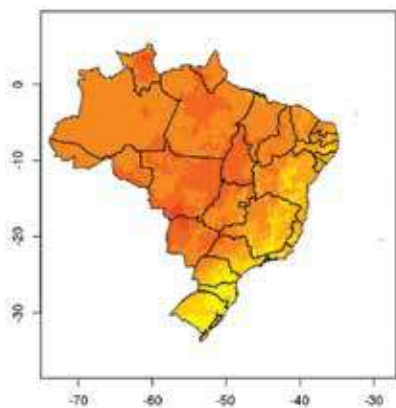
Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2041-2070



Temperatura Máxima Anual - RCP 8.5 - Média 2041-2070



Temperatura Máxima Anual - RCP 4.5 - Média 2071-2099



Temperatura Máxima Anual - RCP 8.5 - Média 2071-2099

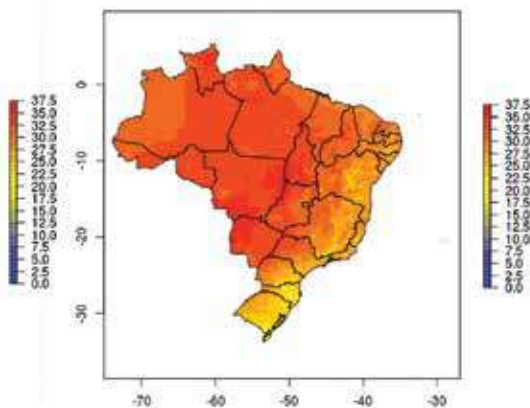
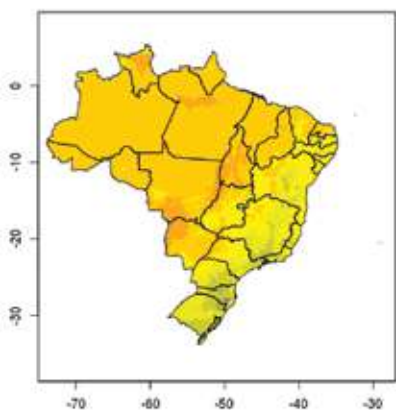
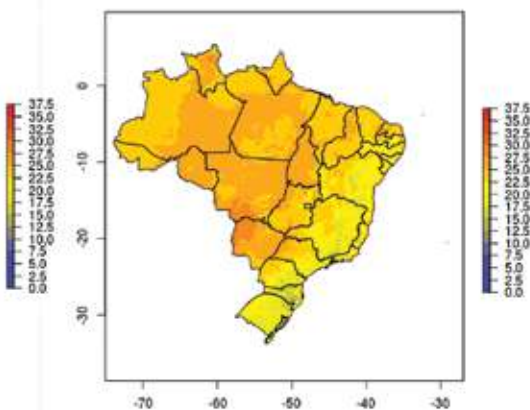


Figura 17 – Climatologia da temperatura mínima anual

Temperatura Mínima Anual - Média 1976-2005



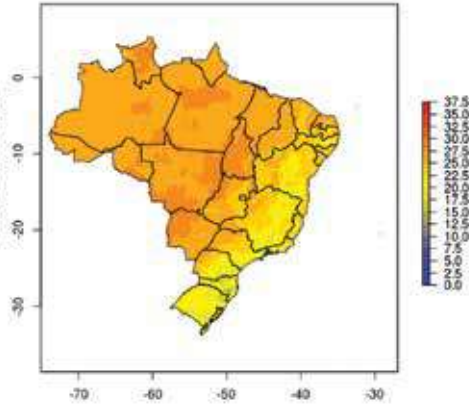
Temperatura Mínima Anual - RCP 4.5 - Média 2011-2040



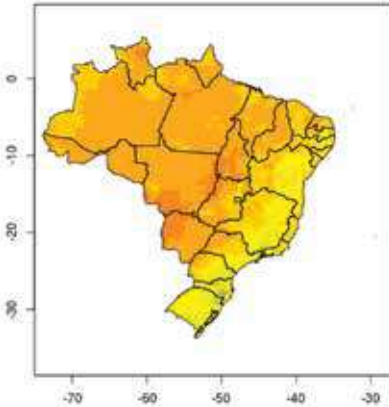
Temperatura Mínima Anual - RCP 4.5 - Média 2041-2070



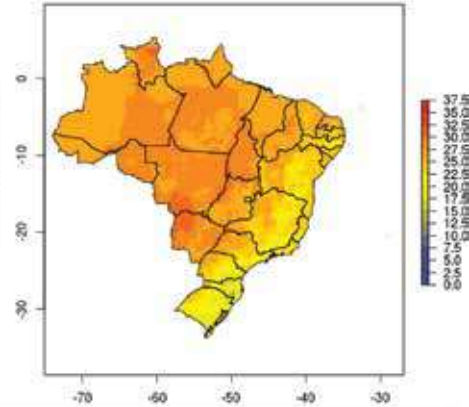
Temperatura Mínima Anual - RCP 4.5 - Média 2071-2099



Temperatura Mínima Anual - RCP 8.5 - Média 2011-2040



Temperatura Mínima Anual - RCP 8.5 - Média 2041-2070



Temperatura Mínima Anual - RCP 8.5 - Média 2071-2099

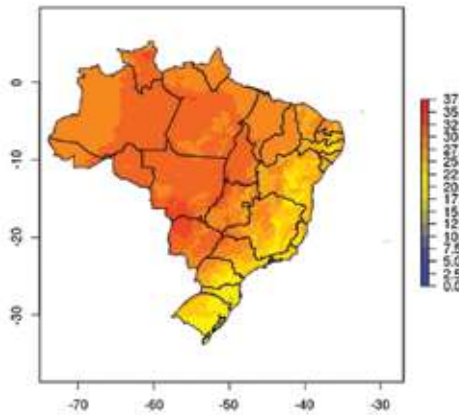
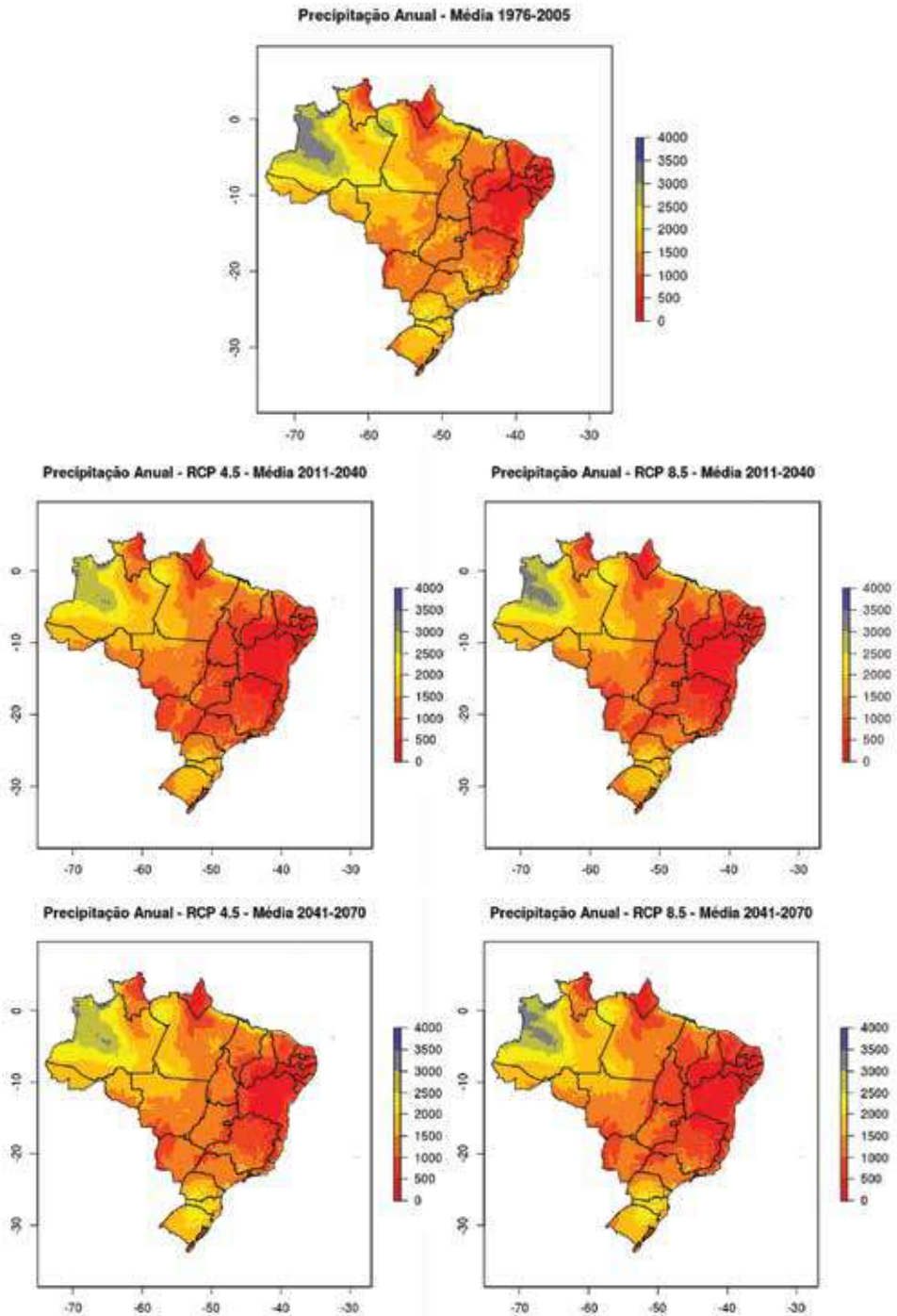
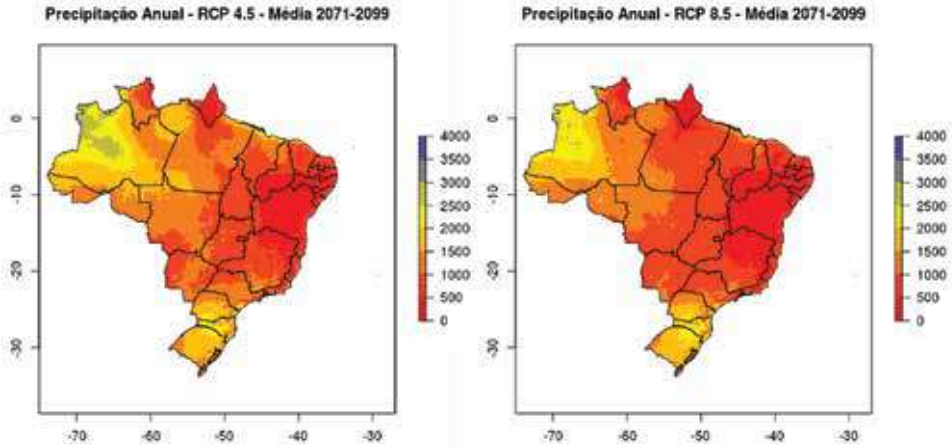


Figura 18 – Climatologia da precipitação

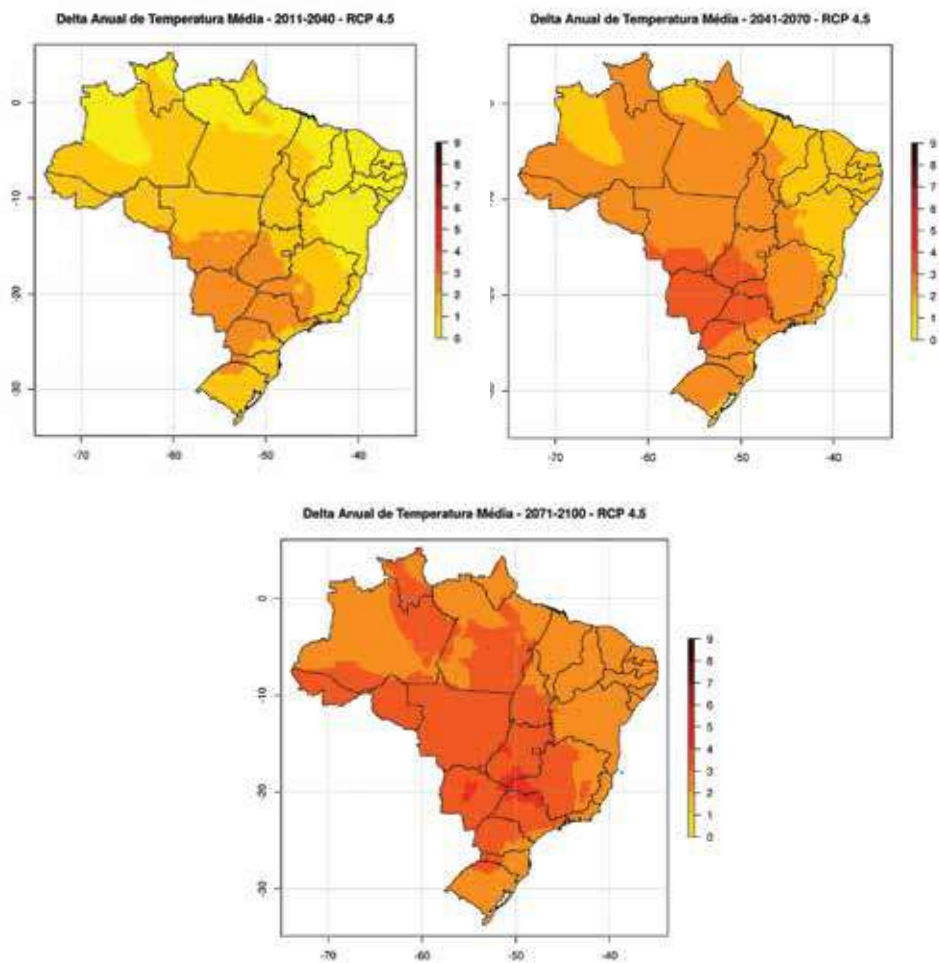


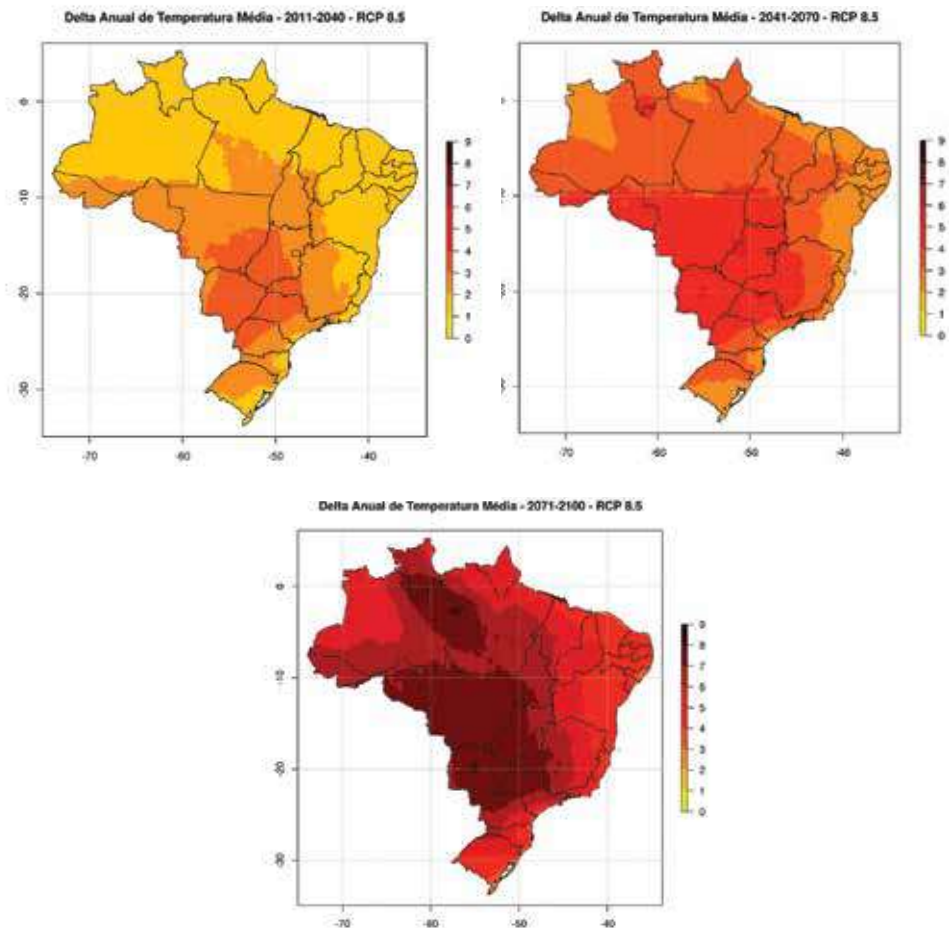


Nessa sequência de mapas, foram ilustradas as variações de temperatura média, máxima e mínima para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, nos períodos compreendidos entre 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2090. Todos comparados com a climatologia dos anos base 1975–2005. É nítido crescimento da temperatura seja para o cenário RCP 4.5 como para o cenário RCP 8.5. Por outro lado, na distribuição da chuva, aparece uma tendência de aumento no período 2041–2070. É preciso verificar melhor nas saídas do modelo HadGEM2-ES porque existe essa mudança de sinal, que terá reflexo no déficit hídrico das culturas agrícolas.

Os últimos mapas referentes ao clima são aqueles que mostram as variações de temperatura entre um período e outro, ou seja, quanto de aumento ou redução de temperatura ocorreu no período de 30 anos.

Figura 19 – Incremento de temperatura por período em graus Celsius





A variação de temperatura é muito forte, tanto para o RCP 4.5 como para o RCP 8.5, mas estão dentro da margem de estimativa de aumento de temperatura feito pelo IPCC. Observa-se que, no caso do RCP 8.5 para 2071–2099, os *hot spots* passam a ser cerrado e parte da Amazônia.

7 Impactos na agricultura: definição dos conjuntos de parâmetros de cada uma das culturas a serem simuladas

A base da simulação dos impactos estimados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 foram os métodos de estimativas do zoneamento de riscos climáticos. No Brasil, o zoneamento dos riscos agrícolas é uma política pública que existe desde 1996 e cada um de seus 5.564 municípios (até o ano de 2010) foi demarcado de acordo com a adequação ao cultivo segundo uma probabilidade mínima de 80% de se obter uma safra economicamente viável. O zoneamento baseia-se nas fases de crescimento de cada uma das culturas (fenologia) no estresse hídrico, no risco de inundação e nas temperaturas extremas em fases críticas do desenvolvimento das plantações. Por exemplo, o estresse hídrico no florescimento ou no enchimento de grãos pode afetar de modo significativo as safras. O excesso de chuvas na época da colheita pode arruinar uma lavoura. A incidência de temperaturas extremas pode causar a perda da produção devido à deterioração da flor, no caso de temperaturas elevadas ou de geada resultante de baixas temperaturas.

Em 2001, a Embrapa e a Unicamp desenvolveram um simulador para projetar os riscos agrícolas em função do clima e do solo. Esse simulador, o SCenAgri, foi aperfeiçoado em 2012 e, hoje, faz as estimativas de impactos do clima para mais de 40 culturas.

Além de prover informações sobre as necessidades das culturas agrícolas, as características e a qualidade do solo e os dados meteorológicos, o zoneamento foi ainda mais aperfeiçoado de modo a incluir índices específicos de sensibilidade dos cultivos a temperaturas extremas e eventos de umidade durante as fases críticas do seu crescimento, com base nos conhecidos calendários agrícolas. Por exemplo, os índices de risco de culturas se fundamentam no balanço hídrico-agrometeorológico e são calculados a partir da evapotranspiração, que é a soma da transpiração foliar e da evaporação do solo. Cada cultivo tem características ideais de umidade do solo para poder alcançar níveis ótimos de fotossíntese, crescimento e produtividade. Os fatores climáticos essenciais para esse processo são a temperatura e a umidade do

solo, que podem ser usados para determinar em que área uma cultura agrícola pode ser produzida no Brasil, assim como os riscos climáticos a que está exposta.

Ao incorporar os cenários de aquecimento global do IPCC, a temperatura prevista e qualquer impacto causado pela precipitação atmosférica/umidade do solo podem ser inseridos nas simulações com base nos índices de risco associados à temperatura e à umidade para qualquer cultura específica. As áreas de baixo risco são aquelas onde há estresse hídrico, que garante a germinação de sementes e, especialmente, o florescimento, além do enchimento de grãos, que são fatores essenciais para a produção final. Esse risco não deve exceder a 20%.

Nas atuais projeções há uma melhoria do atual sistema de zoneamento agrícola brasileiro de modo a incluir projeções e cenários climáticos futuros e, uma vez que essa etapa seja concluída, ele começará a exercer um imediato impacto operacional e nas políticas em nível nacional.

O zoneamento agroclimático integra os modelos de crescimento das culturas às simulações climáticas aperfeiçoadas descritas acima e usa uma matriz de risco agrícola baseada em uma tipologia avançada de qualidade do solo e da terra, em dados meteorológicos, nas necessidades hídricas e na fenologia das culturas.

7.1 O Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) do Método de Zoneamento Agroclimático

O zoneamento tem como base um índice de oferta de água para o cultivo (vulnerabilidade), obtido pela proporção entre o nível real e o nível máximo de evapotranspiração por cultura, que é utilizado para a realização de um zoneamento segundo a adequação e o risco de uma lavoura. As áreas de risco estabelecidas para cada município do país indicam as que têm pelo menos 80% de probabilidade de proporcionar uma colheita economicamente aceitável. Cada cultura ou variedade agrícola possui um conjunto predefinido de condições climáticas que se baseiam em observações de campo e pesquisas de longo prazo. A duração total do ciclo de uma cultura é dividida em quatro fases de **crescimento** fenológicas (desenvolvimento inicial, crescimento vegetativo, reprodução e maturidade),

em que a terceira fase é, em geral, considerada como essencial, em razão principalmente da alta sensibilidade da floração aos períodos de seca e(ou) às temperaturas elevadas. A duração de cada fase do ciclo fenológico é definida por graus-dia ou unidades de calor. A incidência de temperaturas extremas pode causar perda da produção devido à desintegração da flor, no caso de temperaturas elevadas ou de geada resultante das baixas temperaturas.

7.2 Classificação do solo e o Mapa de Zoneamento Agrícola

Os solos são classificados em três tipos – arenoso, médio e argiloso –, que apresentam baixa, média ou alta capacidade de retenção de água, respectivamente. O coeficiente de cultura (Kc) é definido de acordo com o solo típico e mede o consumo de água em cada fase do desenvolvimento de uma cultura.

7.3 Identificação das áreas de cultivo menos vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas

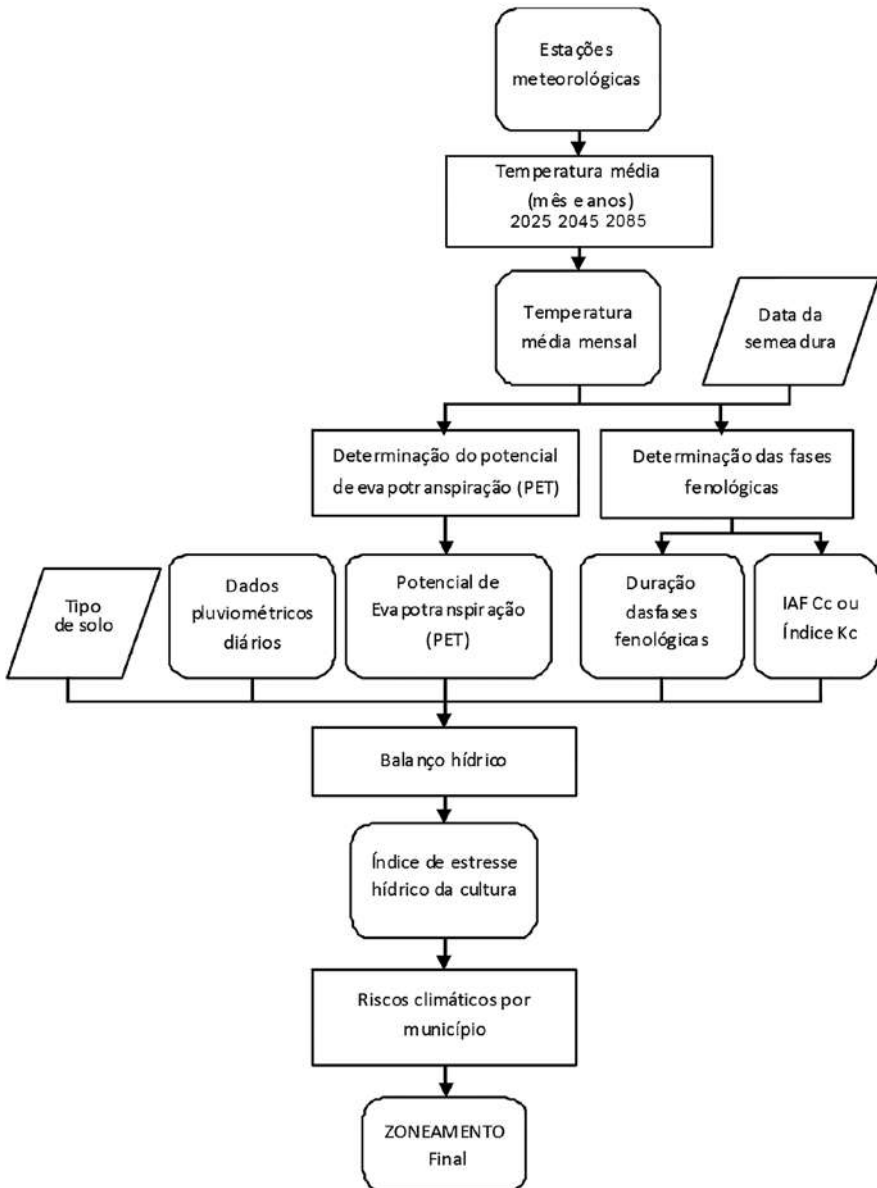
As áreas vulneráveis são identificadas e quantificadas com base nos efeitos de temperatura em 2025, 2045 e 2085. Os princípios adotados na determinação do risco climático são os seguintes.

As áreas com risco mínimo são aquelas que não têm deficiência de água no solo, o que resulta em uma boa germinação, floração e enchimento de grãos. Esse risco não deve exceder 20% e se baseia no índice de evapotranspiração dos cultivos.

Adotando os critérios acima, é possível avaliar o risco do plantio de qualquer produto agrícola no Brasil. Para aperfeiçoar as avaliações de risco, além da umidade do solo também, são usadas as temperaturas previstas para 2025, 2045 e 2085.

Em relação aos estudos anteriores, o grande avanço da abordagem acima é que cada zona agroecológica de baixo risco também é analisada quanto aos fatores relacionados a tipos de solo, encostas íngremes, área de reserva legal, zonas

Figura 20 – Organograma dos componentes e dos processos biofísicos, climáticos e de crescimento das plantas utilizados no zoneamento



Fonte: Zullo Junior *et al.* (2006).

ribeirinhas (áreas de preservação permanente – APPs), áreas indígenas, áreas protegidas, aumentando desse modo a precisão das estimativas de produtividade de uma cultura e da probabilidade de ocorrência de impactos climáticos.

Para obter os impactos previstos das mudanças climáticas na temperatura e na precipitação em 2025, 2045 e 2085 sobre as culturas selecionadas, utilizouse o SCenAgri da Embrapa Informática Agropecuária, que integra informações sobre clima, solo, água e características/necessidades das culturas com base nos conjuntos de dados de campo testados no nível nacional. O SCenAgri pode ser empregado na simulação de cenários futuros da produção agrícola, que se fundamentam em projeções climáticas regionais.

Os dados utilizados nas simulações, por cultura são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Conjunto de parâmetros utilizados no simulador de culturas*

Cultura	Ciclo	CAD	ISNA
Arroz	120	50	0,6
Feijão safra 1	90	40/45	0,6
Feijão safra 2	90	40/45	0,6
Milho safra 1	120	50	0,55
Milho safrinha	120	60	0,55
Soja	125	40	0,60/0,65
Trigo	130/140	40/50	0,55

* Ciclo em dias, capacidade de água disponível em mm e ISNA em relação a ETR/ETM (evapotranspiração real e evapotranspiração máxima).

7.4 Simulação dos impactos para as culturas de soja, milho, milho safrinha, feijão e trigo para os períodos de 2025, 2055 e 2085, tendo como ano-base 1990, cenários RCP 4.5 e RCP 8.5

A partir do simulador SCenAgri acoplado aos dados do Eta, foram feitas as avaliações dos impactos para as culturas de milho, milho safrinha, soja, trigo, feijão primeira safra e feijão segunda safra considerando, a duração do ciclo, a duração das fases fenológicas, os tipos de solos predominantes, a evapotranspiração máxima de cada cultura em cada período de 10 dias e os coeficientes de cultura. Foram avaliadas as condições de evolução das áreas de baixo risco para alto risco climático em função das saídas do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Toda simulação foi baseada nas indicações do zoneamento agrícola de riscos climáticos em que estão indicadas as áreas de baixo risco e alto risco climáticos tendo, como corte, 80% de chance de sucesso, ou seja, no caso das culturas em questão, identificação da baixa ocorrência de deficiência hídrica durante o ciclo da cultura. A indicação do baixo risco é determinada pelo cálculo de um índice correspondente à relação ETR/ETM (evapotranspiração real e evapotranspiração máxima), que depende da temperatura e da oferta de água. Nos cenários de aquecimento, esse índice cai e regiões que antes eram consideradas de baixo risco podem passar a ser de alto risco para produção. Após a simulação, é calculado o impacto em termos percentuais, entre a área potencial de baixo risco no ano de 1990 e as áreas potenciais de baixo risco calculadas para os anos de 2025, 2055 e 2085, utilizando os dados de chuva e temperatura do modelo regional Eta inicializado com o modelo global do CMIP5, HadGEM2-ES RCP 4.5 e RCP 8.5.

Nas tabelas a seguir, são indicados os valores absolutos das áreas estimadas de baixo risco para cada cenário, para cada ano e para cada cultura, e o valor do impacto em termos percentuais nos casos estudados.

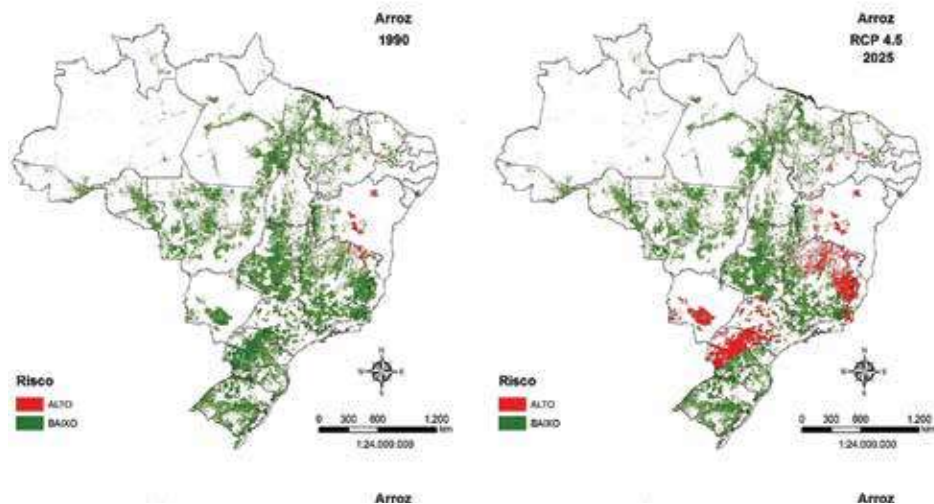
Impacto nas áreas de baixo risco segundo as simulações do modelo EtaHadGEM2-ES cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para períodos de 2025, 2055 e 2085.

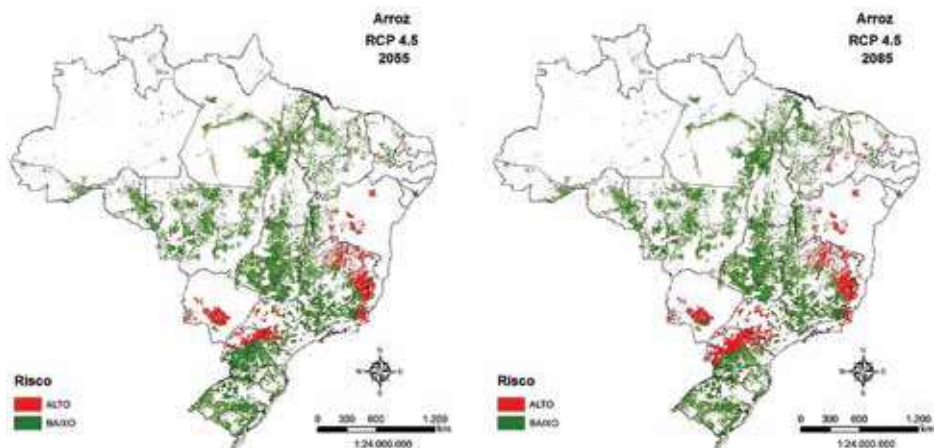
1º caso – Arroz

Tabela 3 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

	Cenário RCP 4.5					
Arroz	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	2.306.597	-4,4	2.329.526	-3,5	2.316.059	-4,0
Área plantada (ha)						
2.412.987	Cenário RCP 8.5					
	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	2.238.483	-7,2	2.232.870	-7,5	2.077.094	-13,9

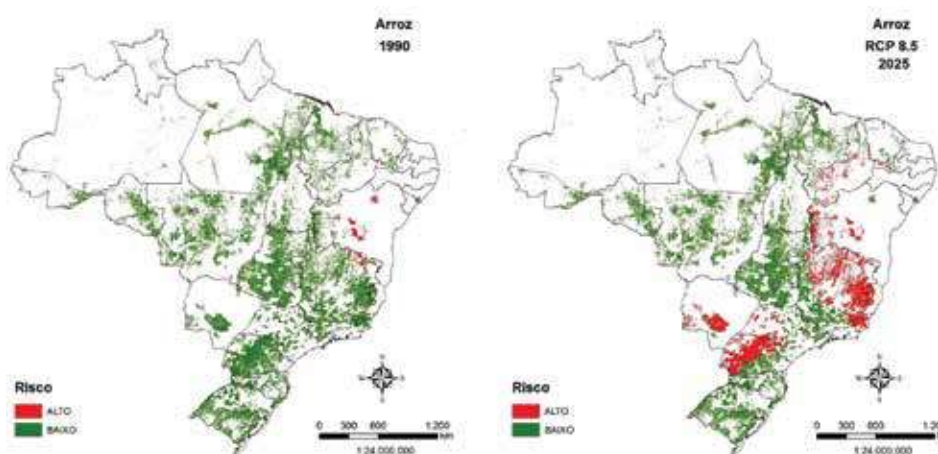
Figura 21 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de arroz de alto risco para o cenário RCP 4.5

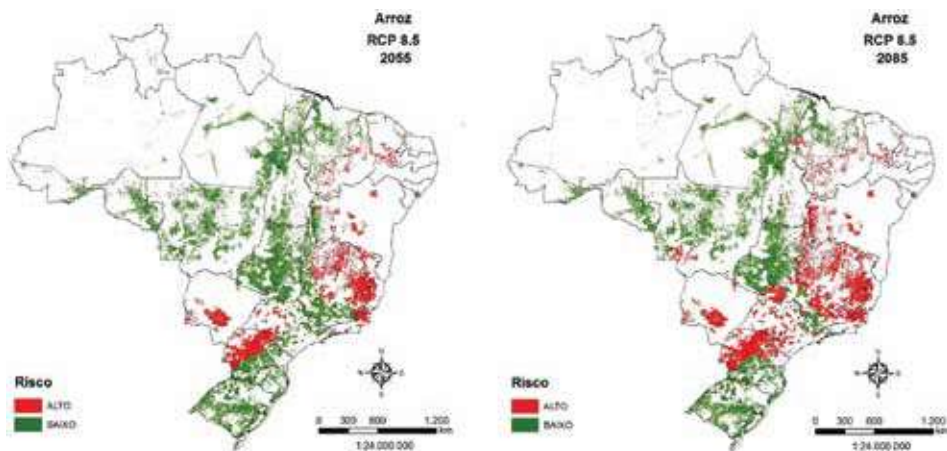




As áreas em vermelho são aquelas que deixam a condição de baixo risco e vão para a condição de alto risco. Nesse caso, a perda máxima é de 4% no ano de 2085. O maior índice de perda está no arroz de sequeiro, em Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul.

Figura 22 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de arroz de alto risco para o cenário RCP 8.5





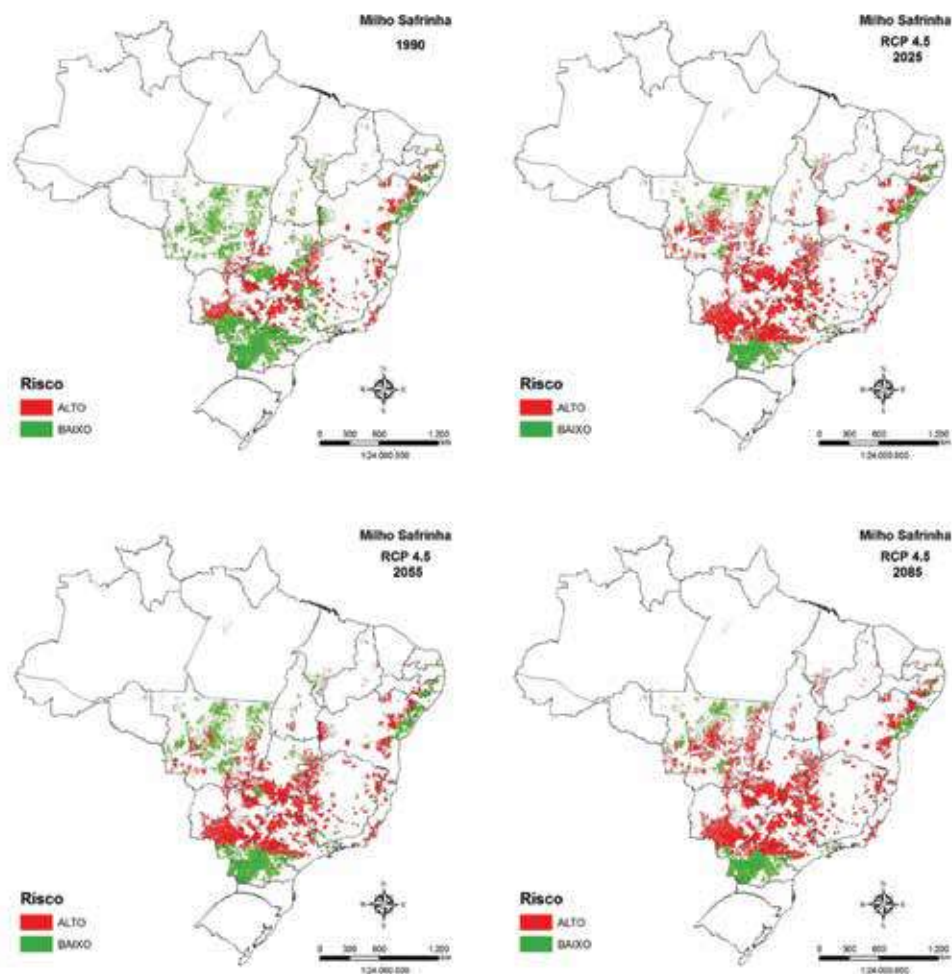
O quadro de perdas se intensifica, limitando a produção de arroz somente nas áreas irrigáveis e com boa oferta de chuva (Goias, norte de Mato Grosso e Pará).

2º caso – Milho safrinha

Tabela 4 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

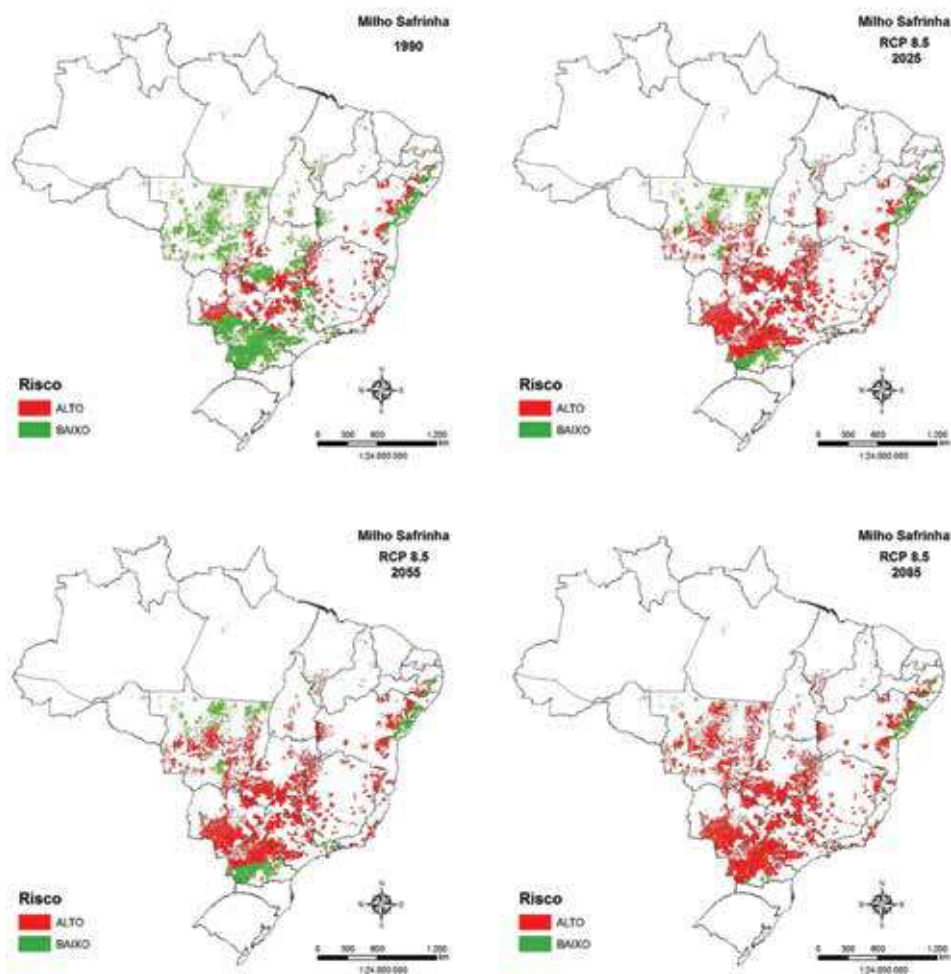
	Cenário RCP 4.5					
Milho safrinha	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	2.143.341	-71,3	4.242.920	-43,2	2.214.010	-70,4
Área plantada (ha)	Cenário RCP 8.5					
7.468.878	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	1.751.641	-76,5	1.128.835	-84,9	204.339	-97,3

Figura 23 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de milho safrinha de alto risco para o cenário RCP 4.5



O milho safrinha é a cultura de maior risco no caso do aumento das temperaturas. O milho safrinha já é uma cultura de risco. Nos cenários de aquecimento global, o risco aumenta substancialmente, em função do aumento da temperatura e da deficiência hídrica. Na região Sul, a condição benéfica para produção é a redução das geadas, que pode manter a produção.

Figura 24 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de milho safrinha de alto risco para o cenário RCP 8.5



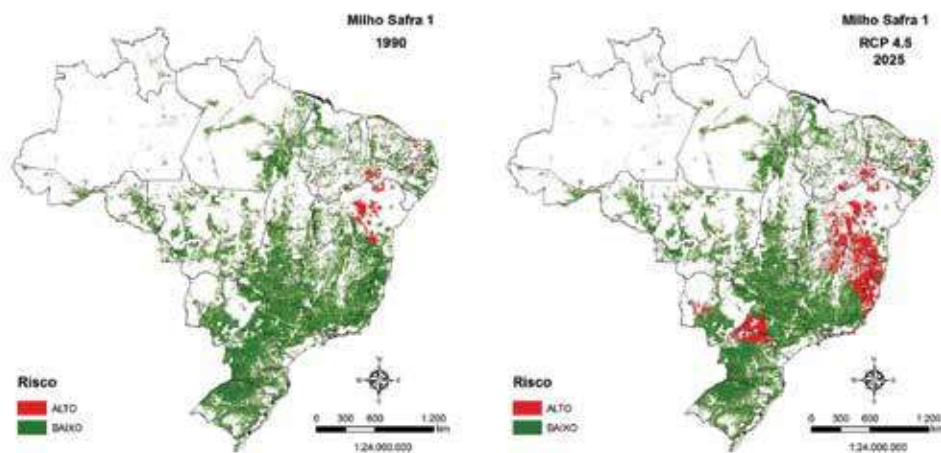
O aumento de temperatura é muito forte, provocando deficiência hídrica no momento em que o milho safrinha precisa de água. As restrições de produção ficam limitadas em quase todo o território nacional.

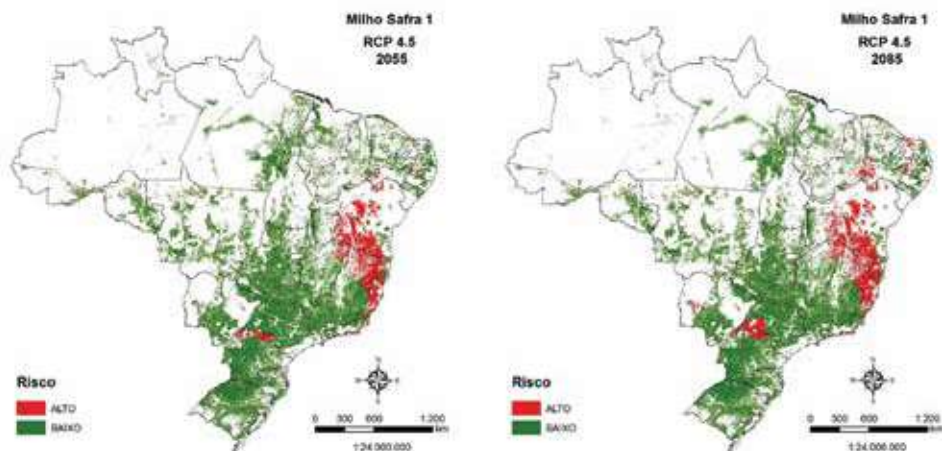
3º caso – Milho safra de verão (safra 1)

Tabela 5 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

	Cenário RCP 4.5					
Milho safra 1	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	6.895.053	-9,2	7.197.141	-5,2	7.010.321	-7,7
Área plantada (ha)						
7.595.853	Cenário RCP 8.5					
	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	6.661.951	-12,3	6.646.863	-12,5	5.908.882	-22,2

Figura 25 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de milho safra de verão de alto risco para o cenário RCP4.5

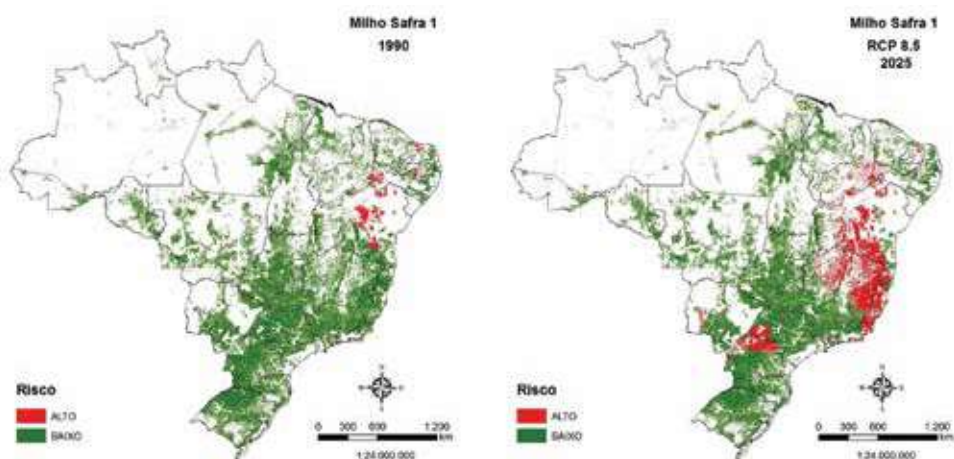


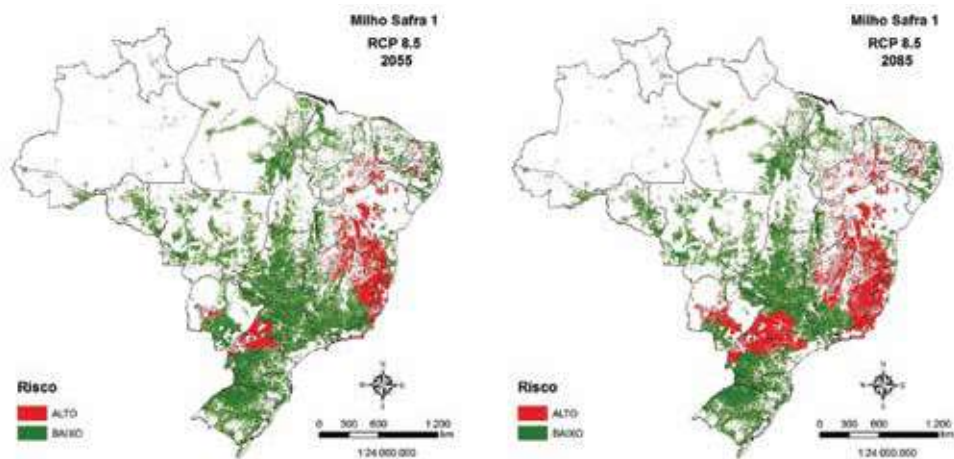


Esse impacto é menor se comparado com o milho safrinha, porém atinge magnitudes superiores a 22%.

A redução da área de baixo risco em 9% ainda no ano de 2025, no cenário RCP 4.5 está de acordo com as observações feitas nos últimos 20 anos, em que se alcançou perdas de produtividade de até 7%. O milho bem cultivado, e aumentando a profundidade de suas raízes, pode sobreviver bem ao cenário RCP 4.5. As áreas indicadas nos mapas são aquelas já conhecidas atualmente por alto índice de perda.

Figura 26 – Espacialização do aumento das áreas de cultivo de milho safra de verão de alto risco para o cenário RCP8.5





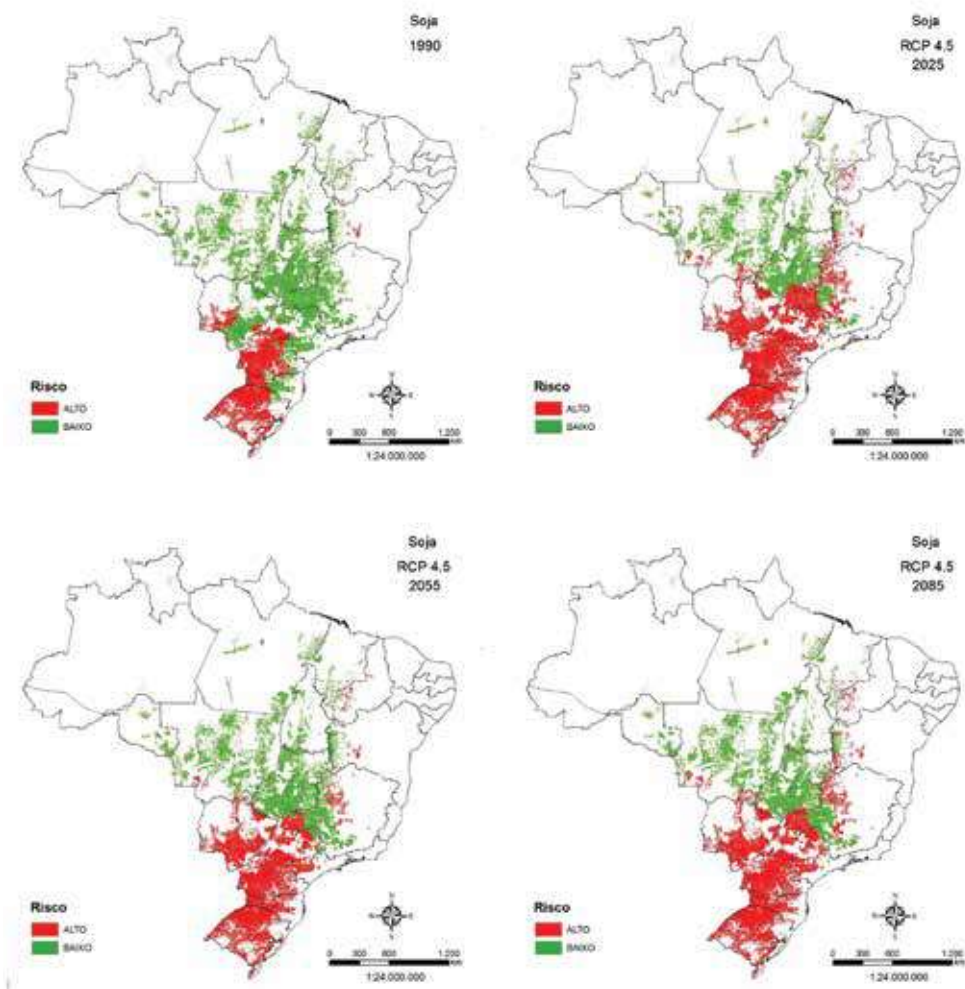
As perdas de áreas de baixo risco podem chegar a 22 % ou mais de 5 milhões de hectares.

4º caso – Soja

Tabela 6 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

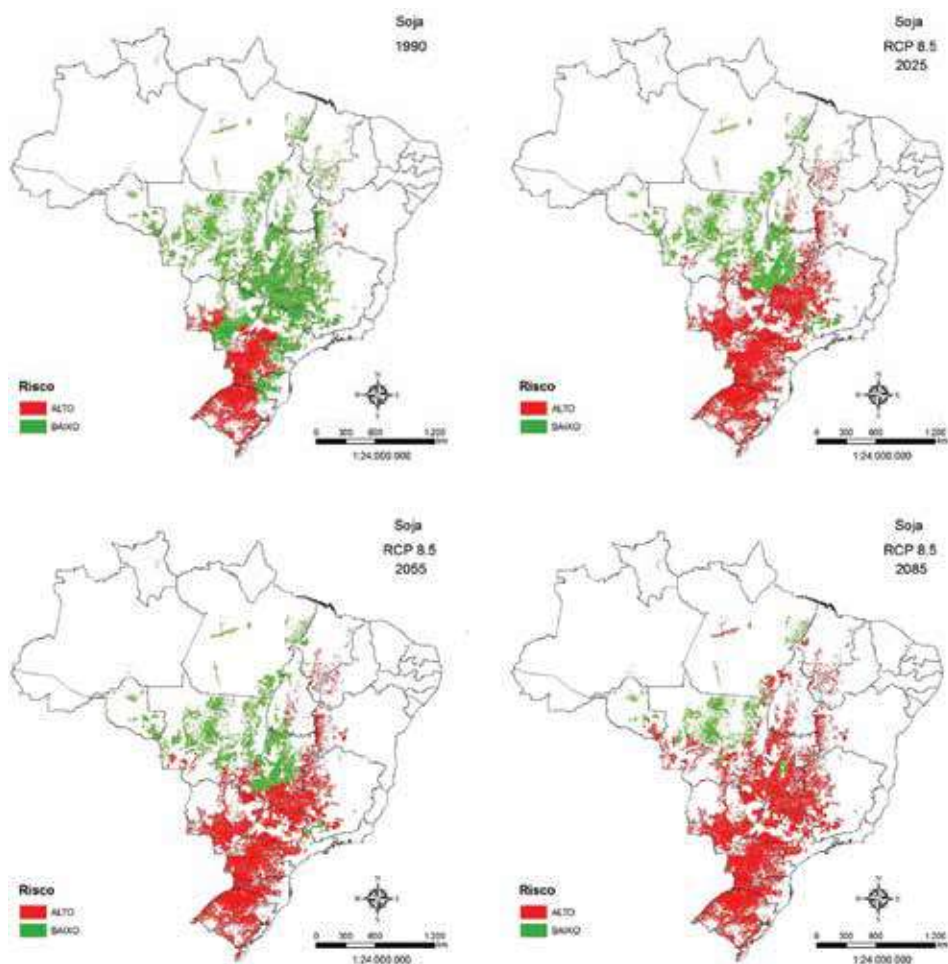
	Cenário RCP 4.5					
Soja	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	10.904.674	-56,3	12.849.106	-48,6	11.539.499	-53,8
Área plantada (ha)	Cenário RCP 8.5					
24.975.258	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	8.901.284	-64,4	8.556.636	-65,7	4.693.604	-81,2

Figura 27 – Espacialização do aumento das áreas de cultura da soja de alto risco para o cenário RCP 4.5



As perdas podem variar de 56% em 2025 a 53% em 2085. A redução das perdas em 2085 é explicada pela mudança de sinal na chuva que o modelo apresenta nos anos compreendidos entre 2041 e 2055, tendo leve reflexo em 2085.

Figura 28 – Espacialização do aumento das áreas de cultura da soja de alto risco para o cenário RCP 8.5



Espacialização do impacto do aquecimento global para o cenário RCP 8.5, na cultura da soja. As perdas de áreas de baixo risco podem ficar acima de 81%.

Em termos nacionais, a tendência é de ir para o norte do estado de Mato Grosso, o que já está acontecendo. Entretanto, cultivares com alta tolerância à seca e deficiência hídrica serão lançadas no mercado e poderão minimizar os

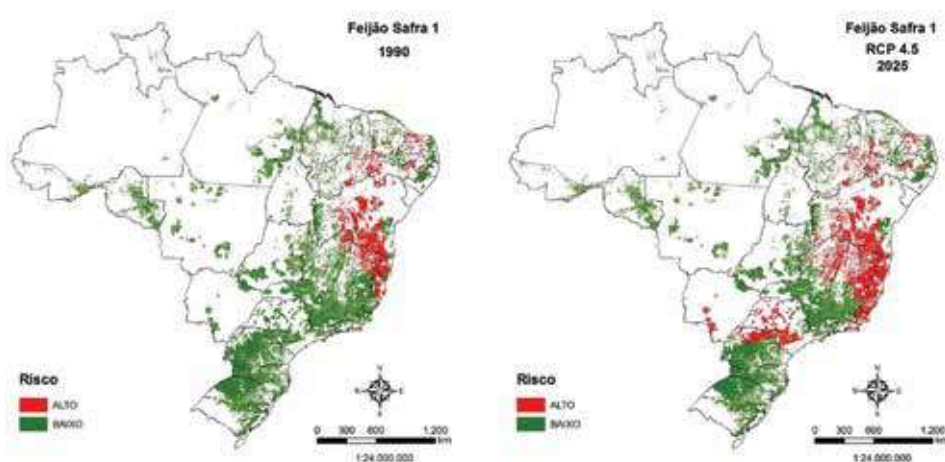
efeitos do aquecimento global, assim como uma mudança nos sistemas de produção, mais equilibrados em manutenção da água no solo e sequestro de carbono.

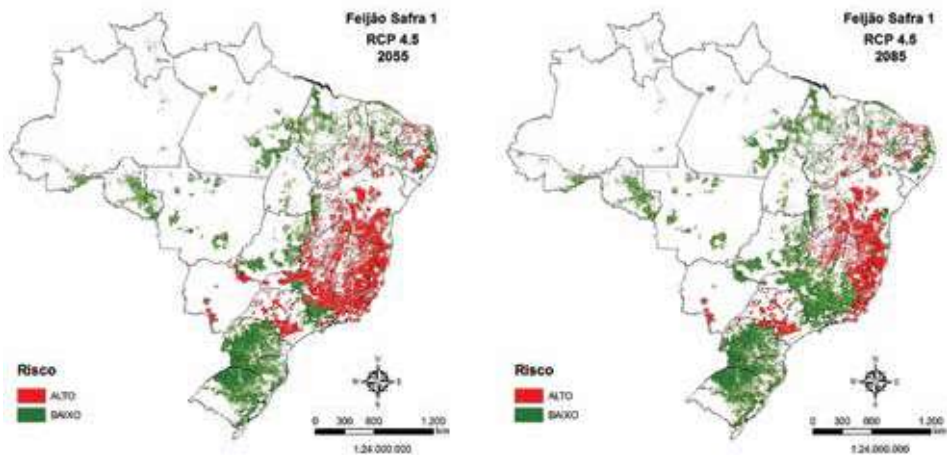
5º caso – Feijão

Tabela 7 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990 em comparação com 1990

	Cenário RCP 4.5					
Feijão safra 1	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	1.225.556	-37,4	1.125.782	-42,5	1.186.136	-39,4
Área plantada (ha)						
1.957.632	Cenário RCP 8.5					
	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	1.124.132	-42,6	1.064.133	-45,6	838.874	-57,1

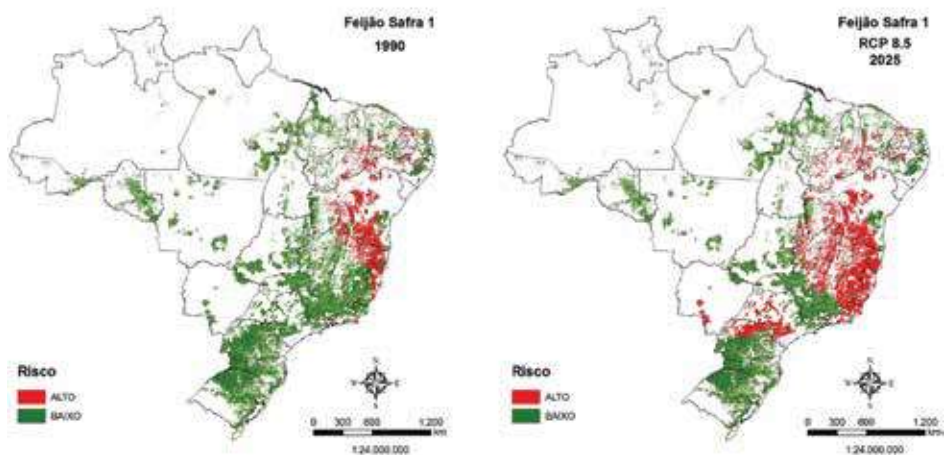
Figura 29 – Espacialização do impacto do aquecimento global para a cultura do feijão no cenário RCP 4.5

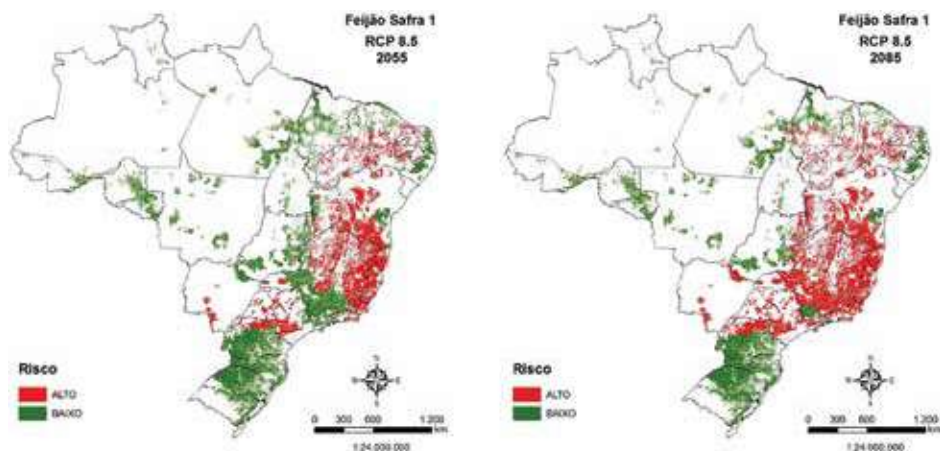




As perdas podem variar de 37% em 2025 a 39% em 2085. Existem duas explicações para as perdas do feijão: aumento de temperatura, provocando abortamento das flores e intensificação dos veranicos, com alta deficiência hídrica. Já existem variedades tolerantes ao aumento de temperatura, evitando parcialmente o abortamento das flores, porém a deficiência hídrica pode ser reduzida com duas ações, plantio direto ou irrigação. Essas indicações são válidas para o cenário RCP 4.5.

Figura 30 – Espacialização do impacto do aquecimento global para a cultura do feijão no cenário RCP 8.5





A situação da cultura do feijão fica mais crítica ainda, podendo chegar a perdas de áreas de baixo risco de 57%.

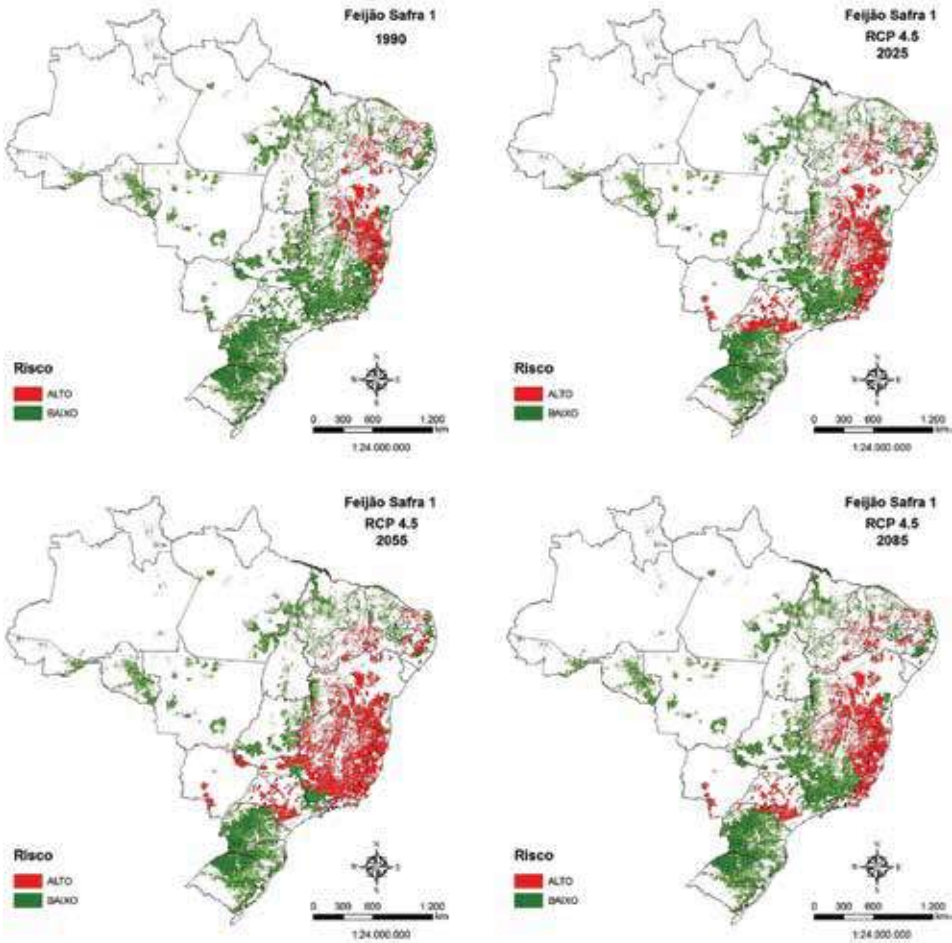
Em termos nacionais, a tendência é de se confinar no Paraná, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, onde as temperaturas são mais amenas e o déficit hídrico reduzido. Parte do sul de Minas Gerais também poderá se manter como área produtora.

6º caso – Feijão segunda safra

Tabela 8 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

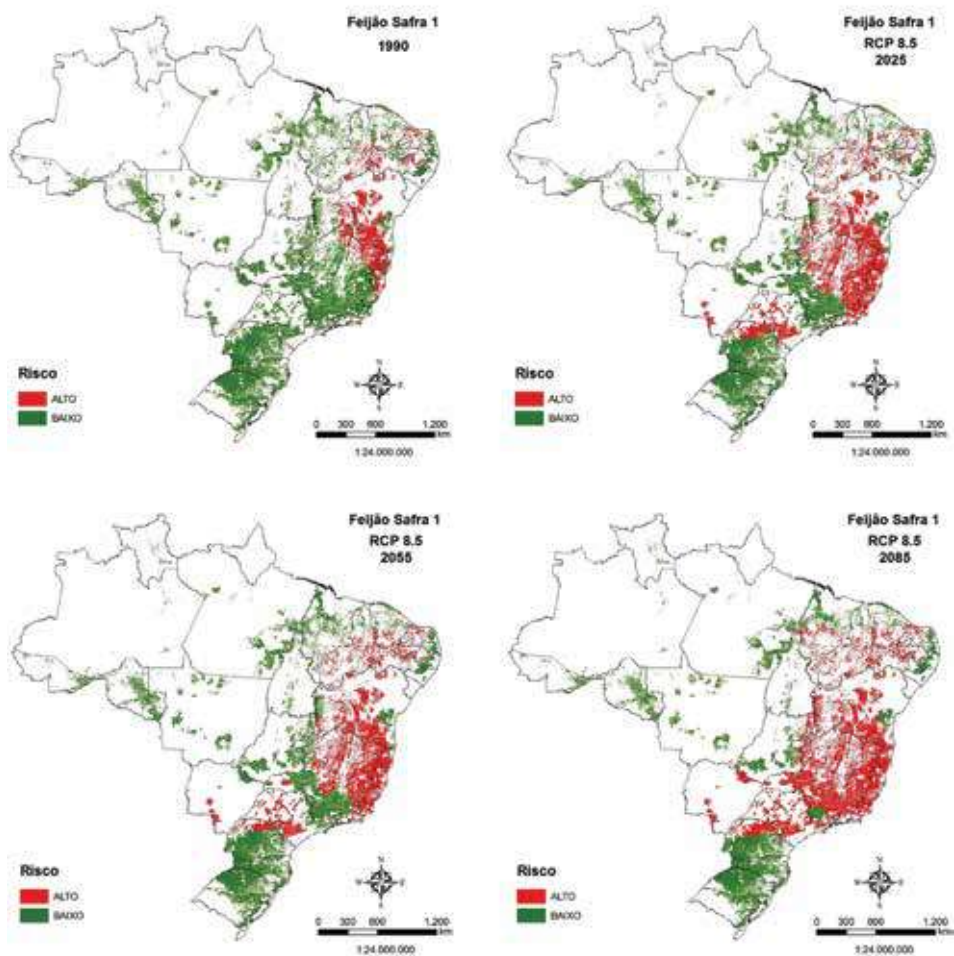
	RCP 4.5					
Feijão safra 2	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	506.045	-50,4	615.304	-39,7	529.704	-48,1
Área plantada (ha)	RCP 8.5					
1.020.055	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	423.463	-58,5	396.056	-61,2	286.938	-71,9

Figura 31 – Espacialização do impacto do aquecimento global para a cultura do feijão de segunda safra no cenário RCP 4.5



As perdas podem variar de 50,4 % em 2025 a 48,1 % em 2055. A explicação para as maiores perdas do feijão é o aumento da deficiência hídrica, provocada pelo aumento da temperatura. As soluções passam por variedades tolerantes a seca e mudança de manejo das culturas, introduzindo os sistemas integrados.

Figura 32 – Espacialização do impacto do aquecimento global para a cultura do feijão de segunda safra no cenário RCP 8.5



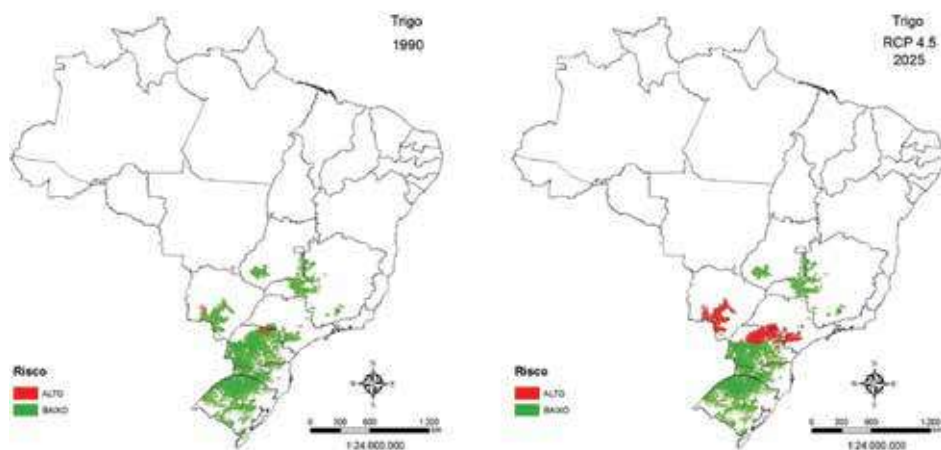
Na cultura do feijão, as perdas de áreas de baixo risco podem chegar a 71%. Em termos nacionais, a tendência é de se confinar a produção no Paraná, em Santa Catarina, no Rio Grande do Sul, em Rondônia, no Pará e em Goiás, onde o déficit hídrico é reduzido no período da produção da segunda safra. Parte do sul de Minas gerais também poderá se manter como área produtora. A irrigação também é uma das soluções de adaptação.

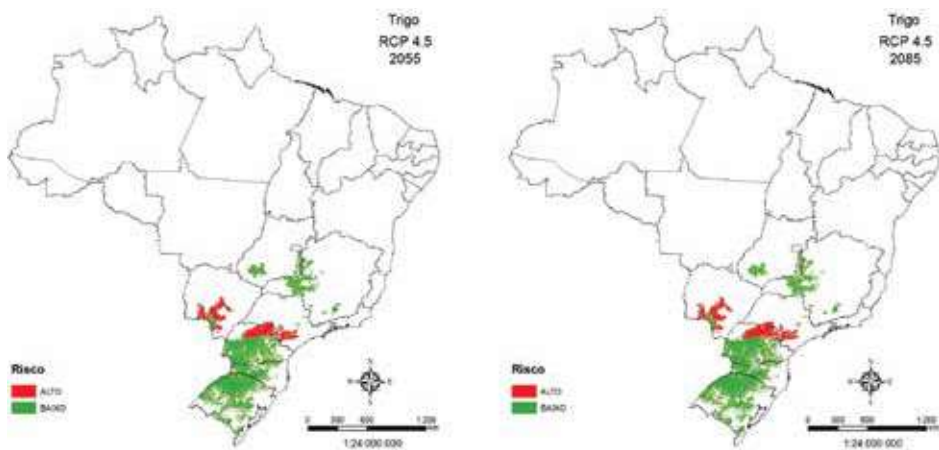
7º caso – Trigo

Tabela 9 – Impacto na redução das áreas de baixo risco em comparação com 1990

		RCP 4.5				
Trigo	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
Ano-base 2012	1.567.205	-18,1	1.645.562	-14,0	1.630.185	-14,8
Área plantada (ha)		RCP 8.5				
1.912.711	2025	Δ (%)	2055	Δ (%)	2085	Δ (%)
	1.501.642	-21,5	1.596.339	-16,5	1.457.725	-23,8

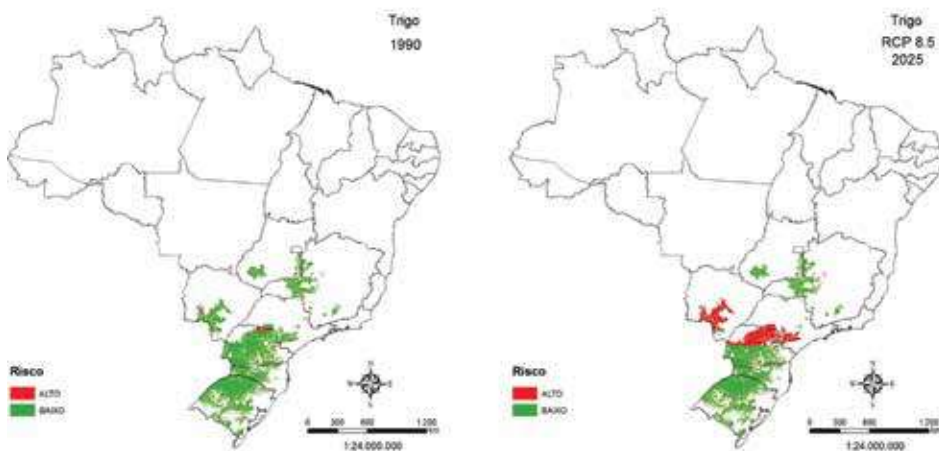
Figura 33 – Espacialização do impacto do aquecimento global na cultura do trigo no cenário RCP 4.5

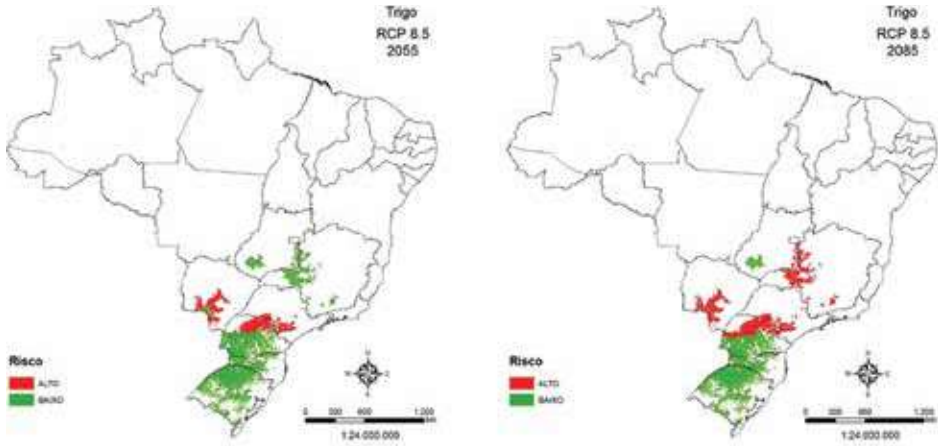




A cultura de trigo pode perder até 14,8% das áreas de baixo risco. A explicação pode se basear nos invernos mais quentes e no aumento das temperaturas noturnas. As soluções passam por variedades tolerantes, mudança de ciclo e mudança de manejo das culturas, introduzindo os sistemas integrados.

Figura 34 – Espacialização do impacto do aquecimento global na cultura do trigo para o cenário RCP 8.5





As perdas de áreas de baixo risco podem chegar até 23,8%. A explicação pode se basear nos invernos mais quentes e no aumento das temperaturas noturnas. As soluções passam por variedades tolerantes, mudança de ciclo e mudança de manejo das culturas, introduzindo os sistemas integrados.

8 Principais conclusões

Há uma forte tendência de aumento de frequência de dias com temperaturas superiores a 34°C nos próximos anos. Tais fatos já estão sendo verificados nas últimas décadas. Os impactos desses eventos extremos são abortamento de flores de café, feijão, morte em frangos, abortamentos em porcas e redução da produção de leite. Uma das soluções para a redução dos efeitos na produção vegetal é a busca por cultivares tolerantes às altas temperaturas e, conseqüentemente, ao déficit hídrico. No caso dos animais, deve-se buscar ampliar cada vez mais os estudos sobre ambiência animal.

Os impactos na produção vegetal, caso não se busque soluções de manejo e adaptação, podem atingir mais de 90% de redução na produção de milho safrinha e 80% na produção de soja. Diversos caminhos de adaptação e de busca por novos sistemas de produção estão sendo testados para reduzir os impactos estimados nos cenários estudados.

Tabela 10 – Síntese dos Impactos do aquecimento global na agricultura brasileira, segundo o Modelo Eta-HadGEM2-ES

Cenários	Cenário RCP 4.5				Cenário RCP 8.5							
	2025 (ha)	Δ (%)	2055(ha)	Δ (%)	2085(ha)	Δ (%)	2025(ha)	Δ (%)	2055(ha)	Δ (%)	2085(ha)	Δ (%)
anos												
Arroz	2.306.597*	- 4,4**	2.329.526	- 3,5	2.316.059	-4,0	2.238.483	- 7,2	2.232.870	- 7,5	2.077.094	- 13,9
Milho safrinha	2.143.341	- 71,3	4.242.920	- 43,2	2.214.010	-70,4	1.751.641	- 76,5	1.128.835	- 84,9	204.339	- 97,3
Milho safra 1	6.895.053	- 9,2	7.197.141	- 5,2	7.010.321	-7,7	6.661.951	- 12,3	6.646.863	- 12,5	5.908.882	- 22,2
Feijão safra 1	1.225.556	- 37,4	1.125.782	- 42,5	1.186.136	-39,4	1.124.132	- 42,6	1.064.133	- 45,6	838.874	- 57,1
Feijão safra 2	506.045	- 50,4	615.304	- 39,7	529.704	-48,1	423.463	- 58,5	396.056	- 61,2	286.938	- 71,9
Soja	10.904.674	- 56,3	12.849.106	-48,6	11.539.499	-53,8	8.901.284	- 64,4	8.556.636	- 65,7	4.693.604	- 81,2
Trigo	1.567.205	- 18,1	1.645.562	-14,0	1.630.185	-14,8	1.501.642	- 21,5	1.596.339	-16,5	1.457.725	- 23,8

* Quantidade em hectares que continuam com baixo risco.

** Impacto em termos percentuais sobre a área de baixo risco, ano-base 1990.

Referências

AFFHOLDER, F.; RODRIGUES, G. C.; ASSAD, E. D. Modelo Agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 32, n. 10, p. 993-1002, 1997.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2013.

ASSAD, E. D. *et al.* AgMIP Regional Activities in a Global Framework: The Brazil Experience. In: ROSENZWEIG Cynthia; HILLEL, Daniel (Columbia University, USA) (Orgs.). **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments – Joint Publication with American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil.** 1. ed. London: Imperial College Press, 2015. p. 355-374. (v. 2).

CLINE, W. R. **Global Warming and Agriculture: Impact Assessment by Country.** Washington, DC: Centre for Global Development and Peterson Institute for International Economics, 2007.

DÊSCHENES, O.; GREENSTONE, M. The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather. **American Economic Review**, Nova York, v. 97, n. 1, p. 354-385, 2007. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/30034398>>. Acesso em: 27 jan. 2015.

EVENSON, R. E.; ALVES, D. C. O. Technology, climate change, productivity and land use in Brazilian agriculture. **Planejamento e Políticas Públicas**, Ipea, Brasília, n. 18, 1998.

FERNANDES, E. C. M. *et al.* **Climate change and agriculture in Latin America (2020-2050).** Washington, DC: The World Bank, 2011.

FUSS, S. *et al.* Betting on negative emissions. **Nature Climate Change**, Londres, v. 4, n. 10, p. 850-853, 2014. Disponível em: <<http://www.nature.com/nclimate/journal/v4/n10/full/nclimate2392.html>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

KJELLSTROM, T. *et al.* The Direct Impact of Climate Change on Regional Labour Productivity. **Archives of Environmental and Occupational Health**, v. 64, n. 4, p. 217-27, 2009.

MARGULIS, S.; DUBAUX, C. B. S. **The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities.** Coordenação de J. Marcovitch. São Paulo: FEA/USP, 2011. 84 p.

MARIN, F. R. *et al.* Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v. 117, n. 1, p. 227-239, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0561-y>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

NELSON, G. C. *et al.* **Food Security, Farming, and Climate Change to 2050: Scenarios, Results, Policy Options**. Washington DC: International Food Policy Research Institute, 2010.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. **Global Warming and the New Geography of Agricultural Production in Brazil**. 2008. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/aquecimento_agricola_en.html>. Acesso em: 27 jan. 2016.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture, and adaptive strategies for wheat, maize, and soybeans. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 115-129, 1994.

ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. **Meteorological Applications**, Nova York, v. 13, n. 1, p. 68-80, 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1017/S135048270600257X/references>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

Agradecimentos

Agradecemos ao INPE pelo fornecimento dos dados dos modelos e ao CNPq pelo financiamento de vários projetos de pesquisas referente ao objeto deste capítulo ao longo dos últimos seis anos.



Impactos e vulnerabilidade do setor de recursos hídricos no Brasil às mudanças climáticas

Alfredo Ribeiro Neto

Centro de Tecnologia e Geociências /Departamento de Engenharia Civil/
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Adriano Rolim da Paz

Centro de Tecnologia – Campus I/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Edilson Raimundo da Silva

Centro de Tecnologia e Geociências /Departamento de Engenharia Civil/
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Resumo

O estudo do setor de recursos hídricos utilizou metodologia consagrada internacionalmente em trabalhos científicos envolvendo impacto e vulnerabilidade das mudanças climáticas. As análises de impacto de cenários sobre os recursos hídricos em escala global têm se concentrado em indicadores relacionados à disponibilidade hídrica. São simuladas as vazões nos rios utilizando-se modelos hidrológicos de grande escala. A simulação hidrológica foi realizada com o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) (COLLISCHONN *et al.*, 2007). O MGB-IPH é um modelo chuva-vazão distribuído por células que utiliza Unidade de Resposta Hidrológica (URH) baseada em mapas de uso e tipo de solo. Como entrada no modelo hidrológico, fez-se uso de dados provenientes do modelo climático regional Eta 20 km, rodado a partir de condições de contorno fornecidas pelos Modelos de Circulação Global (MCG) HadGEM2ES e MIROC5, com as janelas temporais de 1961–1990 (base), 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099 (CHOU *et al.*, 2014). São utilizados os cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 para o modelo HadGEM2-ES e RCP 8.5 para o modelo MIROC5. A análise da anomalia do escoamento nas regiões hidrográficas mostra que há redução da disponibilidade hídrica em praticamente todo o território do Brasil. As maiores reduções em termos percentuais se apresentam nas regiões hidrográficas do rio Doce, do rio São Francisco e do Atlântico Leste para o modelo HadGEM2-ES. Regiões hidrográficas do sul do país apresentaram aumento do escoamento como nos casos do Atlântico Sul/SE, da bacia do rio Uruguai e de parte da bacia do rio Paraná. Com respeito ao cálculo da vazão Q_{95} , associada ao escoamento mínimo nas regiões hidrográficas, verifica-se redução indicando intensificação dos períodos de estiagem do regime hidrológico. A análise de mudanças nos eventos de cheias mostrou significativa intensificação em regiões populosas como Sudeste, rio Uruguai e rio Paraná.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Hidrologia. Eventos extremos. Disponibilidade hídrica.

1 Introdução

O Brasil, em decorrência de seu extenso território e localização geográfica, apresenta regiões com distintas características climatológicas que influenciam os regimes hidrológicos em suas bacias hidrográficas. Regiões como o semiárido do Nordeste, por exemplo, são vulneráveis em virtude da variabilidade climática natural, de elevadas taxas de evaporação e de baixas taxas de precipitação associadas a solos pouco profundos, que impedem o armazenamento da água para melhor regularização da vazão nos rios. As regiões semiáridas deverão sofrer as maiores consequências em termos de redução da disponibilidade hídrica em decorrências das mudanças do clima (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007). Outras regiões do país que antes não apresentavam problemas de abastecimento frequentes, hoje, já sentem de forma recorrente dificuldades com escassez de chuva. Nas condições do clima atual, regiões como o Nordeste, a bacia do rio São Francisco e a região Sul do país já sofrem com elevada relação demanda *versus* disponibilidade hídrica (ANA, 2013).

Diferentes regiões do país tem sofrido consequências de extremos hidrológicos como eventos de cheias no Nordeste (DANTAS *et al.*, 2014), na Amazônia (MARENGO *et al.*, 2012), no Sul e no Sudeste. O mesmo ocorre com eventos de seca na Amazônia (TOMASELLA *et al.*, 2013) e no Nordeste de 2012 a 2014. Uma das consequências das mudanças do clima é a intensificação dos extremos de precipitação que podem resultar na redução do tempo de retorno para o mesmo valor de chuva verificado nos dias de hoje (IPCC, 2012).

Conforme destacado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), o Brasil é um país cuja economia e população são fortemente condicionadas pelo clima e aos regimes hidrológicos de suas bacias hidrográficas. Atividades econômicas como agricultura e indústria são dependentes do clima e da disponibilidade hídrica na região em que são desenvolvidas. Dados de 2010 indicam os seguintes consumos por uso (ANA, 2013): 836 m³/s (irrigação), 125 m³/s (animal), 104 m³/s (indústria) e 96 m³/s (abastecimento humano). O total é de 1.161 m³/s, com destaque para o consumo em irrigação, que responde por 72% do consumo de água no Brasil. Com relação aos usos não consultivos (aqueles que

não afetam significativamente a quantidade), o principal uso é para geração de energia. Em 2012, a capacidade total instalada era de 84.294 MW, equivalente a 70% da matriz energética nacional (ANA, 2013), o que a torna vulnerável diante de cenários de redução de disponibilidade hídrica. Esses números mostram a necessidade de avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos diante de possíveis cenários de mudanças do clima.

As principais forçantes climáticas que afetam o ciclo hidrológico são a precipitação e a evaporação potencial. Resultados das simulações do ciclo da água no CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) (IPCC, 2014) concluem que a precipitação média global aumenta em um mundo mais quente, mas com variações significativas entre as regiões. A América do Sul está entre as regiões para as quais as projeções indicam secas mais longas e mais frequentes. Além do clima, outras forçantes atuam sobre o ciclo da água como mudanças demográficas, socioeconômicas, tecnológicas e uso do solo. Essas mudanças poderão afetar tanto a exposição aos perigos como as necessidades por recursos hídricos. A urbanização crescente pode, por exemplo, elevar o perigo de cheias e reduzir a recarga de aquíferos (IPCC, 2014).

Este estudo fez uso de dados provenientes do modelo climático regional Eta 20 km rodado a partir de condições de contorno fornecidas pelos Modelos de Circulação Global (MCG) HadGEM2-ES e MIROC5 com as janelas temporais de 1961–1990 (base), 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099 (CHOU *et al.*, 2014). São utilizados os cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5 para o modelo HadGEM2-ES e RCP 8.5 para o modelo MIROC5. Os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*) representam diferentes combinações do futuro em termos de aspectos econômicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionais. Eles são definidos pelo total de forçante radioativo, que consiste na medida cumulativa de emissões humanas de gases de efeito estufa (GEE) de todas as fontes expressa em watts por metro quadrado. Foram considerados quatro cenários com valores de total de forçante radioativo igual a 2,6, 4,5, 6,0 e 8,5 W/m².

Foram selecionados indicadores para avaliação da vulnerabilidade relacionada a recursos hídricos que representassem características do escoamento

médio, vazões de estiagem e eventos extremos de cheia. A partir de simulações com um modelo hidrológico distribuído e utilizando como entrada a precipitação e variáveis climatológicas para o cálculo da evapotranspiração provenientes do modelo regional Eta, foi possível gerar uma avaliação dos indicadores de vulnerabilidade hídrica para todo o país, levando em conta a distribuição espacial sobre o território brasileiro e os diferentes cenários de emissões e janelas temporais dos cenários.

2 Metodologia

Apresenta-se, a seguir, a descrição da área de estudo, os dados utilizados (tanto provenientes do modelo climático como observados), características físicas, técnica de correção de tendenciosidade da precipitação, descrição do modelo hidrológico e apresentação dos indicadores de vulnerabilidade.

2.1 Área de estudo e dados utilizados

2.1.1 Definição da área de estudo

Neste estudo, adotou-se uma divisão hidrográfica baseada na Divisão Hidrográfica Nacional (CNRH, 2003), mas adaptada para um maior detalhamento em algumas regiões. Por exemplo, enquanto a bacia do rio Tocantins é única na Divisão Hidrográfica Nacional, neste estudo foi dividida em duas regiões (rios Tocantins e Araguaia). Enquanto a Divisão Hidrográfica Nacional possui 12 regiões, este estudo apresenta 23 regiões conforme mostram a figura 1 e a tabela 1.

Verifica-se que a área total do estudo extrapola os limites do território do Brasil porque se optou pela simulação das bacias hidrográficas de forma completa a exemplo do rio Solimões que possui suas cabeceiras em território do Peru e do Equador. A área total simulada é de 11.535.645,0 km².

O trabalho produzido pela ANA (2006) definiu a base hidrográfica otto-codificada para toda a área da figura 1. Isso significa definir a delimitação das sub-bacias com base na codificação de Otto Pfafstetter. As regiões hidrográficas da figura 1 são uma agregação das otto-bacias definidas em ANA (2006).

Figura 1 – Divisão hidrográfica adotada

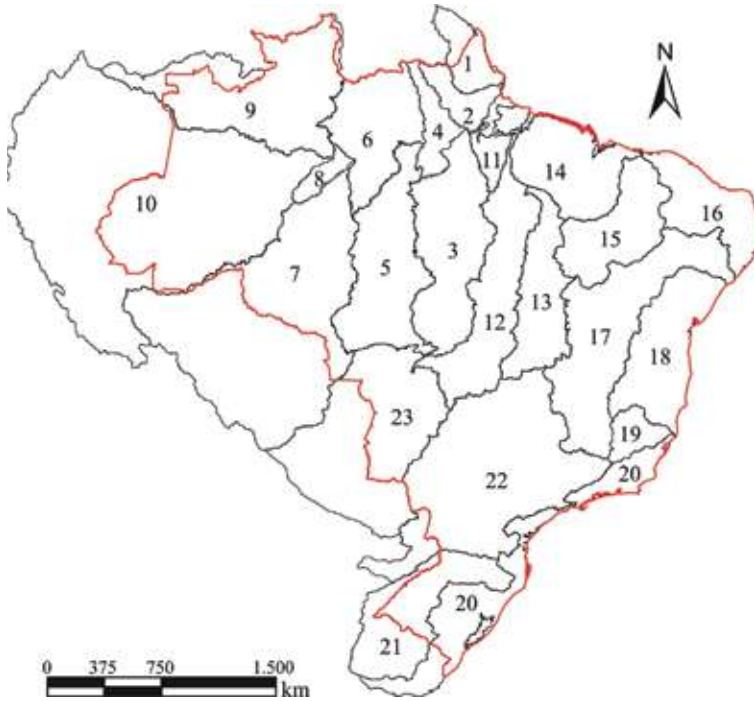


Tabela 1 – Relação de regiões hidrográficas

N° da região	Nome	Área (km²)
1	Amapá	136.955,3
2	Rio Amazonas-Foz	107.436,1
3	Rio Xingu	514.144,6
4	Rio Amazonas-Tap/Xin	114.795,9
5	Rio Tapajós	495.410,0
6	Rio Amazonas-Mad/Tap	365.603,9
7	Rio Madeira	1.382.298,7
8	Rio Amazonas-Neg/Mad	56.778,7
9	Rio Negro	719.585,4
10	Rio Solimões	2.208.737,3

(continua)

11	Rio Amazonas-Xin/Toc	94.976,2
12	Rio Tocantins	461.375,4
13	Rio Araguaia	305.501,2
14	Atlântico Nordeste Ocidental	355.658,3
15	Rio Parnaíba	330.914,1
16	Atlântico Nordeste Oriental	285.467,5
17	Rio São Francisco	642.877,3
18	Atlântico Leste	391.112,9
19	Rio Doce	83.164,4
20	Atlântico Sul/Sudeste	378.688,3
21	Rio Uruguai	350.333,5
22	Rio Paraná	964.114,1
23	Rio Paraguai	789.716,2

2.1.2 Solo, vegetação e relevo

Os dados de tipo de solo foram obtidos do *Digital Soil Map of the World* produzido pela FAO na escala 1:5.000.000 (FAO, 2003), e o mapa de cobertura vegetal e uso do solo foi obtido do *Joint Research Centre* (EVA *et al.*, 2002). O relevo foi representado com a base altimétrica proveniente dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) processada pelo Hydrosheds (LEHNER *et al.*, 2006). Os mapas de tipo de solo e cobertura vegetal são utilizados na definição das unidades de resposta hidrológica para o modelo e o relevo usado para o cálculo do tempo de concentração nas células (útil na determinação de parâmetros relacionados ao escoamento).

2.1.3 Variáveis do modelo climático

Foram utilizados os dados do modelo Eta com passo de tempo diário para a precipitação e média mensal de longo termo para as variáveis climatológicas. Foi gerada uma série em cada ponto da grade do modelo climático sobre a área de estudo, totalizando 24.016 células ou séries temporais.

O modelo Eta não fornece como saída exatamente todas as variáveis necessárias para o estudo do setor de recursos hídricos. As únicas que são fornecidas de forma direta são a precipitação, a temperatura do ar a 2 metros e a pressão atmosférica. As variáveis provenientes do modelo Eta são:

- a) precipitação diária: PREC;
- b) temperatura do ar a dois metros: TP2M;
- c) radiação líquida: OCES (radiação de onda curta emergente à superfície) + OCIS (radiação de onda curta incidente à superfície) + OLIS (radiação de onda longa incidente à superfície) + OLES (radiação de onda longa emergente à superfície);
- d) umidade relativa: obtida a partir das variáveis TP2M e DP2M (temperatura do ponto de orvalho a dois metros);
- e) velocidade do vento a 10 metros: obtida das componentes zonal (U10M) e meridional (V10M) do vento;
- f) pressão à superfície: PSLC.

As variáveis, com exceção da precipitação, são utilizadas para o cálculo da evapotranspiração potencial com o método de Penman-Monteith. A temperatura do ar é dada em graus Kelvin pelo modelo Eta e foi transformada em graus Celsius. A radiação é dada em watt/m² e teve que ser transformada em MJ/m²/dia (multiplicando pelo fator 0,0864). A velocidade do vento é obtida fazendo a raiz quadrada da soma dos quadrados das componentes zonal e meridional. A pressão atmosférica é dada em hPa pelo Eta e transformou-se em kPa dividindo-se por 10. A umidade relativa foi calculada determinando-se, primeiramente, as pressões de vapor parcial (e) e do ar saturado (e_s) (equações 1 e 2).

$$e = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot DP2M}{DP2M + 237,3}\right) \quad (1)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot TP2M}{TP2M + 237,3}\right) \quad (2)$$

Com essas duas variáveis, pode-se calcular a umidade relativa (UR).

$$UR = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (3)$$

2.1.4 Dados observados

A precipitação observada foi obtida da base de dados do CRU TS 2.1 (NEW *et al.*, 2000). A série possui passo de tempo mensal e resolução espacial de 0,5 graus. Para construí-la, New *et al.* (2000) utilizaram séries de dados das estações pluviométricas instaladas nos países. Foram utilizados no estudo da TCN dados referentes ao período de 1961 a 1990. Para que houvesse compatibilidade espacial entre a base do CRU (0,5 graus) e a série de chuva do Eta (0,2 graus), fez-se o cálculo da interpolação da chuva do CRU para transformá-la para a resolução 0,2 graus.

Além disso, utilizou-se a base de dados do CRU CL 1.0 (NEW *et al.*, 2002) para avaliação da temperatura do ar. Essa base possui resolução espacial de 10 minutos (aproximadamente 16 km) e, ao contrário da precipitação, não fornece série mensal, mas apenas média mensal de longo termo ou normal climatológica.

2.1.5 Avaliação e correção de tendenciosidade da precipitação

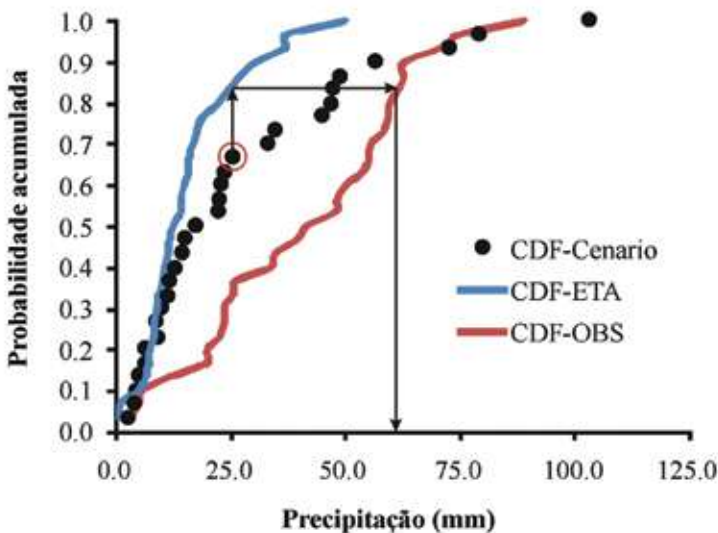
A comparação da chuva do CRU e do modelo Eta foi feita por região hidrográfica e com a média mensal de longo termo, ou seja, um valor para cada mês referente à média dos 30 anos. Na comparação da chuva do CRU, HadGEM2-ES e MIROC5 para as principais regiões hidrográficas, percebe-se uma tendência de subestimação da chuva pelo modelo HadGEM2-ES em praticamente todas as regiões. O modelo MIROC5, por sua vez, apresenta bons resultados, principalmente, na Amazônia, entretanto, com subestimação no Nordeste.

Esse tipo de comportamento pode ser considerado como um erro sistemático, que consiste na subestimação ou na superestimação da precipitação do modelo climático quando comparada com os valores observados para a mesma estação ou mês do ano. A correção de tendenciosidade (*bias*) foi usada, primeiramente,

em previsões hidrológicas e pode ser feita utilizando-se funções de distribuição acumuladas (CDF). Para cada ponto da grade do modelo ETA e para cada mês (janeiro a dezembro), é necessário computar a frequência acumulada de precipitação do modelo (ETA) e a observada (CRU) no período base (exemplo mostrado na figura 2). A precipitação a ser corrigida deve ser identificada na CDF do modelo no período base. A correção é feita tomando-se o percentil identificado na CDF do modelo e, para esse mesmo quantil, determina-se a precipitação correspondente na CDF de dados observados (figura 2) (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011).

Diante dos resultados obtidos na comparação entre chuva medida e do modelo Eta, optou-se pela correção da tendenciosidade da chuva conforme a metodologia apresentada por Bárdosy e Pegram (2011). Foram determinadas as funções de densidade cumulativa (CDF) calculadas em cada ponto da grade do modelo, para cada mês do ano e para as três séries no período base: CRU, HadGEM2-ES e MIROC5. A chuva dos cenários futuros foi corrigida identificando-se o valor do percentil na CDF do modelo e, em seguida, extraiu-se da CDF do CRU a chuva correspondente ao mesmo percentil. A figura 2 mostra o esquema de correção do bias do dado de precipitação de um cenário futuro em uma célula.

Figura 2 – Esquema de correção de *bias*



A correção é feita com os dados mensais porque a base do CRU possui essa discretização temporal. Por isso, foi necessário agregar a precipitação diária dos cenários futuros para passo de tempo mensal. Após a correção do *bias*, desagregou-se a precipitação novamente para passo de tempo diário utilizando-se como base a distribuição temporal do dado original do modelo Eta.

2.2 Modelo hidrológico

A simulação hidrológica foi realizada com o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) (COLLISCHONN *et al.*, 2007). O componente de balanço hídrico no solo no MGB-IPH é composto dos processos de interceptação da precipitação, equacionamento do balanço de água no solo, evapotranspiração e geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. Cada URH em que a célula é dividida equivale a uma área hidrológicamente homogênea, ou seja, a URH deve responder de forma homogênea às precipitações incidentes. A seguir, descreve-se a forma como é representado cada processo no modelo.

O processo de interceptação representa a retenção de parte da precipitação por intermédio da vegetação, em maior grau, e de depressões no solo em menor grau. O modelo utiliza a variável IAF (Índice de Área Foliar) para estimar a capacidade do reservatório de interceptação.

Para o cálculo da evapotranspiração, o modelo MGB-IPH utiliza o método de Penman-Monteith, o qual é baseado no método de Penman. O método de Penman-Monteith procura representar os processos de resistência superficial e aerodinâmica que ocorrem na evapotranspiração. A equação de Penman-Monteith é dada por:

$$E = \left(\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w}, \quad (4)$$

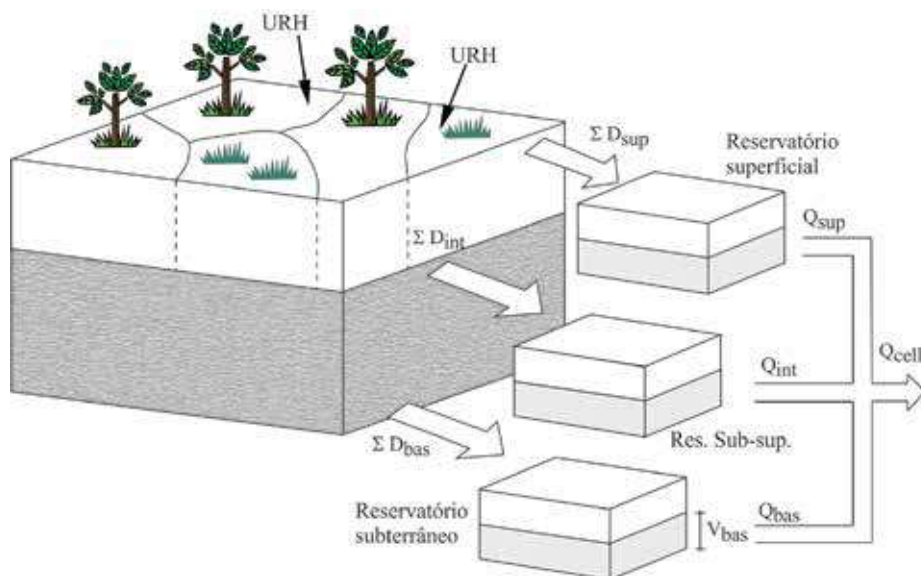
em que E é a evapotranspiração (m/s), λ é o calor latente de vaporização (MJ/kg), Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), R_n é radiação líquida ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{s}$), G é o fluxo de energia para o solo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{s}$), ρ_a é a massa específica do ar (kg/m^3), ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar úmido ($\text{MJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}$), e_s é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa), e_a é a pressão de vapor d'água (kPa) e γ é a constante psicométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$).

A formulação do armazenamento de água no solo considera a não uniformidade da distribuição espacial da umidade de cada URH. Para isso, utiliza uma função de distribuição de probabilidade. Essa função supõe que a área saturada pode ser relacionada à razão entre a umidade do solo e capacidade de armazenamento do solo. Ao separar o volume que infiltra no solo, determina-se o quanto deverá escoar superficialmente (D_{sup}).

O escoamento subsuperficial (D_{int}) depende das propriedades do solo (porosidade, distribuição dos poros, continuidade dos poros) e do fluido (viscosidade e densidade). A equação utilizada no MGB-IPH é denominada de função de Brooks e Corey para a condutividade hidráulica conforme apresentada por Rawls *et al.* (1993). Uma equação linear é utilizada para relacionar o armazenamento de água no solo e o escoamento de base (D_{bas}).

O MGB-IPH utiliza o modelo do reservatório linear simples para propagar o escoamento gerado pelos diferentes níveis do solo. Cada escoamento (D_{sup} , D_{int} e D_{bas}) dirige-se para um reservatório correspondente (superficial, subsuperficial e subterrâneo), conforme indicado na figura 3, para gerar as vazões superficial (Q_{sup}), subsuperficial (D_{int}) e de base (D_{bas}). A soma das três vazões resulta na vazão da célula.

Figura 3 – Esquema de geração e propagação da água em uma célula



2.3 Indicadores de vulnerabilidade

As análises de impacto de cenários de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos em escala global tem se concentrado em indicadores relacionados à disponibilidade hídrica. São simuladas as vazões nos rios ou recargas da água subterrânea, utilizando-se modelos hidrológicos de escala global. Algumas abordagens consideram a disponibilidade futura baseada em escoamento *per capita* (GOSLING; ARNELL, 2013; FUNG *et al.*, 2011), enquanto outras projetam as demandas futuras e definem a razão demanda *versus* disponibilidade hídrica (GOSLING; ARNELL, 2013; HANASAKI *et al.*, 2013).

Foram utilizados como indicadores de impacto estatísticas que pudessem representar o escoamento médio nas regiões hidrográficas, as vazões máximas (para eventos de cheias) e vazões mínimas (para eventos de seca) (ARNELL; LLOYD-HUGHES, 2014; GOSLING; ARNELL, 2011). As estatísticas são:

- a) anomalia dada pela diferença entre escoamento anual médio do período base e cenários;

- b) coeficiente de variação do escoamento anual do período base (CV-base) e cenário (CV-cen);
- c) vazão de estiagem dada pelo escoamento diário superado em 95% do tempo. Comparação do período base (Q_{95} -base) e cenário (Q_{95} -cen) (mm/dia);
- d) Índice de Exploração de Água (*Water Exploitation Index*-WEI), que faz a razão entre a retirada de água total anual e a vazão de estiagem;
- e) escoamento diário máximo anual (mm/dia) referente ao tempo de retorno de 20 anos no período base (Q_{tr20} -base) e cenário (Q_{tr20} -cen). Utilizou-se a distribuição de Gumbel para o ajuste das vazões máximas diárias anuais;
- f) anomalias de evapotranspiração e umidade do solo anuais médias do período base e cenários.

A partir das simulações com o modelo hidrológico, foram gerados para as regiões hidrográficas mapas de anomalia de escoamento médio, evapotranspiração e umidade do solo.

3 Resultados

3.1 Precipitação e temperatura do ar por região

Após a correção da tendenciosidade, é possível avaliar o impacto sobre a precipitação para cada cenário e modelo como mostram as figuras 4 a 6. O eixo vertical das figuras mostra a anomalia percentual de precipitação entre os cenários futuros e o período base. O eixo horizontal mostra as regiões hidrográficas conforme numeração da tabela 1. Verifica-se redução acentuada da precipitação na maioria das regiões hidrográficas. As exceções são as regiões Atlântico Sul/Sudeste (RH-20), Uruguai (RH-21) e parte do Paraná (RH-22), que apresentaram aumento da precipitação nos cenários futuros.

Figura 4 – Anomalia da precipitação do modelo HadGEM2-ES no cenário RCP 4.5

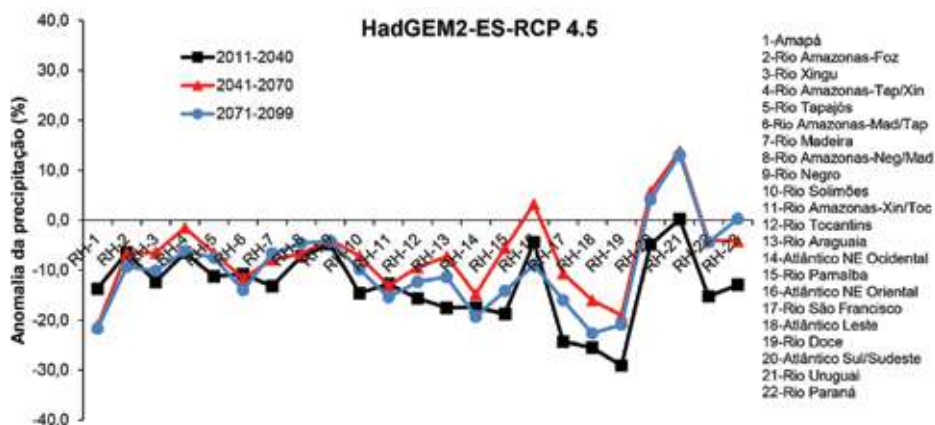


Figura 5 – Anomalia da precipitação do modelo HadGEM2-ES no cenário RCP 8.5

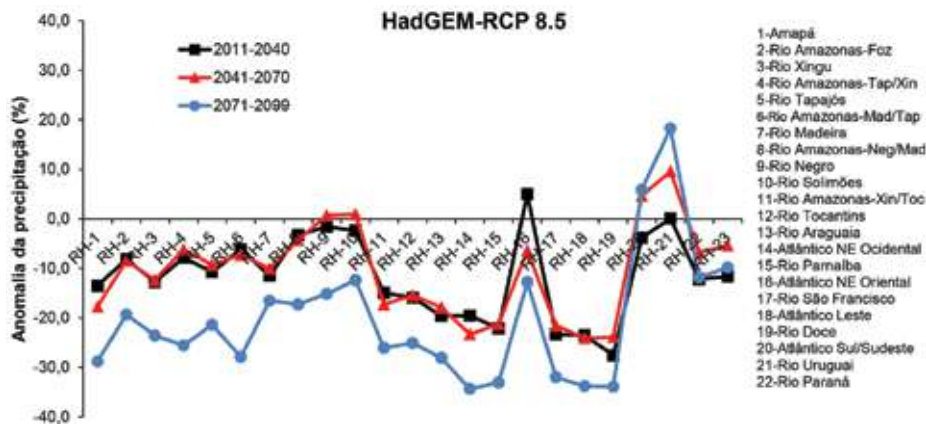
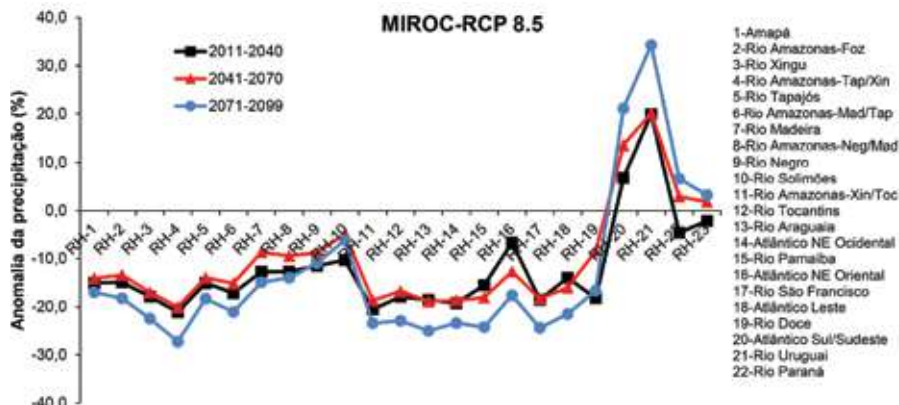


Figura 6 – Anomalia da precipitação do modelo MIROC5 no cenário RCP 8.5



Comparação semelhante foi feita para a temperatura do ar. Utilizou-se, para isso, a base de dados do CRU CL 1.0 (NEW *et al.*, 2002), que possui resolução espacial de 10 minutos de grau (aproximadamente 16 km). As variáveis climatológicas foram gravadas em arquivos que trazem a média mensal de longo termo das variáveis climatológicas por célula e por mês (de janeiro a dezembro).

Para que se tenha uma ideia de magnitude da mudança dos cenários em comparação com o período base, a tabela 2 mostra os valores de anomalia da temperatura do ar para o final do século XXI. No período 2071–2099, a anomalia da temperatura média anual nas regiões hidrográficas variou de 2,57°C a 3,82°C com o modelo HadGEM2-ES RCP 4.5. A variação nos modelos HadGEM-ES RCP 8.5 e MIROC5 RCP 8.5 foi, respectivamente, de 4,55°C a 7,59°C e de 2,24°C a 4,69°C. As regiões que apresentaram maiores anomalias foram as localizadas na Amazônia.

Tabela 2 – Anomalias de temperatura do ar em °C para o período 2071–2099

Região Hidrográfica	HadGEM2-ES RCP 4.5	HadGEM2-ES RCP 8.5	MIROC5 RCP 8.5
Amapá	3,25	5,66	3,57
Rio Amazonas-Foz	3,35	6,08	3,79
Rio Xingu	3,70	7,42	4,58
Rio Amazonas-Tap/Xin	3,38	6,73	4,06
Rio Tapajós	3,57	7,59	4,63
Rio Amazonas-Mad/Tap	3,33	7,53	4,02
Rio Madeira	3,62	7,25	4,44
Rio Amazonas-Neg/Mad	3,45	7,15	4,21
Rio Negro	3,21	6,53	3,95
Rio Solimões	3,07	5,95	3,89
Rio Amazonas-Xin/Toc	3,42	6,39	3,79
Rio Tocantins	3,79	7,46	4,69
Rio Araguaia	3,50	6,89	4,40
Atlântico NE Ocidental	3,10	5,90	3,56
Rio Parnaíba	2,91	5,63	3,71
Atlântico NE Oriental	2,57	4,55	3,27
Rio São Francisco	3,19	5,81	4,01
Atlântico Leste	2,77	4,82	3,45
Rio Doce	3,14	5,56	3,53
Atlântico Sul/Sudeste	2,65	4,68	2,49
Rio Uruguai	2,75	5,13	2,24
Rio Paraná	3,82	7,21	3,73
Rio Paraguai	3,64	7,12	3,97

3.2 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica necessita de pré-processamento de dados de entrada, bem como procedimento de avaliação do escoamento gerado conforme descrito a seguir.

3.2.1 Pré-processamento dos dados de entrada do modelo hidrológico

O pré-processamento consiste na discretização da área de estudo em células, no tratamento dos mapas de uso do solo e tipo de solo e, em seguida, no cruzamento desses mapas para obtenção do mapa de blocos ou Unidade de Resposta Hidrológica. Adotou-se o sistema de referência Sirgas 2000 para as operações de geoprocessamento.

A versão do modelo MGB-IPH com discretização espacial por células foi adaptada para aplicação neste estudo. Utilizaram-se células com a mesma dimensão do modelo Eta (20 km). No pré-processamento, em cada célula, calcula-se a sua área e determina-se a elevação dos pontos com maior e menor altitude para o cálculo do tempo de concentração (tempo necessário para a água se deslocar no interior da célula). A área da superfície da célula varia em virtude da aproximação dos meridianos na direção sul. Assim, as células próximas à linha do Equador possuem superfície maior que células no sul do país. Esse cálculo foi feito com auxílio de ferramenta de geoprocessamento. Para a determinação da elevação do terreno, utilizou-se o Modelo Digital do Terreno (MDT) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) processado pelo projeto Hydrosheds (LEHNER *et al.*, 2006) com resolução espacial de $0,01^\circ \times 0,01^\circ$. Em cada célula, há 400 pixels com informação de altitude com relação ao nível do mar. A figura 7 mostra a representação do relevo com o MDT SRTM.

O mapa de URH deve ter um número de classes não muito elevado para que não fique inviável a atribuição de valores dos parâmetros do modelo. Para isso, procura-se reduzir o número de classes dos mapas de tipo e uso do solo. No caso do mapa de tipo de solo, foram mantidas individualizadas as classes de latossolo e de argissolo por possuírem elevada proporção no Brasil. As demais foram agregadas em grupos conforme as características de textura e profundidade do solo (tabela 3). O resultado é mostrado na figura 8. A proporção de solo por região hidrográfica é apresentada na tabela 4.

Figura 7 – Relevo na área de estudo

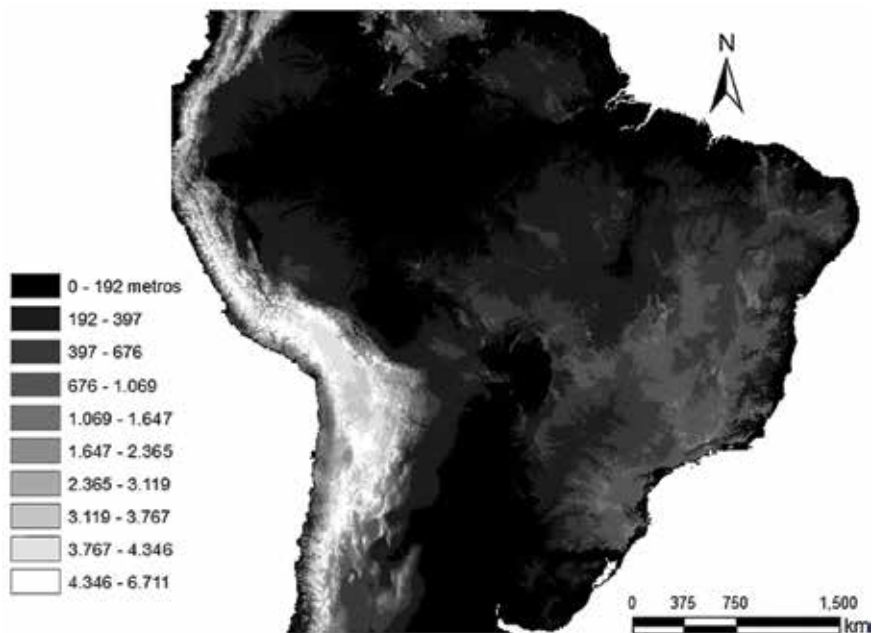


Tabela 3 – Classes de tipo de solo

Código	Grupo	Classes
1	-	Latossolo
2	-	Argissolo
3	1	Luvissolos
		Chernossolos
		Vertissolos
		Nitossolo
		Neossolo Flúvicos
4	2	Neossolo
		Quartzarênicos
		Neossolo Regolíticos
		Lithosols
		Xerosol
5	3	Cambissolo
		Gleissolo
		Planossolo
6	-	Água

Tabela 4 – Proporções das classes de tipo de solo em porcentagem

Região	Latossolo	Argissolo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Água
1	81,62	6,75	4,75	2,65	3,19	1,03
2	77,93	2,51	0,29	0,00	12,00	7,26
3	55,40	34,63	3,95	5,12	0,35	0,56
4	82,47	5,78	0,92	0,23	8,64	1,96
5	80,42	4,31	0,00	14,31	0,09	0,87
6	77,95	5,63	0,03	4,40	9,70	2,29
7	25,23	31,79	9,11	24,67	8,76	0,45
8	60,19	5,35	0,00	0,00	30,94	3,52
9	73,79	6,26	0,02	10,65	7,59	1,68
10	62,79	12,04	3,90	12,84	7,16	1,27
11	51,06	24,20	0,00	0,00	21,45	3,29
12	36,65	35,13	4,90	21,33	1,43	0,56
13	46,29	8,89	2,51	41,67	0,63	0,00
14	68,19	5,12	8,70	7,55	10,11	0,33
15	44,51	0,00	7,57	47,84	0,08	0,00
16	6,32	7,79	61,66	23,75	0,24	0,24
17	19,80	3,17	48,35	28,67	0,00	0,00
18	36,74	10,18	42,35	10,30	0,33	0,10
19	56,00	26,73	0,06	16,94	0,07	0,20
20	21,93	22,98	27,66	13,38	12,02	2,03
21	20,99	4,96	42,49	18,58	12,08	0,89
22	60,44	6,84	13,37	17,02	1,83	0,52
23	9,51	6,70	25,45	16,88	41,39	0,06

O mapa de uso do solo, também, sofreu agregação para evitar um elevado número de classes. Por exemplo, foram agregadas todas as classes de floresta independentemente se eram do tipo aberta, densa, temperada ou tropical. A tabela 5 traz a proporção de classes de uso do solo e cobertura vegetal e a figura 9 o mapa com a espacialização das classes.

A combinação dos mapas de tipo de solo e uso do solo e cobertura vegetal resultou em um mapa de URH com 42 classes, que foram agregadas para resultar em um mapa com 16 classes (figura 10).

Tabela 5 – Proporções das classes de uso do solo e cobertura vegetal em porcentagem

Região	Floresta	Agricultura	Cerrado	Caatinga	Pastagem	Solo exposto	Água
1	92,77	2,00	3,59	0,45	0,54	0,04	0,60
2	89,37	3,52	3,68	0,87	0,34	0,11	2,10
3	82,67	11,02	3,74	1,13	0,53	0,01	0,89
4	86,83	7,61	2,13	0,19	0,06	0,09	3,09
5	77,19	16,48	3,46	1,08	0,86	0,04	0,89
6	90,77	1,55	2,36	0,88	0,12	0,32	3,99
7	74,38	8,55	8,71	3,22	4,06	0,28	0,79
8	90,35	1,74	2,79	0,03	0,11	0,20	4,78
9	88,49	0,96	5,55	3,51	0,16	0,06	1,26
10	86,61	5,32	0,77	2,38	3,96	0,21	0,75
11	84,32	7,10	7,49	0,51	0,11	0,04	0,43
12	26,78	42,59	20,69	6,63	2,11	0,01	1,19
13	13,37	38,05	31,14	15,42	1,40	0,12	0,49
14	44,55	51,10	1,73	0,15	0,24	0,46	1,78
15	35,99	44,94	8,09	9,69	0,00	0,80	0,48
16	30,54	38,35	0,97	22,81	0,03	6,41	0,88
17	16,21	54,25	13,92	11,11	0,78	3,00	0,73
18	15,26	66,65	8,68	5,92	1,48	0,89	1,12
19	15,40	66,52	8,11	6,26	3,57	0,04	0,09
20	24,12	45,86	12,94	4,45	10,05	0,32	2,26
21	16,34	34,53	19,27	6,03	22,61	0,04	1,19
22	11,25	68,03	9,69	3,86	4,82	0,27	2,08
23	46,07	25,06	16,27	9,43	2,01	0,01	1,14

Figura 8 – Mapa de tipo de solo após agregação de classes

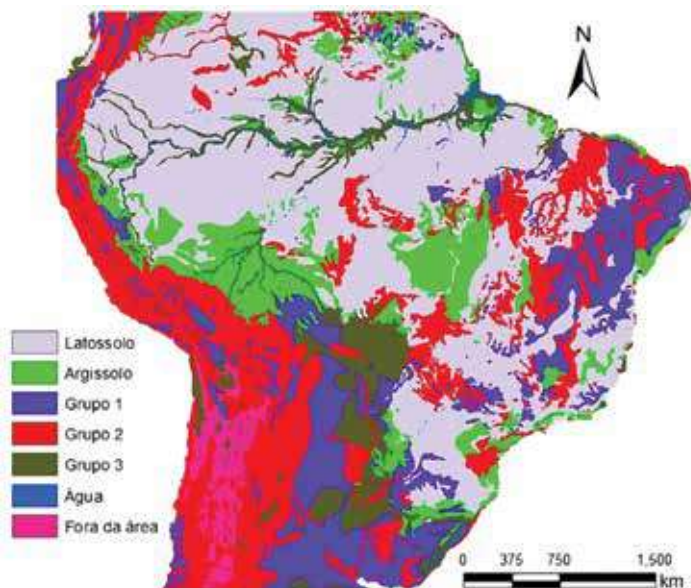


Figura 9 – Mapa de uso do solo e cobertura vegetal no Brasil.

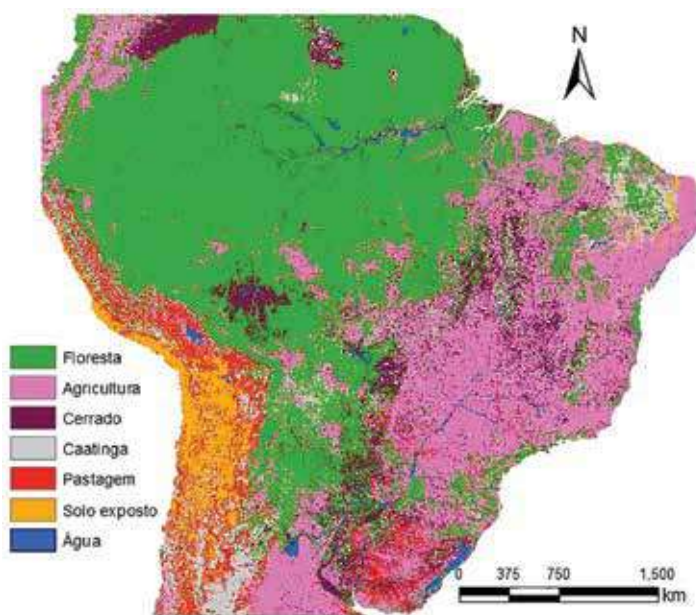
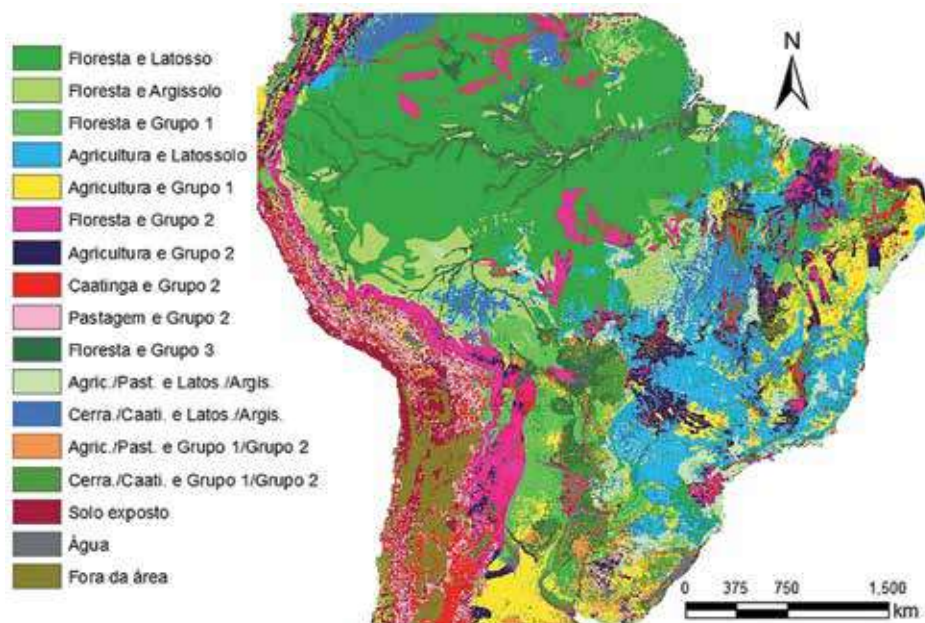


Figura 10 – Mapa de unidades de resposta hidrológica



3.2.2 Validação do modelo hidrológico

Os parâmetros do modelo não foram calibrados da forma clássica porque não há disponibilidade de dados de vazão correspondente a toda a área das regiões hidrográficas para comparação e, a partir daí, realizar a calibração. Optou-se por utilizar como referência os valores dos parâmetros obtidos na calibração do modelo MGB-IPH em grandes bacias brasileiras como rio Uruguai (COLLISHONN *et al.*, 2007), rio Madeira (RIBEIRO NETO *et al.*, 2008), rio São Francisco (SILVA, 2005) e rio Solimões (PAIVA, 2009).

Os resultados da simulação com o modelo hidrológico referentes ao período base foram comparados com os valores médios de longo período levantados em ANA (2005).

A tabela 6 mostra os valores por região hidrográfica juntamente com o erro de volume dado pela expressão:

$$\Delta V = \frac{Q_{\text{Calc}} - Q_{\text{ANA}}}{Q_{\text{ANA}}}, \quad (5)$$

onde Q_{Calc} é a vazão calculada com o modelo e Q_{ANA} a vazão medida.

Verifica-se que, na maioria das regiões, a simulação obteve resultado dentro do aceitável, com erro de volume inferior a 10%. As regiões da tabela 1 tiveram de ser ajustadas para coincidir com as tratadas em ANA (2005).

Tabela 6 – Comparação da vazão média de longo período (em m³/s)

Região Hidrográfica	ANA	Eta- HadGEM2-ES	ΔV (%)	Eta-MIROC5	ΔV (%)
Amazônia	218268	198523,53	-9,05	197208,62	-9,65
Tocantins/Araguaia	13624	12101,62	-11,17	13979,22	2,61
Atlântico NE Ocidental	2683	3625,71	35,14	4337,20	61,65
Parnaíba	763	701,56	-8,05	794,07	4,07
Atlântico NE Oriental	779	829,53	6,49	845,76	8,57
São Francisco	2850	2706,97	-5,02	2929,35	2,78
Atlântico Leste	1492	1571,26	5,31	1642,26	10,07
Atlântico SE/Atlântico Sul	7353	7353,65	0,01	7058,95	-4,00
Uruguai	4121	4709,36	14,28	4452,46	8,04
Paraná	11453	10863,58	-5,15	12092,26	5,58
Paraguai	2368	2749,06	16,09	2772,96	17,10
Total	265.754,0	245.735,84	-7,53	248.113,11	-6,64

3.3 Avaliação de impactos sobre os recursos hídricos

A seguir, apresentam-se os resultados referentes aos indicadores propostos para análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos. As figuras com os mapas dos indicadores apresentam sempre os resultados do modelo Eta-HadGEM2-ES RCP

4.5 período 2071–2099. Entende-se que assim se evita uma apresentação repetitiva e, ao mesmo tempo, permite um bom entendimento dos impactos. Os valores numéricos das anomalias e demais indicadores de impacto são apresentados no anexo A.

3.3.1 Escoamento anual médio

Após a definição dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico, realizaram-se as simulações correspondentes a cada cenário. As simulações permitiram avaliar o nível de sensibilidade das regiões hidrográficas com respeito à variação da precipitação nos cenários. O conceito de elasticidade é uma boa maneira de avaliar a sensibilidade da vazão de longo termo às mudanças na precipitação. A elasticidade da vazão devida à precipitação é definida como a variação proporcional na vazão anual média dividida pela variação proporcional na média anual de precipitação.

Os valores médios de toda a área de estudo são apresentados na tabela 7. A elasticidade média de toda a área de estudo varia de 0,73 a 2,03, caracterizando sensibilidade mediana. No entanto, a avaliação dos valores por região hidrográfica mostra que a elasticidade é mais baixa na Amazônia e no Centro-Oeste, enquanto o Nordeste apresenta os maiores valores (média de 4,02 e variação de 2,1 a 7,7). Esse resultado está de acordo com as conclusões obtidas por Chiew (2006) em estudo realizado em bacias hidrográficas da Austrália. Chiew (2006) observou que a vazão é mais sensível às chuvas nas bacias hidrográficas mais secas. A elasticidade encontrada por Chiew (2006) em bacias hidrográficas da Austrália é de cerca de 2,0–3,5 (observadas em cerca de 70% das 219 bacias hidrográficas analisadas).

Tabela 7 – Elasticidade média de toda a área de estudo

Cenário	Período	Elasticidade
Eta-HadGEM2-ES 4.5	2011–2040	2,03
	2041–2070	0,75
	2071–2099	0,79
Eta-HadGEM2-ES 8.5	2011–2040	1,00
	2041–2070	0,73
	2071–2099	0,98

(continua)

Cenário	Período	Elasticidade
Eta-MIROC5 8.5	2011–2040	1,42
	2041–2070	1,16
	2071–2099	1,13

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) destaca que a sensibilidade das bacias hidrográficas é altamente influenciada pelo valor do coeficiente de escoamento (razão entre vazão e precipitação). Quanto menor o coeficiente, maior será a sensibilidade da bacia aos estímulos climáticos.

Além da elasticidade das regiões, calculou-se, também, a anomalia do escoamento anual médio (figura 11). Verifica-se que os resultados são compatíveis com estudos realizados em bacias brasileiras. O Nordeste mostra tendência para redução da vazão futura (RIBEIRO NETO *et al.*, 2014), assim como a Amazônia (SIQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2015), Cerrado e região Sudeste (NÓBREGA *et al.*, 2011), enquanto as bacias hidrográficas do Sul apresentam aumento do escoamento.

Em decorrência da elevada dependência de hidroeletricidade da matriz energética brasileira, procedeu-se uma análise do impacto nas bacias produtoras de energia hidrelétrica. Verificou-se um significativo impacto decorrente da mudança do regime de vazões. O gráfico da figura 12 mostra a anomalia da vazão média anual em três das mais importantes bacias geradoras de energia hidrelétrica (rios Tocantins, São Francisco e Paraná). Os três períodos analisados apresentam tendência consistente de redução da vazão até o fim do século com a situação mais crítica na bacia do rio Tocantins, que chega a uma redução entre 50% e 60%.

Figura 11 – Anomalia de escoamento Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5 (2071–2099)

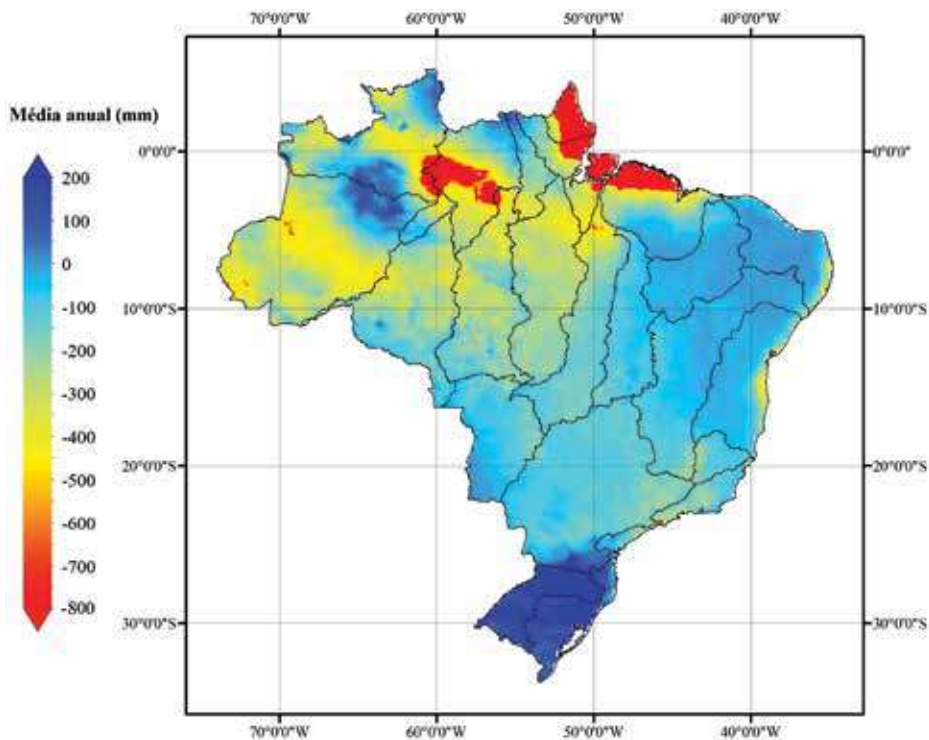
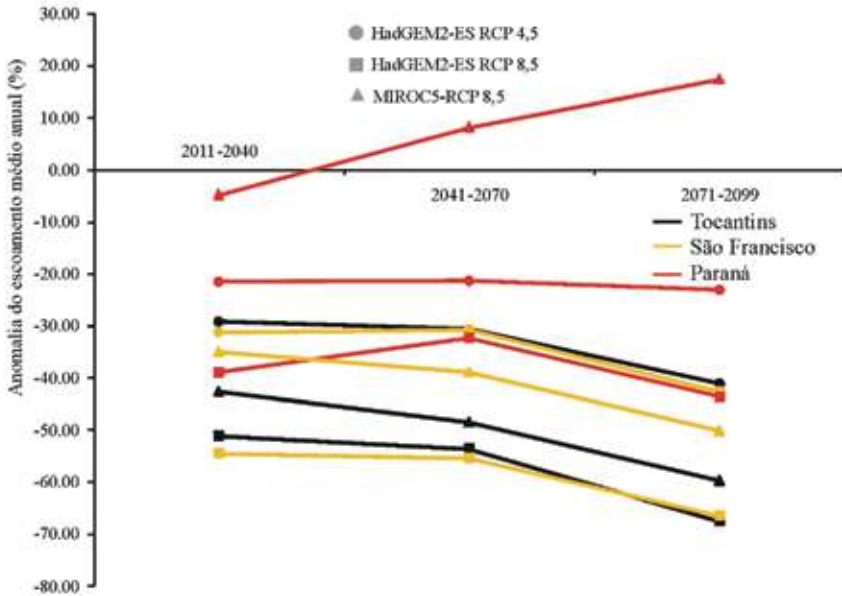


Figura 12 – Anomalia de vazão anual média em três bacias geradoras de energia



Nota: as bacias são identificadas pelas cores e os cenários são identificados pelos marcadores.

Com respeito à variabilidade do regime de vazões, a comparação do coeficiente de variação (razão entre desvio padrão e média das vazões) permite verificar as regiões que podem sofrer maiores mudanças, uma vez que esse coeficiente mede a variabilidade da vazão em torno da média. As tabelas do anexo A mostram a razão entre o CV (coeficiente de variação) do período base e o CV dos cenários. Os valores maiores que a unidade indicam aumento do CV. As regiões hidrográficas do rio Madeira e do rio Paraguai apresentaram os maiores incrementos de CV (cinco períodos em cada região). Considerando todas as regiões, períodos e modelos, houve aumento do CV em 25% dos casos.

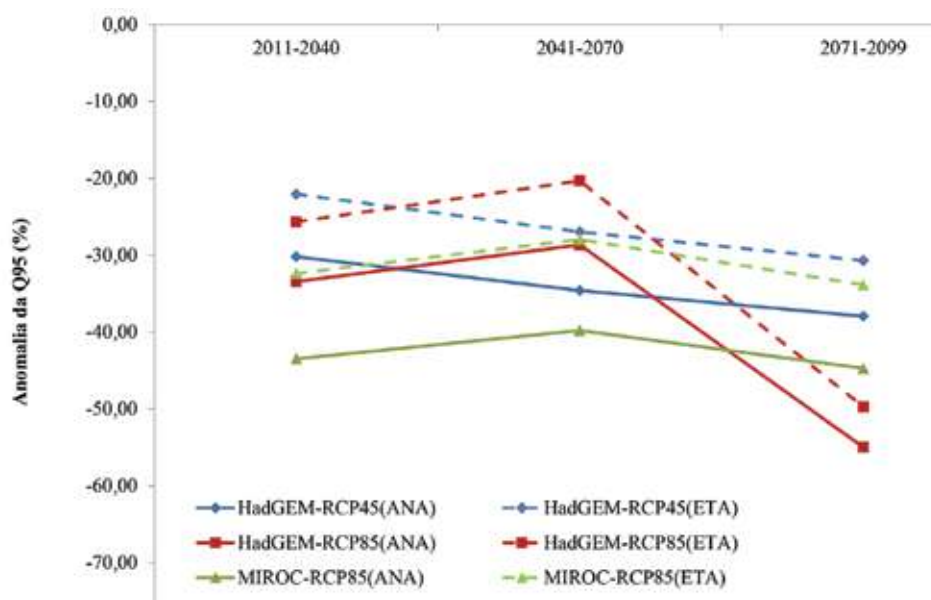
3.3.2 Vazão de estiagem

De acordo com a ANA (2013), para o cálculo da disponibilidade hídrica de águas superficiais em bacias com regularização, adota-se a vazão

incremental de estiagem para os trechos não regularizados somada à vazão regularizada pelos reservatórios com 100% de garantia. Em rios sem regularização, a disponibilidade é considerada como igual à vazão de estiagem. Considera-se como de estiagem a vazão com permanência de 95% do tempo (Q_{95}). Como neste estudo não houve simulação dos reservatórios, a disponibilidade hídrica em todas as regiões foi considerada como igual a Q_{95} . A avaliação do impacto sobre a vazão de estiagem pode ser apresentada como a anomalia em valores percentuais. A figura 13 mostra a anomalia média de toda a área simulada para os três períodos, cenários, modelos, considerando como referência o valor de vazão medida (ANA, 2013) e o calculado pelo modelo regional no período base (Eta).

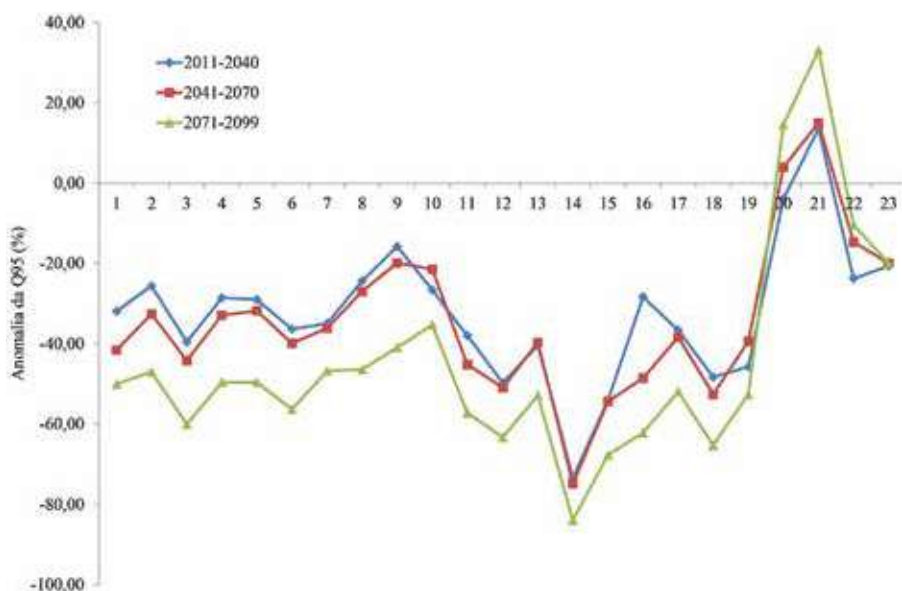
O erro médio entre a vazão de estiagem medida e calculada com dados dos modelos é de -10,5% e -16,4%, respectivamente, para o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-MIROC5. Esse valor refere-se a todo o território nacional e o sinal negativo indica subestimação.

Figura 13 – Anomalia média da Q_{95} de toda a área simulada considerando como referência o valor de vazão medido (ANA) e o calculado no período base (Eta)



A anomalia pode ser apresentada, também, com a média dos três cenários (Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5, Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5 e Eta-MIROC5 RCP 8.5) para todas as regiões hidrográficas por período de análise (figura 14). O valor de referência tomado foi a vazão de estiagem calculada pelos modelos no período base. Verifica-se um comportamento similar para os três períodos, mas com maior impacto no final do século. A maioria das regiões hidrográficas apresenta reduções entre 20% e 40% até o ano de 2070. Até o final do século, 13 das 23 regiões hidrográficas apresentam redução acima de 50% da vazão de estiagem, dentre as quais regiões hidrográficas como do rio São Francisco e do rio Tocantins.

Figura 14 – Anomalia média da vazão Q_{95} considerando os três cenários por região hidrográfica



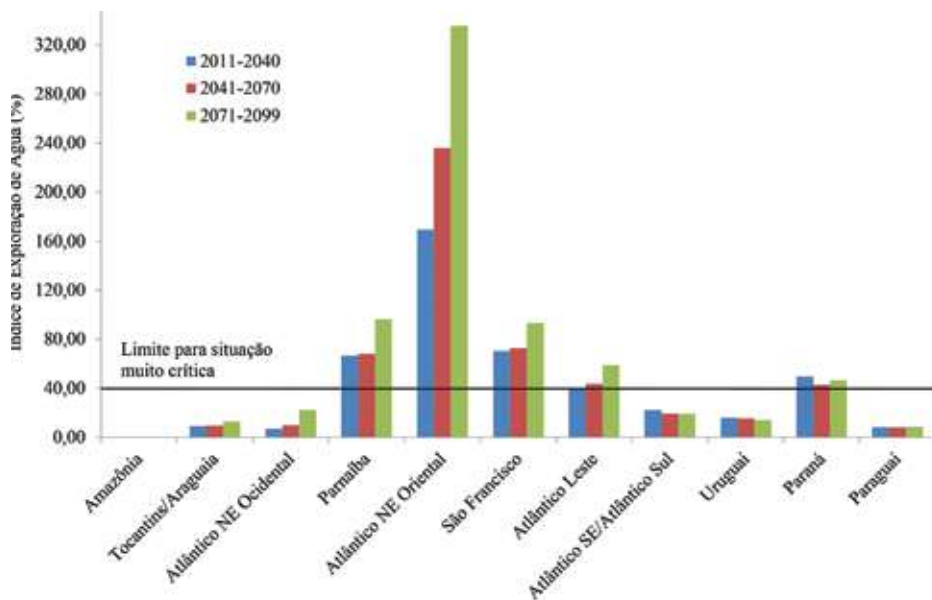
As tabelas do anexo A mostram a razão entre a vazão Q_{95} do período-base e Q_{95} dos cenários. Valores maiores que a unidade indicam redução da vazão de estiagem. Isso ocorre em praticamente todas as simulações, inclusive para as regiões do sul do país com o modelo Eta-HadGEM2-ES. A exceção fica por conta dos cenários do modelo Eta-Eta-MIROC5 nas regiões do sul do país em que há aumento da Q_{95} .

O impacto sobre os recursos hídricos, também, pode ser avaliado por meio do cálculo do Índice de Exploração de Água (*Water Explotation Index – WEI*), que faz a razão entre a retirada de água total anual e a vazão anual média de longo período. Seguindo o procedimento adotado pela ANA (2013), utilizou-se a vazão de estiagem no lugar da vazão média. A interpretação desse índice é a seguinte:

- a) < 5% – Excelente. Pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento é necessária. A água é considerada um bem livre;
- b) 5 a 10% – A situação é confortável, podendo ocorrer necessidade de gerenciamento para solução de problemas locais de abastecimento;
- c) 10 a 20% – Preocupante. A atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios;
- d) 20% a 40% – A situação é crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos;
- e) 40% – A situação é muito crítica. Gosling e Arnell (2013) utilizaram o limiar 40% na aplicação global do índice WEI para indicar exposição à escassez hídrica.

No cálculo do WEI, foram adotados os valores de demanda apresentados em ANA (2013), que se referem ao ano de 2010. Conforme mostrado na figura 15, as regiões hidrográficas Parnaíba, Atlântico NE Oriental, São Francisco, Atlântico Leste e Paraná apresentam situação muito crítica ($WEI > 40\%$) em todos os períodos analisados. Apenas as regiões Amazônia, Tocantins/Araguaia e Paraguai apresentam situação confortável em todos os períodos. Todas as demais regiões apresentam situação preocupante ou pior ao menos em um dos três períodos.

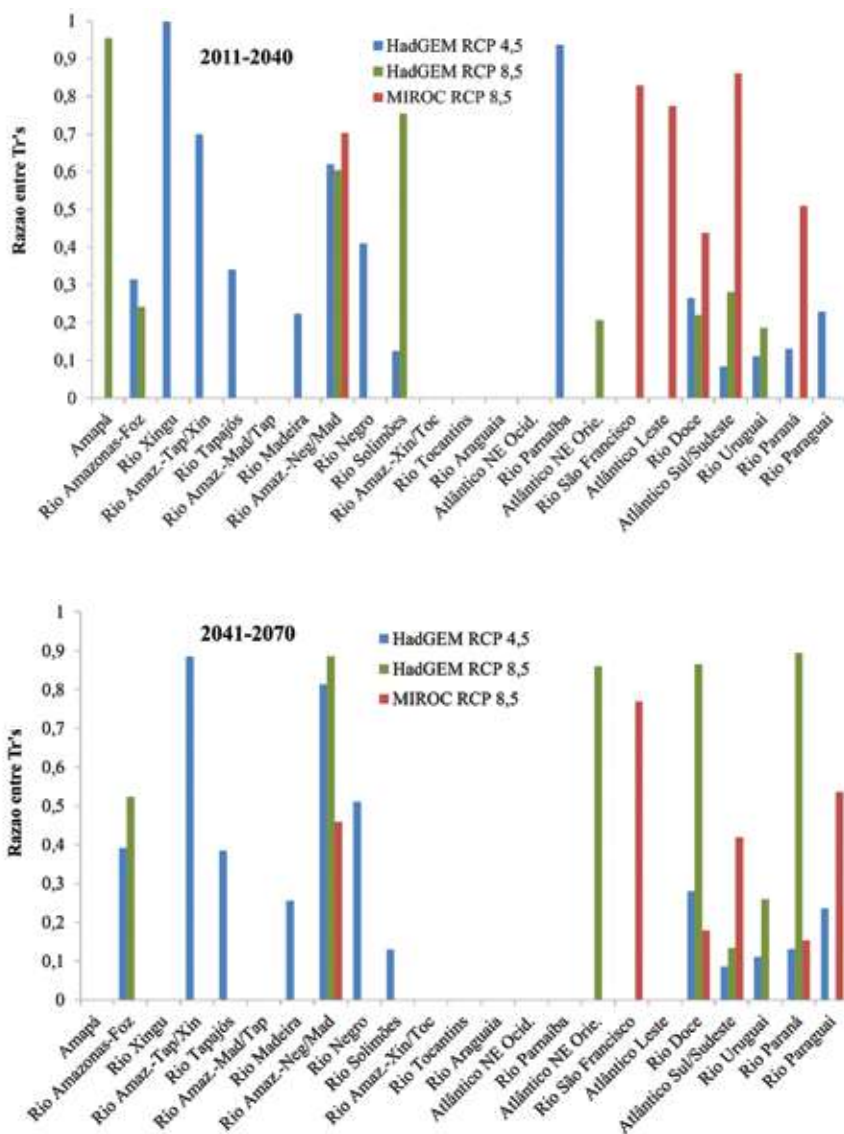
Figura 15 – Valor médio para todos os cenários do Índice de Exploração de Água por período

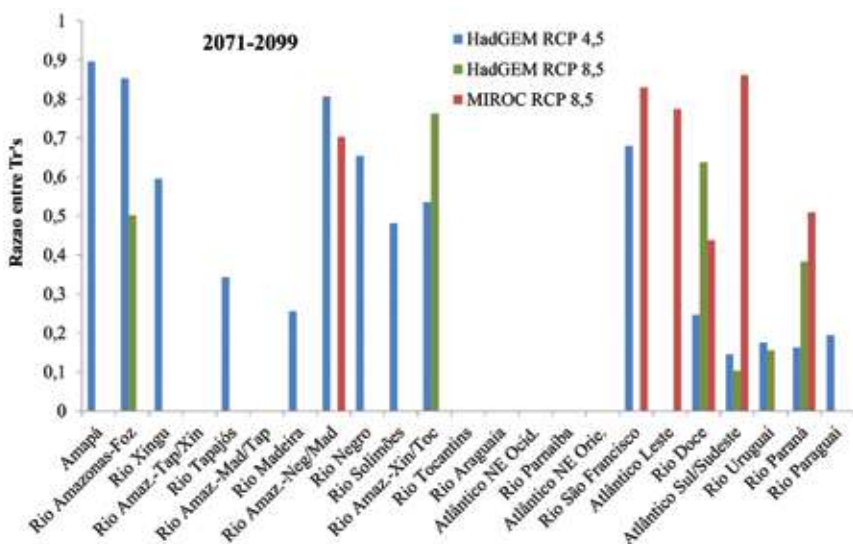


3.3.3 Eventos extremos de cheias

O impacto referente a eventos extremos de cheias foi avaliado calculando-se a vazão diária máxima anual com tempo de retorno de 20 anos referente ao período base e, em seguida, calculando o tempo de retorno dessa mesma vazão para as séries de vazão dos cenários. A razão entre os dois tempos de retorno indica se haverá intensificação das cheias.

Figura 16. Relação entre tempo de retorno da vazão diária máxima anual de 20 anos referente ao período base e tempo de retorno obtido com a mesma vazão para os períodos 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099





Nota: são apresentados apenas valores das regiões em que a razão é inferior a um (intensificação dos eventos).

O valor inferior a um indica redução do tempo de retorno para a mesma vazão (intensificação de eventos de cheias), e o valor superior a um indica aumento do tempo de retorno (significando eventos de cheia com menor intensidade). Os horizontes temporais apresentam regiões em que há intensificação dos eventos de cheia como pode ser visto na figura 16. Destacam-se as regiões do rio Uruguai, do rio Paraná, do rio Paraguai e do Atlântico Sul/Sudeste. O anexo A mostra os valores das vazões para o tempo de retorno de 20 anos.

3.3.4 Evapotranspiração e umidade do solo

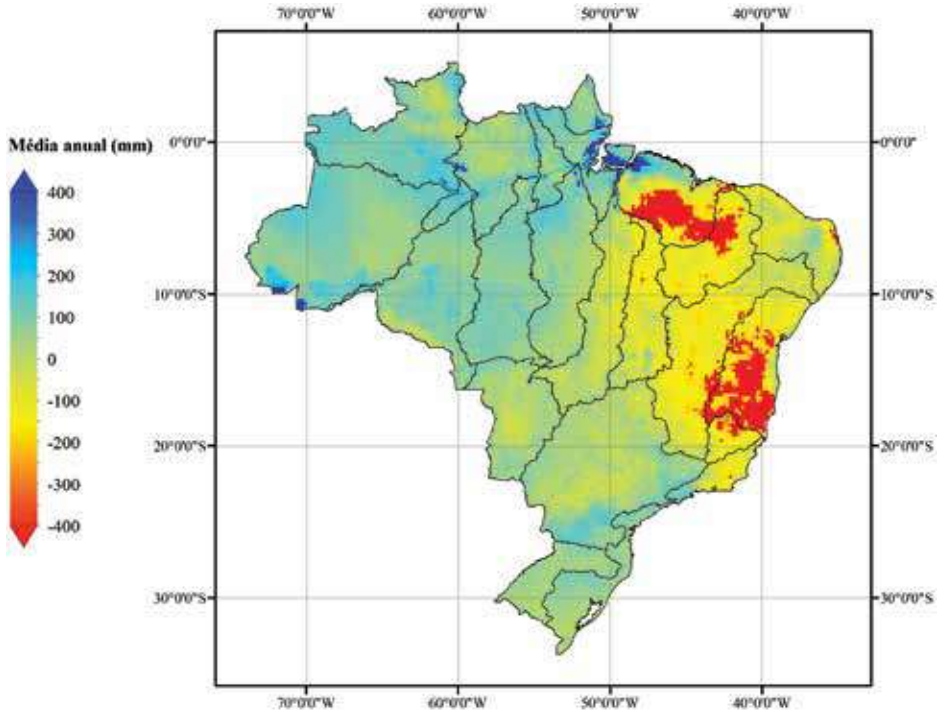
O processo de evapotranspiração pode ser decomposto em duas partes: evaporação e transpiração. A evaporação ocorre sobre superfícies líquidas tais como rios, lagos e a água interceptada pela vegetação. No modelo MGB-IPH, considera-se a evaporação apenas da água retida no reservatório de interceptação. A transpiração refere-se à perda de água pela vegetação, a qual depende do estado de umidade do solo. Dessa forma, há distinção entre evaporação (que ocorre sobre a lâmina interceptada) e evapotranspiração (soma da evaporação e transpiração).

Ocorrerá, muito provavelmente, aumento da evapotranspiração potencial na maioria das regiões do planeta em um clima mais quente, contribuindo para acelerar o ciclo hidrológico (IPCC, 2014). Além da temperatura do ar, fatores como radiação líquida e umidade do solo devem afetar as taxas de evapotranspiração. O mapa da figura 17 representa a anomalia de evapotranspiração no território brasileiro.

A água presente no solo é uma importante variável do ciclo hidrológico e do clima. No ciclo hidrológico, a umidade do solo mantém a vazão nos rios durante o período de estiagem. Quanto ao clima, o estresse hídrico, ou seja, a diminuição da transpiração da vegetação em virtude da diminuição da disponibilidade de água no solo, pode afetar o balanço de energia (a partição da radiação em calor latente e calor sensível). Por esse motivo, o conhecimento do comportamento da umidade no solo é fundamental para a utilização adequada de modelos hidrológicos e, conseqüentemente, obter informações sobre as conseqüências de eventuais mudanças climáticas em virtude de períodos de seca mais severos no futuro.

Diante de um cenário de mudanças climáticas, que resultem em uma diminuição persistente da precipitação média anual na bacia Amazônica, a umidade do solo será diretamente afetada. Jipp *et al.* (1998), em estudo realizado em Paragominas (PA) em áreas de floresta e pastagem, observaram que após, a ação do fenômeno *El Niño Southern Oscillation* (Enso), em que há baixos níveis de precipitação, a umidade do solo leva um longo período de tempo para recuperar seu nível normal. O entendimento do comportamento desse processo é importante para que se possam antever as possíveis conseqüências de mudanças no clima ou na cobertura vegetal.

Figura 17 – Anomalia de evapotranspiração Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5 (2071–2099)

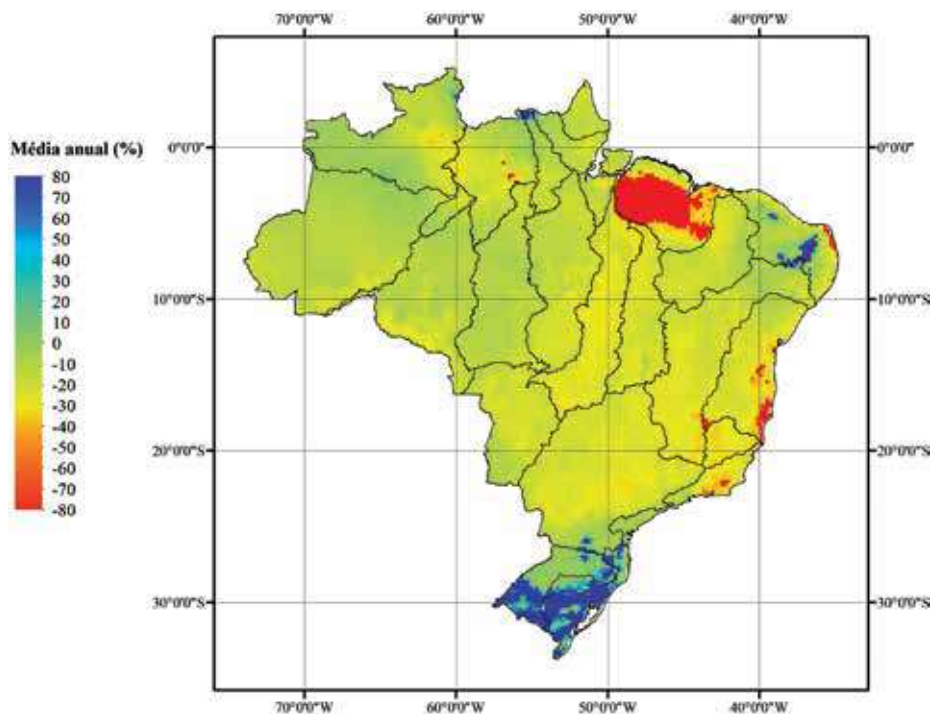


A umidade do solo é uma variável de armazenamento e, por esse motivo, optou-se em representar a anomalia em termos percentuais:

$$(W_{cen} - W_{base}) / W_{base} \times 100, \quad (6)$$

em que W_{cen} é a umidade do solo no cenário e W_{base} é a umidade do solo no período base. O resultado é mostrado no mapa da figura 18. Verifica-se predominância de áreas com redução da umidade do solo, com destaque para a região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental (partes dos estados do Pará e do Maranhão). Há aumento da umidade do solo no Sul e em pequenas áreas da região Atlântico Nordeste Oriental. Em geral, essa configuração se mantém nos demais cenários, nos quais, a depender da situação, ocorre expansão ou retração das áreas.

Figura 18 – Anomalia de umidade do solo Eta-HadGEM2-ES
RCP 4.5 (2071–2099)



Observando os mapas de evapotranspiração, verifica-se que a anomalia dessa variável tem comportamento distinto na Amazônia e no Nordeste. Enquanto na Amazônia aumenta (anomalia positiva), no Nordeste diminui (anomalia negativa). Uma vez que o escoamento reduz nas duas regiões, espera-se que a evapotranspiração possua anomalia positiva em ambas. A anomalia negativa da evapotranspiração no Nordeste pode estar relacionada à maior sensibilidade da evapotranspiração nessa região e à condição de umidade do solo. No Nordeste, a capacidade de armazenamento do solo é menor e, por consequência, o estado de umidade do solo influenciará mais a transpiração das plantas.

4 Considerações finais

A análise da anomalia do escoamento nas regiões hidrográficas mostra que há redução da disponibilidade hídrica em praticamente todo o território do Brasil. As maiores reduções em termos percentuais se apresentam nas regiões hidrográficas do rio Doce, do rio São Francisco e do Atlântico Leste para o modelo Eta-HadGEM2-ES. No modelo Eta-MIROC5, as maiores reduções ocorrem nas regiões hidrográficas dos rios Araguaia, Tocantins e São Francisco. Regiões hidrográficas do sul do país apresentaram aumento do escoamento como nos casos do Atlântico Sul/SE, do Uruguai e de parte do Paraná. Os resultados apresentados pelo IPCC em seu mais recente Relatório de Avaliação (AR5) (IPCC, 2014) mostram que grande parte do território brasileiro não possui concordância entre os modelos climáticos e hidrológicos (parte do Centro-Oeste, norte do Sudeste, sul do Nordeste, centro da região Sul). Na parte em que há concordância e que é apresentada no relatório, o sinal da mudança está em conformidade com o obtido no estudo da Terceira Comunicação Nacional (TCN). Há conformidade, também, com os trabalhos de Arnell e Gosling (2013), Arnell e Lloyd-Hughes (2014) e Fung *et al.* (2011).

Chamam atenção os valores de anomalia negativa nas grandes bacias produtoras de energia elétrica. Nos rios São Francisco, Tocantins e Paraná, a redução do escoamento pode chegar a próximo de 70% com o modelo Eta-HadGEM2-ES até o final do século.

Com respeito ao cálculo da vazão Q_{95} , associada ao escoamento mínimo nas regiões hidrográficas, verifica-se redução indicando intensificação dos períodos de estiagem do regime hidrológico. As maiores reduções são verificadas nas regiões hidrográficas do rio Doce e do Atlântico Leste para o modelo Eta-HadGEM2-ES e dos rios Araguaia, Tocantins e Xingu para o modelo Eta-MIROC5. Esse resultado é semelhante ao verificado para a anomalia do escoamento anual médio. A avaliação da relação demanda *versus* disponibilidade mostra um quadro preocupante diante da ocorrência de situação muito crítica em regiões importantes sob o ponto de vista econômico, produção agrícola e de energia como são os casos dos rios São Francisco e Paraná. Com relação ao índice de exploração da água, apenas as regiões Amazônia, Tocantins/Araguaia e Paraguai apresentam situação confortável em todos os períodos e cenários.

A análise de mudanças nos eventos de cheias mostrou significativa intensificação em regiões populosas como Atlântico SE/Sul, Uruguai e Paraná. Esse resultado está em concordância com o encontrado por Hirabayashi *et al.* (2013), utilizando um modelo hidrológico forçado com a saída de 11 MCGs para o ano 2080 e o cenário RCP 8.5. Hirabayashi *et al.* (2013) identificaram redução do tempo de retorno da vazão correspondente à cheia de 100 anos em praticamente todo o território brasileiro.

Considerando o impacto das mudanças do clima na agricultura, a busca por medidas de adaptação passa pela expansão das áreas irrigadas e aprimoramento dos métodos de irrigação (MCDONALD; GIRVETZ, 2013). No Brasil, regiões com vocação agrícola como do rio Paraná e outras com elevada dependência de irrigação como do rio São Francisco devem receber atenção especial para busca de adaptação às mudanças do clima com relação à produção agrícola.

A despeito das incertezas associadas às modelagens climática e hidrológica, pode-se considerar que é “muito provável” (*very likely*) que as características hidrológicas na escala das bacias hidrográficas irão se modificar no futuro (BATES *et al.*, 2008). Diante dessa condição, alguns países e regiões no mundo estão desenvolvendo procedimentos de adaptação e práticas de gerenciamento de risco que buscam incorporar as mudanças do regime hidrológico (BATES *et al.*, 2008). Os resultados obtidos no estudo da Terceira Comunicação Nacional apontam para uma situação hidrológica no Brasil semelhante a de outros países e regiões do mundo em termos de mudança do regime hidrológico até o final do século XXI. O que se coloca como procedimentos de adaptação está relacionado com medidas voltadas para a disponibilidade hídrica por um lado e, por outro lado, para o consumo. Pelo lado da disponibilidade, as ações referem-se à ampliação da infraestrutura hídrica. Entretanto, essas medidas possuem restrições de ordem física, ambiental e econômica. Pelo lado da demanda, as ações devem enfatizar a redução de perdas dos sistemas de abastecimento de água, aprimoramento da eficiência dos sistemas de irrigação e ampliação do reuso de água (IPCC, 2014).

Aparece como uma constatação cada vez mais clara a necessidade dos órgãos gestores de recursos hídricos de se adaptarem para o enfrentamento dos

impactos das mudanças do clima. Nesse sentido, deve-se buscar um leque flexível de soluções que produzam benefícios independente dos impactos futuros (medidas sem arrependimento). Algumas medidas citadas por IPCC (2014), além das anteriormente mencionadas, são aproveitamento de águas pluviais, lavouras sustentáveis, manutenção de cobertura vegetal, melhoramento da gestão de pastos, dessalinização e maior eficiência na gestão da água do solo e da irrigação.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, identificaram-se procedimentos que podem ser realizadas nos próximos estudos de avaliação de vulnerabilidade dos recursos hídricos às mudanças climáticas no Brasil. Com relação à modelagem hidrológica, pode-se realizar nova discretização das regiões hidrográficas de modo a se ajustar mais à divisão adotada pela ANA em seus estudos. A hierarquização das células respeitando a drenagem poderá facilitar a obtenção de informação em seções dos rios diferentes dos exutórios das regiões hidrográficas. É necessária, também, a avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea (CROSBIE *et al.*, 2013; PORTMANN *et al.*, 2013) considerando que, em algumas regiões, essa fonte de água é de grande importância. Sob o aspecto da gestão dos recursos hídricos, é importante a inclusão do total da população existente nas regiões hidrográficas para permitir o cálculo de disponibilidade e demanda *per capita*, bem como o número de pessoas vivendo em áreas com risco de inundações.

Referências

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas/Ministério do Meio Ambiente, 2013. 432 p.
- _____. **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas/Ministério do Meio Ambiente, 2005. 123 p.
- _____. **Topologia Hídrica: Método de Construção e Modelagem da Base Hidrográfica para Suporte à Gestão de Recursos Hídricos – versão 1.11**. Brasília: Agência Nacional de Águas/Ministério do Meio Ambiente, 2006. 29p.
- ARNELL, N. W.; LLOYD-HUGHES, B. The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. **Climatic Change**, Dordrecht, Netherlands, v. 122, n. 1-2, , p. 127-140, 2014.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, Netherlands, v. 486, p. 351-364, 2013.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, Washington, DC, United States, v. 47, n. 4, p. 1-18, 2011.

BATES, B. C. *et al.* Climate Change and Water. **Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Geneva, IPCC Secretariat, 210p, 2008.

CHIEW, F. H. S. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. **Hydrological Sciences Journal**, Oxon-England, v. 51, n. 4, p. 613-625, 2006.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, USA, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Brasil). **Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003**. Brasília, DF, 2003.

COLLISCHONN, W. *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, Oxon-England, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

CROSBIE, R. S. *et al.* An assessment of the climate change impacts on groundwater recharge at a continental scale using a probabilistic approach with an ensemble of GCMs. **Climatic Change**, Dordrecht-Netherlands, v. 117, n. 1-2, p. 41-53, 2013.

DANTAS, C. E. O. *et al.* Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 239-248, 2014.

EVA, H. D. *et al.* **A Vegetation map of South America**. EUR 20159 EN. Luxembourg: European Commission, 2002. 34 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The Digital Soil Map of the World**. The United Nations. Version 3.6. Rome, Italy, 2003.

FUNG, F.; LOPEZ, A.; NEW, M. Water availability in +2 degrees C and +4 degrees C worlds. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, England, v. 369, n. 1934, p. 99-116, 2011.

GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, Dordrecht, Netherlands, 2013. DOI: <10.1007/s10584-013-0853-x>.

_____. Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. **Hydrologic Processes**, Hoboken, USA, v. 25, n. 7, p. 1129-1145, 2011.

HANASAKI, N. *et al.* A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways – part 2: water availability and scarcity. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, Germany, v. 17, n. 10, p. 2393–2413, 2013.

HIRABAYASHI, Y. *et al.* Global flood risk under climate change. **Nature Climate Change**, London-England, v. 3, n. 9, p. 816–821, 2013.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD, C. B. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects**. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. 1132 p.

_____. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

JIPP, P. H. *et al.* Deep soil moisture storage and transpiration in forest sand pastures of seasonally-dry Amazonia. **Climatic Change**, Dordrecht, Netherlands, v. 39, n. 2-3, p. 395–412, 1998.

KUNDZEWICZ, Z. W. *et al.* Fresh water resources and their management. In: PARRY, M. L. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 173–210.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **HydroSHEDS**. Technical Documentation. Version 1.0. 2006. 27 p. Disponível em: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/webappcontent/HydroSHEDS_TechDoc_v10.pdf>.

MARENGO, J. A. *et al.* Extreme climatic events in the Amazon basin Climatological and Hydrological context of recent floods. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, Austria, v. 107, n. 1-2, p. 73–85, 2012.

NEW, M. *et al.* A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, Olendorf Luhe, Germany, v. 21, n. 1, p. 1–25, 2002.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. **Journal of Climate**, Boston, USA, v. 13, n. 13, p. 2217–2238, 2000.

MCDONALD, R. I.; GIRVETZ, E. H. Two challenges for U.S. irrigation due to climate change: increasing irrigated area in wet states and increasing irrigation rates in dry states. **Plos One**, San Francisco, USA, v. 8, n. 6, p. 1–10, 2013.

NÓBREGA, M. T. *et al.* Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology Earth System Sciences**, Gottingen, Germany, v. 15, n. 2, p. 585-95, 2011.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)–Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo do GT2. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. 28 p.

PORTMANN, F. T. *et al.* Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. **Environmental Research Letters**, Bristol, England, v. 8, n. 2, 2013.

RAWLS, W. J. *et al.* Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill Inc., 1993.

RIBEIRO NETO, A. *et al.* Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate-induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin – Brazil. **Hydrology Earth System Sciences**, Gottingen, Germany, v. 18, n. 9, p. 3449-3459, 2014.

RIBEIRO NETO, A. *et al.* Simulação na bacia Amazônica com dados limitados: rio Madeira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 47-58, 2008.

SILVA, B. C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 220 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos)–Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, Dordrecht, Netherlands, v. 129, n. 1-2, p. 117-129, 2015.

TOMASELLA, J. *et al.* The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: floodplain hydrology and its potential ecological and human impacts. **Climatic Change**, Dordrecht, Netherlands, v. 116, n. 3-4, p. 723-746, 2013.

Agradecimentos

Este estudo teve o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Anexo A

Indicadores de impacto

Tabela A.1 – Cenário RCP 4.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2011–2040

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-580,3	1,017	55,019	50,684	1,532
2	-167,8	0,947	24,055	28,498	1,133
3	-147,2	0,859	11,272	11,275	1,411
4	-55,1	0,869	15,577	16,360	1,086
5	-163,1	0,815	14,467	17,481	1,277
6	-209,9	1,004	10,919	10,294	1,415
7	-148,0	1,119	8,690	12,055	1,458
8	-167,4	1,318	13,865	14,841	1,119
9	-88,2	1,071	12,153	13,630	1,199
10	-157,3	0,894	8,663	19,566	1,229
11	-304,2	0,724	15,223	14,317	1,463
12	-136,8	0,858	7,325	5,201	1,658
13	-54,7	0,783	5,512	4,754	1,333
14	-163,8	0,563	3,533	2,361	2,120
15	-5,0	0,850	2,626	2,512	1,250
16	2,5	1,070	2,844	2,933	0,930
17	-41,4	0,796	4,828	3,342	1,385
18	-42,1	0,859	3,367	3,042	1,587
19	-119,2	0,857	14,133	20,107	1,614
20	89,3	0,845	6,346	12,437	1,155
21	195,8	0,770	15,960	29,221	1,041
22	-82,4	1,138	7,183	14,622	1,280
23	-40,7	1,048	5,583	9,004	1,200

Tabela A.2 – Cenário RCP 4.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2041–2070

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-666,36	0,963	55,019	49,003	1,752
2	-231,12	0,921	24,055	27,552	1,257
3	-170,64	0,848	11,272	11,014	1,497
4	-96,84	0,848	15,577	15,838	1,168
5	-190,08	0,801	14,467	17,087	1,347
6	-258,84	0,980	10,919	9,699	1,539
7	-167,76	1,100	8,690	11,619	1,553
8	-219,6	1,270	13,865	14,274	1,226
9	-148,32	1,042	12,153	13,231	1,296
10	-204,48	0,868	8,663	18,996	1,311
11	-363,6	0,698	15,223	13,747	1,626
12	-145,44	0,856	7,325	5,073	1,715
13	-55,44	0,779	5,512	4,738	1,347
14	-192,24	0,517	3,533	2,047	2,684
15	-6,48	0,836	2,626	2,503	1,304
16	-4,32	1,034	2,844	2,804	1,026
17	-40,68	0,781	4,828	3,363	1,440
18	-47,16	0,861	3,367	2,939	1,724
19	-122,76	0,859	14,133	19,736	1,651
20	73,44	0,835	6,346	12,323	1,205
21	188,64	0,764	15,960	29,322	1,066
22	-82,08	1,132	7,183	14,596	1,280
23	-43,56	1,051	5,583	8,892	1,200

Tabela A.3 – Cenário RCP 4.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2071–2099

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-692,3	0,943	55,019	56,291	1,983
2	-302,8	0,985	24,055	24,447	1,510
3	-247,0	0,885	11,272	12,309	1,821
4	-192,2	0,992	15,577	14,158	1,303
5	-225,4	0,848	14,467	17,875	1,459
6	-320,8	0,848	10,919	8,802	1,640
7	-176,4	1,389	8,690	11,752	1,577
8	-186,5	1,101	13,865	14,243	1,325
9	-180,7	1,163	12,153	12,747	1,374
10	-279,7	1,082	8,663	9,766	1,385
11	-452,5	0,695	15,223	16,805	1,911
12	-180,7	0,955	7,325	5,149	1,976
13	-87,1	1,025	5,512	4,939	1,561
14	-237,6	0,609	3,533	1,716	4,000
15	-24,8	0,816	2,626	1,896	1,667
16	-29,9	0,816	2,844	2,279	1,600
17	-56,5	0,940	4,828	5,411	1,756
18	-60,8	0,855	3,367	2,347	2,273
19	-128,9	0,723	14,133	21,360	1,821
20	49,0	1,092	6,346	8,996	1,127
21	164,2	1,126	15,960	20,915	0,967
22	-88,9	0,922	7,183	13,791	1,164
23	-37,4	1,010	5,583	10,024	1,099

Tabela A.4 – Cenário RCP 8.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2011–2040

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-421,2	0,863	55,019	55,440	1,655
2	-231,1	0,879	24,055	30,518	1,510
3	-291,6	0,770	11,272	9,048	1,603
4	-186,5	0,848	15,577	15,113	1,473
5	-292,3	0,663	14,467	13,032	1,389
6	-166,7	0,795	10,919	10,376	1,585
7	-205,9	0,913	8,690	7,381	1,652
8	-87,1	0,904	13,865	14,863	1,357
9	-110,2	0,926	12,153	11,591	1,023
10	-94,7	0,743	8,663	9,011	1,296
11	-400,3	0,638	15,223	14,816	1,810
12	-205,2	0,881	7,325	3,430	1,900
13	-125,3	0,943	5,512	2,808	1,753
14	-226,1	0,355	3,533	1,715	3,786
15	-37,8	1,126	2,626	1,082	1,765
16	29,2	1,482	2,844	4,794	0,784
17	-72,4	1,050	4,828	2,396	1,565
18	-57,6	1,000	3,367	2,415	1,852
19	-159,5	0,815	14,133	24,159	1,919
20	-53,6	0,835	6,346	7,862	1,563
21	-32,8	0,821	15,960	25,817	1,250
22	-149,8	0,775	7,183	7,020	1,920
23	-69,1	0,798	5,583	4,574	1,625

Tabela A.5 – Cenário RCP 8.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2041–2070

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-599,8	0,979	55,019	44,664	2,017
2	-296,6	0,904	24,055	26,382	1,730
3	-312,8	0,753	11,272	9,251	1,967
4	-186,1	0,727	15,577	15,085	1,604
5	-306,4	0,855	14,467	11,857	1,472
6	-231,5	0,749	10,919	9,890	1,711
7	-221,4	1,459	8,690	7,172	1,679
8	-182,5	1,062	13,865	14,095	1,416
9	-102,6	1,250	12,153	11,363	1,138
10	-77,0	1,199	8,663	8,326	1,102
11	-502,6	0,564	15,223	12,960	2,287
12	-222,5	1,244	7,325	3,216	2,076
13	-124,9	1,404	5,512	3,813	1,707
14	-261,4	0,598	3,533	0,883	6,625
15	-37,8	1,079	2,626	1,681	1,875
16	-12,6	1,028	2,844	3,016	1,333
17	-73,4	1,521	4,828	2,609	1,674
18	-64,8	1,172	3,367	2,244	2,083
19	-151,2	1,095	14,133	14,557	1,732
20	43,6	1,253	6,346	9,569	1,142
21	68,4	0,938	15,960	21,014	1,060
22	-124,2	1,141	7,183	7,322	1,433
23	-61,2	1,122	5,583	4,560	1,500

Tabela A.6 – Cenário RCP 8.5 do modelo HadGEM2-ES e horizonte 2071–2099

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-955,4	1,171	55,019	46,174	2,835
2	-558,4	1,101	24,055	27,213	2,697
3	-504,0	0,932	11,272	8,264	3,391
4	-463,7	0,833	15,577	12,980	3,028
5	-570,6	0,778	14,467	8,361	2,972
6	-580,7	0,992	10,919	6,362	3,762
7	-332,6	1,500	8,690	4,958	2,512
8	-496,8	0,848	13,865	12,508	2,857
9	-517,0	0,652	12,153	11,272	2,407
10	-410,4	1,060	8,663	7,170	1,668
11	-771,1	0,655	15,223	16,140	3,749
12	-284,0	1,107	7,325	3,052	3,250
13	-154,4	1,150	5,512	2,757	2,370
14	-292,0	0,224	3,533	0,973	17,667
15	-46,8	0,715	2,626	1,178	2,727
16	-26,6	0,833	2,844	2,821	2,000
17	-88,2	1,080	4,828	2,050	2,118
18	-77,0	0,914	3,367	2,128	2,703
19	-185,4	0,938	14,133	15,736	2,219
20	51,5	0,977	6,346	9,914	1,337
21	159,5	0,807	15,960	24,499	1,063
22	-167,4	0,964	7,183	9,124	1,979
23	-81,7	1,023	5,583	3,606	1,857

Tabela A.7 – Cenário RCP 8.5 do modelo MIROC5 e horizonte 2011–2040

Região	Anom_Qm (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-390,9	0,685	24,623	18,712	1,271
2	-312,4	0,660	17,894	13,335	1,459
3	-297,8	0,526	10,638	10,407	2,071
4	-339,1	0,561	14,002	10,800	1,842
5	-273,0	0,512	14,042	13,218	1,597
6	-256,2	0,531	11,027	9,387	1,743
7	-177,4	0,441	8,235	6,898	1,516
8	-203,3	0,463	12,437	13,054	1,570
9	-241,3	0,661	10,399	10,165	1,395
10	-168,6	0,521	8,283	7,615	1,623
11	-432,5	0,518	14,027	10,457	1,602
12	-216,8	0,395	5,829	4,890	2,645
13	-124,8	0,559	5,350	4,061	2,140
14	-186,5	0,508	4,592	3,030	2,194
15	-28,1	0,713	3,763	3,057	1,700
16	-11,3	0,864	2,527	1,944	0,915
17	-51,5	0,527	2,273	2,380	1,846
18	-20,4	0,723	2,193	2,319	1,507
19	-104,0	0,633	9,918	11,857	2,051
20	145,6	0,979	9,040	9,208	0,725
21	278,1	1,195	28,699	28,023	0,607
22	-21,2	0,586	6,375	7,066	1,016
23	-23,0	0,648	4,652	4,423	1,074

Tabela A.8 – Cenário RCP 8.5 do modelo MIROC5 e horizonte 2041–2070

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-385,1	0,795	24,623	19,000	1,455
2	-286,5	0,825	17,894	13,288	1,538
3	-304,4	0,749	10,638	9,779	2,012
4	-330,7	0,753	14,002	9,648	1,870
5	-270,1	0,659	14,042	12,959	1,597
6	-246,7	0,651	11,027	9,110	1,759
7	-139,8	0,558	8,235	7,344	1,475
8	-170,1	0,589	12,437	13,994	1,498
9	-224,1	0,743	10,399	10,319	1,326
10	-100,0	0,638	8,283	8,176	1,458
11	-405,5	0,675	14,027	11,086	1,694
12	-238,7	0,595	5,829	4,148	2,454
13	-149,7	0,824	5,350	2,952	2,073
14	-202,9	0,846	4,592	2,069	1,959
15	-41,2	1,309	3,763	1,392	1,619
16	-34,7	0,963	2,527	1,640	1,303
17	-57,3	0,897	2,273	2,413	1,791
18	-41,6	0,878	2,193	2,104	1,618
19	-57,7	0,792	9,918	16,918	1,571
20	197,8	0,916	9,040	10,007	0,706
21	244,9	1,327	28,699	28,123	0,638
22	35,8	0,769	6,375	9,127	0,925
23	-15,0	0,684	4,652	5,338	1,109

Tabela A.9 – Cenário RCP 8.5 do modelo MIROC5 e horizonte 2071–2099

Região	Anom_Q _m (mm)	CVbase/ CVcen	Q_tr20_base (mm/dia)	Q_tr20_cen (mm/dia)	Q _{95-base} / Q _{95-cen}
1	-490,9	0,668	24,623	19,049	1,558
2	-421,9	0,638	17,894	13,126	1,792
3	-405,9	0,630	10,638	9,075	2,829
4	-469,4	0,687	14,002	7,694	2,426
5	-384,3	0,569	14,042	12,762	2,043
6	-367,2	0,632	11,027	8,000	2,304
7	-244,2	0,593	8,235	5,702	1,772
8	-292,4	0,507	12,437	13,390	1,985
9	-308,1	0,837	10,399	10,618	1,588
10	-147,5	0,724	8,283	8,160	1,613
11	-524,5	0,554	14,027	10,701	2,038
12	-299,3	0,563	5,829	3,258	3,486
13	-179,2	0,851	5,350	2,583	2,843
14	-251,5	0,824	4,592	1,792	2,963
15	-47,1	0,845	3,763	1,467	2,429
16	-44,2	0,971	2,527	1,639	1,593
17	-73,7	0,709	2,273	1,722	2,500
18	-53,7	0,765	2,193	2,092	2,340
19	-114,6	0,604	9,918	11,398	2,373
20	312,1	1,107	9,040	12,523	0,555
21	444,2	1,394	28,699	34,959	0,495
22	76,3	0,759	6,375	8,279	0,755
23	-16,1	0,820	4,652	4,053	1,052



Vulnerabilidade do setor de energias renováveis no Brasil às mudanças climáticas

Antonio Carlos da Silva Oscar Junior

Instituto de Geociências/Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Vera Jane Ruffato Pereira Ferreira

Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (Ivig)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Wanderson Luiz Silva

Departamento de Meteorologia/ Instituto de Geociências (Igeo)/Centro de Ciências da Matemática e da Natureza (CCMN)/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Renata da Costa Barreto

Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (Ivig)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Resumo

O presente capítulo torna pública a metodologia e sintetiza os resultados obtidos na elaboração da Terceira Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) sobre a avaliação da vulnerabilidade das energias renováveis ao impacto das mudanças climáticas. Foram utilizados dados do clima futuro produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para as janelas temporais de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100. Tratam-se das variáveis saídas do modelo regional Eta 20 km rodados com o modelo global HadGEM2-ES do IPCC AR5 para os cenários RCP4.5 e 8.5 e MIROC5, cenário RCP 8.5. A partir desses dados e por meio de indicadores, foi possível a geração de previsões que subsidiassem a avaliação dos impactos dos cenários de clima futuro sobre a infraestrutura energética atual, permitindo a proposição de recomendações para mitigação e adaptação do setor, item estratégico para programa de Estado brasileiro.

Palavras-chave: Hidroeletricidade. Energia Eólica. Biocombustíveis. Energia Solar. Modelagem Climática.

1 Introdução

Diante do atual cenário energético brasileiro e da crise hídrica que acomete as regiões Sul e Sudeste do país, discutir o planejamento desse setor nunca foi tão prementório para a segurança energética nacional, garantindo a manutenção do desenvolvimento sustentável por meio do embasamento do planejamento de programas de Estado.

A matriz energética brasileira é baseada principalmente na hidroeletricidade e sua diversificação, mediante a crise supracitada, é fundamental para a garantia da segurança energética. Desse modo, este trabalho dá ênfase a outras matrizes energéticas limpas e renováveis e suas prospecções futuras.

Tratando-se de um estudo com ênfase em um planejamento de longo prazo, faz-se necessário considerar os efeitos das mudanças climáticas que afetarão significativamente a distribuição geográfica e o potencial de geração energética no território nacional. A ênfase em energias limpas também é merecedora de atenção, haja visto a preocupação global com a diminuição da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) e os compromissos internacionais assumidos pelos países membros do *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

Segundo os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), desde a Revolução Industrial, pode-se observar significativa concentração de GEEs na atmosfera, sobretudo o CO₂. Quantitativamente, estima-se um aumento de 280 partes por milhão (ppm) do período de 1000 a 1750 para 368 ppm para o ano de 2000, refletindo em um aumento médio da temperatura terrestre na ordem de aproximadamente 0,2°C a 0,6°C.

Diversos estudos apontam que essa tendência crescente do aumento dos GEEs foi impulsionada pelas significativas alterações na forma de produção, a qual passou a preconizar a queima de combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão, gás natural) e acelerou o processo de alteração de uso da terra (desmatamento, agricultura, urbanização). Em 2012, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 429 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂-eq), sendo a maior parte (209,3 MtCO₂-eq) gerada no setor de transportes.

Surge então uma preocupação iminente, documentada desde o relatório divulgado pelo IPCC em 2007, apontando para a necessidade de se estabelecer medidas para adaptação dos setores da sociedade aos impactos possíveis do clima futuro, bem como medidas de mitigação para redução da emissão desses gases.

Como a produção e consumo de energia é primordial para o desenvolvimento socioeconômico, bem como na emissão (ou não) de GEEs, compreender como a infraestrutura de geração de energia responderá aos impactos das alterações do clima é fundamental. A partir deste conhecimento é possível dimensionar a vulnerabilidade de uma nação, por meio de seus setores, às mudanças climáticas e promover alternativas de desenvolvimento, oferecendo perspectivas adequadas para o futuro com o foco na sustentabilidade.

No caso brasileiro, devido às suas características climáticas, associadas às proporções continentais de seu território, tem-se favorecida a constituição de uma matriz energética pautada essencialmente em energias renováveis. Segundo dados do Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2011), em 1970, duas fontes de energia –petróleo e lenha –respondiam por 78% do consumo; em 2000, já eram três as fontes responsáveis por 74% do consumo (somando a energia hidráulica às fontes anteriores); para 2030 a empresa projeta quatro fontes energéticas, abrangendo 77% do consumo (associando também os biocombustíveis). Em 2030, espera-se que 45% de toda a energia consumida no país seja de origem renovável.

A composição da matriz energética brasileira atual e aquela projetada, apesar de benéfica para a redução de GEEs na atmosfera terrestre, também é fortemente dependente das condições climáticas, o que pode significar impactos substanciais para a economia e desenvolvimento social do país. Nesse sentido, antecipar situações de crise, por meio da análise da vulnerabilidade do setor de geração de energias renováveis é fundamental para mitigar, adaptar e orientar formas (e áreas) para geração energética.

Para a EPE (2011) haverá um aumento na demanda de energia no território brasileiro de 218,7 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2005 para 403 milhões de tep em 2030. Esse aumento de demanda deverá ser ofertado em grande parte por fontes renováveis.

Nesse contexto, foram priorizadas no escopo deste trabalho as energias eólica, solar e biocombustíveis, por serem consideradas energias limpas e renováveis, além de estarem em crescente representatividade na matriz energética brasileira. Ademais, apesar das controvérsias quanto à classificação da energia hidrelétrica como limpa e das proporções dos seus impactos, esta não pode ser descartada devido a sua grande representatividade na matriz energética nacional, a qual corresponde a 11,5% de toda a oferta interna de energia do Brasil (EPE, 2011).

2 Metodologia

Para cumprir com os objetivos deste estudo, foram utilizados dados do clima futuro produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), nas janelas temporais de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100. Na análise das energias hidrelétrica e eólica, foram utilizadas saídas do modelo regional Eta 20 km rodados com o modelo global HadGEM2-ES do IPCC AR5 para os cenários RCP4.5 e 8.5. Concomitantemente, na análise das energias solar e biocombustíveis foram utilizadas saídas do modelo regional MIROC5, cenário RCP 8.5. A partir desses dados, foram criados indicadores que possibilitaram previsões que subsidiassem a avaliação dos impactos dos cenários de clima futuro sobre a infraestrutura energética atual. O detalhamento, por matriz energética, dos indicadores gerados encontra-se a seguir, para os quais se baseou na tecnologia atual disponível. Desse modo, a melhoria tecnológica, bem como incentivos à biotecnologia podem reverter os quadros aqui apresentados.

2.1 Energia hidrelétrica

No ciclo da água, ao precipitarem, as águas das chuvas podem ser evaporadas antes mesmo de tocarem o solo, principalmente se encontrarem copas de árvores em seu caminho. Da porção que chega ao solo, parte ainda evapora e parte se infiltra indo reabastecer as águas subterrâneas. A parte da água que não se infiltra escorre superficialmente no solo, sendo drenada para os corpos hídricos da bacia de drenagem. Essa água resulta na vazão dos rios que, entre outros usos, é utilizada para a geração elétrica por meio das usinas hidrelétricas.

O aproveitamento da energia hidráulica é realizado com a utilização de turbinas hidráulicas acopladas a geradores elétricos. As turbinas convertem energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica e os geradores produzem a eletricidade. A eficiência obtida na conversão chega a 90%, o que faz das turbinas hidráulicas, atualmente, a forma mais eficiente de conversão de energia primária em secundária. Por fim, o vertedouro tem a função de regular o nível do reservatório, de acordo com o excesso de vazão ou de chuva (ANEEL, 2008).

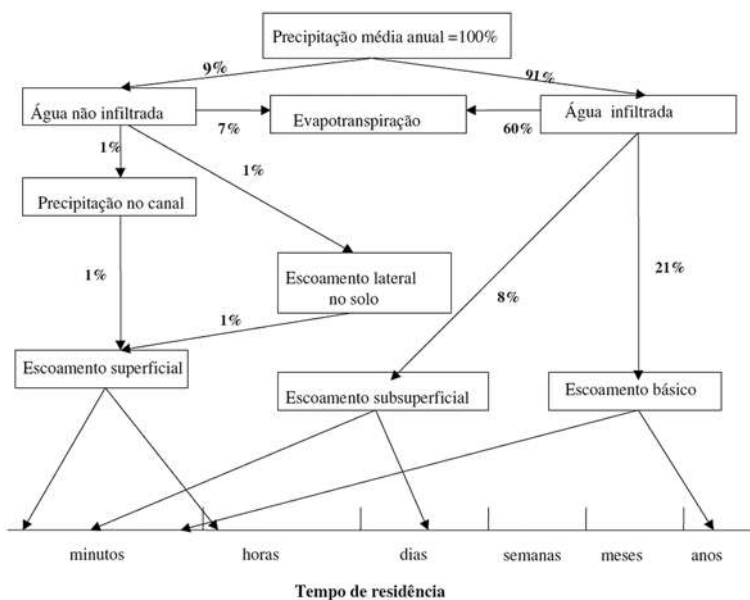
Segundo Soares (2004), ao destrincharmos do ciclo da água, temos dois conjuntos de fatores que intervêm na quantidade de água em cada uma das componentes desse fluxo dentro de uma bacia hidrográfica: fatores físicos (morfologia e propriedades físicas dos solos) e meteorológicos (total de chuva por evento, intensidade de chuva (cm/hr)), duração da chuva (horas, dias, semanas), distribuição da chuva na bacia e temperatura (regiões de alta latitude).

Para exemplificar, Soares (2014) montou o esquema da figura 1, baseado em uma bacia hidrográfica no leste dos Estados Unidos da América (EUA), em que mostra todo o percurso da água precipitada. Conforme pode ser analisado, toda a água precipitada, com exceção da que retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração, acaba em algum período (em dias, meses ou anos) vindo a contribuir para a vazão dos rios.

Nesse contexto, serão utilizadas para avaliar a vulnerabilidade do setor hidrelétrico brasileiro frente às mudanças climáticas globais índices e indicadores que visam prever a variação das vazões das bacias hidrográficas brasileiras em relação à precipitação (PREC) e as taxas de evapotranspiração estimadas, a partir do fluxo de calor latente (CLSF), sendo eles: índice de evapotranspiração acoplado ao índice de balanço hídrico.

O índice de evapotranspiração se baseia no preceito de que a mudança do estado físico da água de líquido para vapor demanda de um consumo energético da ordem de 590 cal/g. É, nesse contexto, que se pode estimar a transformação de fluxo de calor latente em evapotranspiração (SOUZA, 2004). Para tal, serão utilizados os seguintes fatores de conversão: $1 \text{ W/m}^2 = 0.0864 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$; e, $1 \text{ mm/dia} = 2.45 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$ (FAO, 1998).

Figura 1 – Esquema do percurso da água precipitada



Fonte: Soares (2014)

O cálculo do índice de balanço hídrico será utilizado para correlacionar a precipitação com a evapotranspiração e assim poder avaliar a tendência ao aumento ou à redução da disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas brasileiras e, conseqüentemente, sobre a produção hidrelétrica.

A equação para o cálculo do índice de balanço hídrico (BH) é:

$$BH = PREC - EVAP,$$

em que:

BH = balanço hídrico (mm/dia);

PREC = média diária de precipitação em um período de 30 anos (mm/dia);

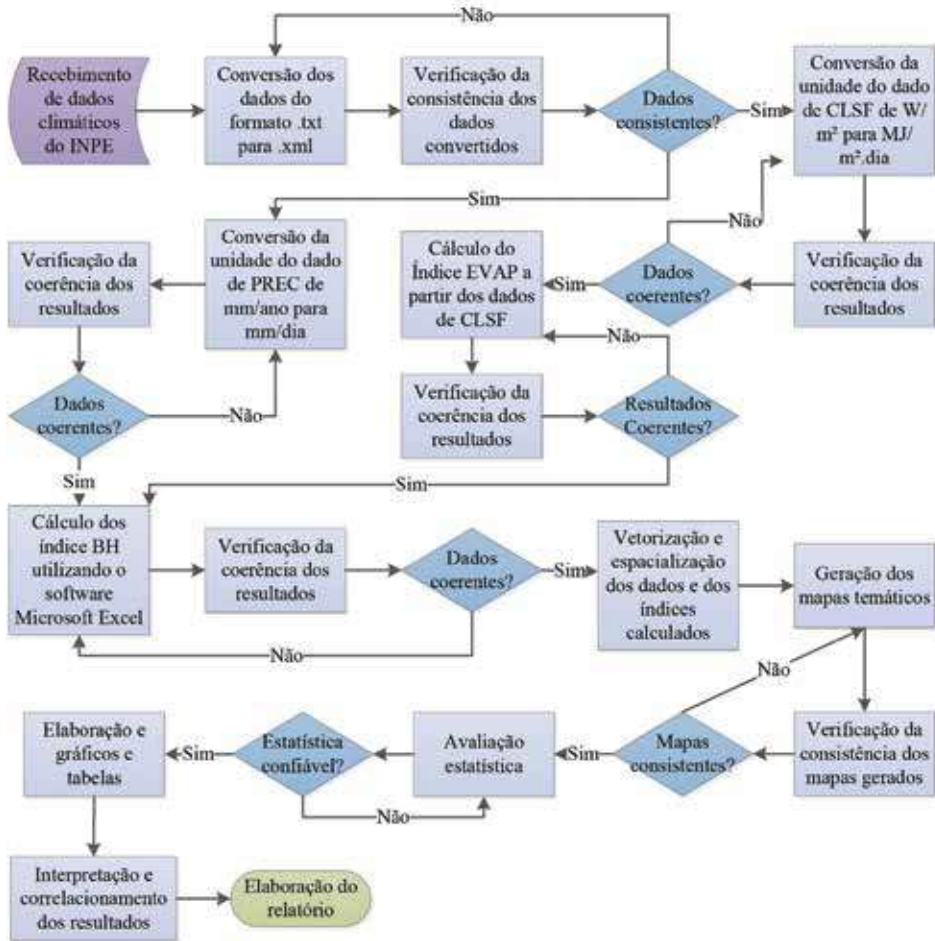
EVAP = índice de evapotranspiração (mm/dia).

Os índices de BH serão apresentados em mapas elaborados por meio de interpolação elaborada com o *software* de geoprocessamento, cuja metodologia será apresentada adiante. Os mapas indicarão a variação positiva ou negativa do índice (tornando a região mais úmida ou mais seca) dividido por bacia hidrográfica. Para tal, foi utilizada a divisão de bacias hidrográficas segundo o antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (Dnaee) (ANEEL, 2008). A razão do balanço hídrico é diretamente proporcional à vazão dos rios, o que reflete diretamente no potencial hidrelétrico da região conforme supracitado.

Para avaliação dos resultados obtidos, foram criadas tabelas específicas para cada bacia hidrográfica e cada cenário (RCP 4.5 e 8.5), com os dados do período histórico e os dados dos três períodos subsequentes.

A figura 2 apresenta a síntese de toda a metodologia de cálculo dos índices e indicadores para a avaliação da vulnerabilidade hidroeletricidade às mudanças climáticas.

Figura 2 – Síntese de toda a metodologia de cálculo dos índices e indicadores para a avaliação da vulnerabilidade hidroeletricidade às mudanças climáticas



2.2 Energia eólica

A geração de energia por meio do vento depende de turbinas que transformam o movimento em eletricidade. Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa por meio da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica (AMARANTE *et al.*, 2001). Assim, a produção de energia

eólica está vinculada ao comportamento dos ventos, sendo a intensidade da velocidade e direção seus principais determinantes.

O relevo, a rugosidade do solo e outros obstáculos distribuídos ao longo da superfície podem alterar a intensidade da velocidade do vento, tornando-se outra variável de grande importância. Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m², na altura de instalação das turbinas, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB *et al.*, 1993 *apud* ANEEL, 2008). Já para Schaeffer *et al.* (2008), a velocidade mínima considerável para o aproveitamento eólico é de 6 m/s e valores acima de 8,5 m/s são consideradas altas velocidades.

Nesse contexto, serão utilizados índices e indicadores que visam prever a variação das velocidades do vento em todo o território nacional para avaliar a vulnerabilidade do setor eólico brasileiro frente às mudanças climáticas globais, sendo eles: índice de velocidade total média dos ventos; e indicador de tendência da intensidade dos ventos por estação do ano.

A velocidade total do vento consiste em uma composição vetorial dada pelos seus componentes zonal e meridional. Será utilizada a velocidade do vento a 100 metros de altitude devido à tendência de altura de instalação das novas turbinas eólicas entre 80 m e 100 m. O índice será calculado por meio da seguinte fórmula:

$$|\vec{v}| = \sqrt{U100^2 + V100^2},$$

em que:

U100 = vento zonal à 100m de altitude;

V100 = vento meridional à 100m de altitude.

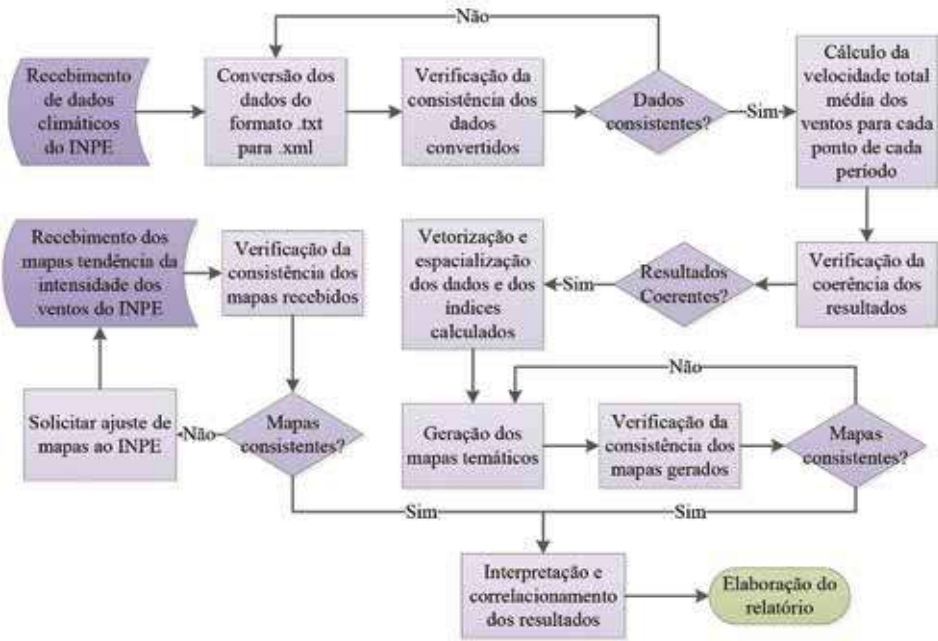
É importante considerar que a progressão e a velocidade dos ventos são influenciadas pelas irregularidades do terreno, características de seu relevo e padrão de vegetação (SCHAEFFER *et al.*, 2008). Apesar da importância do impacto

da vegetação sobre as projeções climáticas da velocidade dos ventos, não foi possível considerar nenhuma projeção de vegetação baseada nas projeções climáticas do modelo utilizado. Assim, esta variável não será inserida neste estudo, que terá a avaliação simplificada da velocidade total dos ventos. A influência da vegetação na velocidade dos ventos deve ser incluída em análises futuras.

Os índices de velocidade total dos ventos serão apresentados por meio de mapas elaborados por interpolação, com *software* de geoprocessamento, cuja metodologia está apresentada detalhadamente adiante. As classes de velocidade do vento foram divididas de forma a proporcionar a análise da variação das áreas com intensidades diferentes de ventos em classes relacionadas a maior ou menor produtividade eólica sendo elas: $< 3 \text{ m s}^{-1}$, $3\text{--}4 \text{ m s}^{-1}$, $4\text{--}5 \text{ m s}^{-1}$, $5\text{--}6 \text{ m s}^{-1}$, $6\text{--}7 \text{ m s}^{-1}$, $7\text{--}8 \text{ m s}^{-1}$ e $> 8 \text{ m s}^{-1}$.

Por fim, o indicador de tendência da intensidade dos ventos por estação do ano já foi fornecido pelo próprio INPE por meio de mapas de variação da velocidade dos ventos dos períodos 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100 em comparação ao período histórico (1961–1990). Tal informação foi produzida automaticamente pelo modelo, considerando médias de 30 anos para cada estação do ano, possibilitando assim uma análise sazonal das tendências. A figura 3 sintetiza toda a metodologia de cálculo dos índices e indicadores para a avaliação da vulnerabilidade da energia eólica às mudanças climáticas.

Figura 3 – Fluxograma metodológico sintético – Energia eólica



2.3 Energia solar

Por sua localização intertropical, o território brasileiro possui alta incidência de radiação solar ao longo do ano, tornando esta uma fonte potencial para a prospecção de energia com vista ao suprimento da demanda crescente de energia no país (PEREIRA *et al.*, 2006).

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do país se concentra em regiões mais distantes do Equador. Em Porto Alegre, capital brasileira mais meridional (cerca de 30°S), a duração solar do dia varia de 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, aproximadamente, entre 21 de junho e 22 de dezembro, respectivamente. A região Nordeste, por exemplo, segundo Porfírio (2012), apresenta insolação média entre 7 e 8 horas, e algumas

áreas com valores elevados de irradiação solar global diária e uma média anual comparáveis com as regiões desérticas de alto potencial solar.

Partindo do princípio de que o aproveitamento da energia solar depende da radiação solar incidente em uma dada área, um método eficiente de análise do panorama da oferta dessa fonte é o balanço de radiação em uma determinada região, que pode ser determinado pelo cálculo do saldo de radiação.

O saldo de radiação (R_n) representa a energia disponível no sistema terra-atmosfera, sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (KLEIN *et al.*, 1977; WELIGEPOLAGE, 2005). Tal balanço é definido pela equação a seguir:

$$R_n = BOC + BOL = Q_g - \alpha Q_g + Q_{atm} - Q_{sup}[W/m^2],$$

em que:

R_n = saldo de radiação na superfície;

BOC =balanço de ondas curtas (radiação solar);

BOL =balanço de ondas longas (radiação terrestre);

Q_g =radiação solar na superfície;

α = albedo;

Q_{atm} =radiação emitida pela atmosfera;

Q_{sup} =radiação emitida pela superfície.

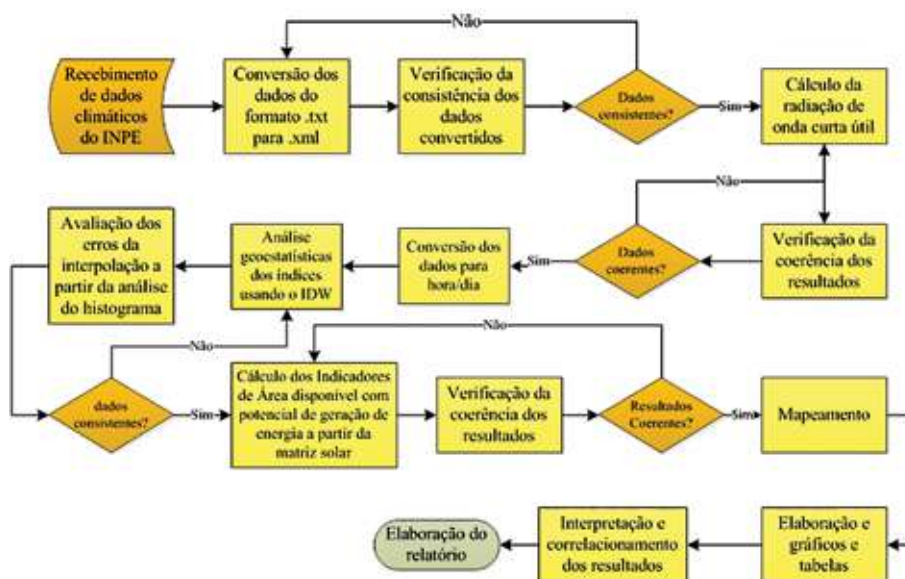
A partir dessa equação, é possível destacar a importância do componente de onda curta (radiação solar) para avaliar a disponibilidade de radiação conversível em energia, uma vez que esta é a radiação com significativa serventia para os equipamentos de energia solar. Para definição desse indicador de radiação útil (R_u), é necessário o equacionamento das variáveis: radiação de onda curta incidente à superfície (O_{cis}), albedo (α), radiação de onda curta emergente no topo da atmosfera (R_{oce}) e radiação de onda curta emergente à superfície (O_{ces}). Portanto,

$$R_u = O_{cis} + R_{oce} - \alpha O_{cis} - O_{ces}[W/m^2]$$

O albedo (fração da radiação incidente que é refletida) considerado foi o valor médio do planeta, ou seja, 0,30 ou 30%. Foram calculados os valores históricos (1961–1990) e os valores futuros projetados (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100). Em seguida, as diferenças futuro–presente foram computadas com o objetivo de se verificar as simulações das tendências futuras dessa radiação útil. Os mapas apresentam os valores médios anuais do indicador para um determinado dia do ano no Brasil, ou seja, Ru é multiplicada por 24 horas, tendo-se como unidade final $W.h/m^2.dia$.

Os equipamentos responsáveis pelo tratamento da energia solar podem ser significativamente influenciados por variações na temperatura ambiente. Dessa maneira, também se realiza a análise das projeções futuras de aumento ou de diminuição da temperatura do ar (TP2M) ao longo do século XXI no Brasil. A figura 4 resume os procedimentos metodológicos para estimativa da vulnerabilidade da matriz de energia solar em território brasileiro.

Figura 4 – Fluxograma metodológico para avaliação da vulnerabilidade do setor de energias renováveis – Matriz solar



2.4 Biocombustíveis (bioetanol)

Para um uso adequado da terra com finalidade de exploração do potencial agrícola, além dos fatores de ordem econômica e social, deve-se ter em conta fatores ambientais básicos tendo em vista as exigências físico-químicas de cada cultura, bem como as características ecológicas da região. Dentre as condições físico-ecológicas, o clima ocupa posição relevante, sobretudo, no que diz respeito à disponibilidade hídrica, o qual depende diretamente da disponibilidade de precipitação pluviométrica e da intensidade do processo de evapotranspiração, elementos que funcionam como limitadores ao desenvolvimento vegetal.

Segundo Gliessman (2001), nas situações em que as variações de disponibilidade hídrica excedem os níveis considerados limítrofes, as plantas sofrem prejuízos em seu crescimento e desenvolvimento. Em situações de déficit hídrico, ligados à falta de chuva e(ou) alta evapotranspiração, muitas plantas fecham seus estômatos ocasionando mudanças na taxa de fotossíntese e de transpiração, sendo muitas vezes danosos para o desenvolvimento da planta.

Além do componente hídrico, a fotossíntese é sensível à temperatura do ar de modo que a modificação desta variável meteorológica pode acarretar variações no metabolismo das plantas, alterando seu crescimento e seu desenvolvimento.

Partindo do pressuposto de que a disponibilidade hídrica é fundamental para a exploração agrícola dos gêneros utilizados para a produção de biocombustíveis, entre eles o bioetanol, utilizou-se o índice de aridez (D) proposto por Hare (1983). Para a determinação desse índice, aplicou-se o índice de umidade de Thorntwaite (IM) modificado algebricamente por Hare (1983), chegando, desta forma, à equação a seguir:

$$IM = 100 * \left(\frac{PRECP}{EVTP} - 1 \right),$$

em que:

$$D = \frac{1}{(0,01 * IM) + 1},$$

em que:

IM = índice de umidade;

PRECP = precipitação;

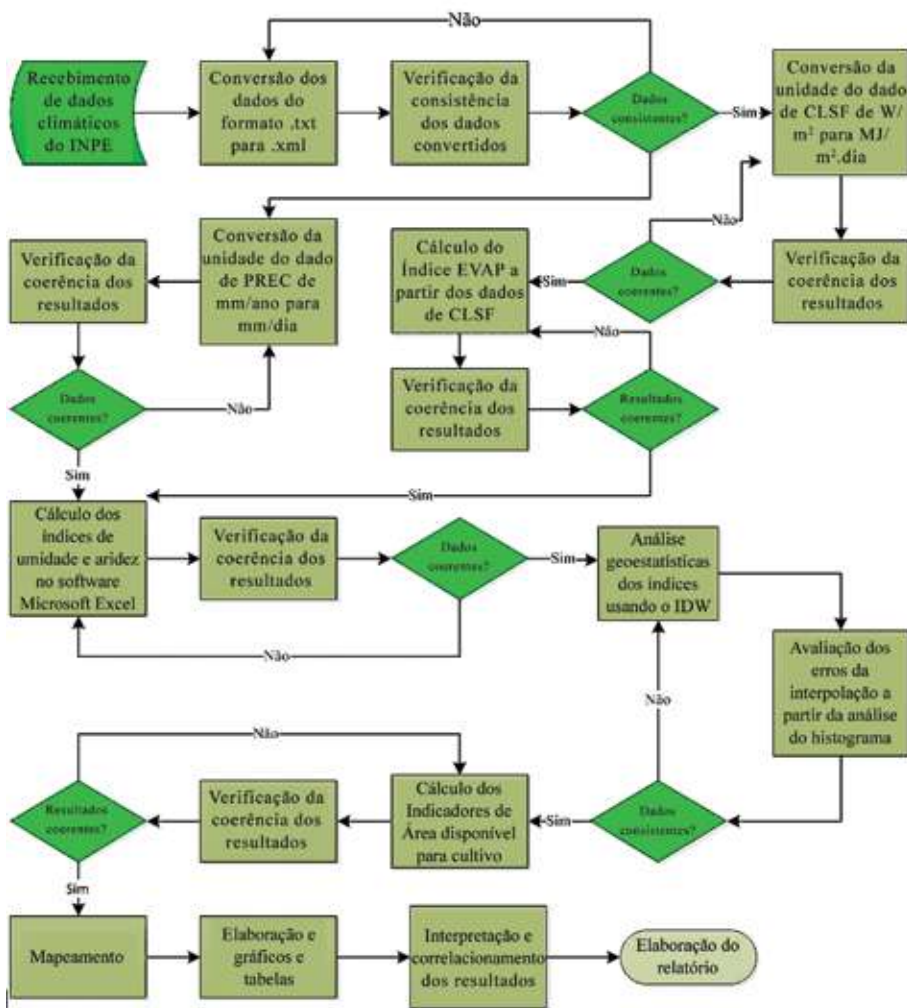
EVTP = evapotranspiração.

A partir dessa metodologia, Hare (1983) demonstrou que áreas de maior ocorrência do processo de desertificação, ou seja, aquelas com baixíssimo potencial agrícola, se encontram no intervalo entre $2 < D < 7$, este intervalo encontra-se próximo aos limites secos das zonas subúmidas e úmidas dos desertos. Já os desertos se encontram no intervalo próximo de $D \geq 10$. Essa etapa metodológica encontra-se discriminada na figura 5.

Para complementar essa metodologia, utilizou-se também como referência: dados de umidade no solo a 0,1m, cujo objetivo é corroborar a avaliação da disponibilidade hídrica para o sistema radicular das plantas e temperatura do ar, a partir do qual se propõe um índice baseado na variação da temperatura (temperatura projetada – temperatura histórica), permitindo estimar o estresse térmico a que se submeterá a planta nos cenários de mudanças climáticas, dado fundamental, uma vez que isto afeta diretamente a capacidade fotossintética dos vegetais.

Finalmente, para a avaliação da vulnerabilidade dos gêneros selecionados neste estudo (girassol, mamona, soja e cana-de-açúcar), confrontaram-se os resultados obtidos com os índices climáticos e os dados do Conselho Nacional de Abastecimento (Conab), ano base 2013-2014, permitindo chegar a um indicador de vulnerabilidade baseado na perda ou ganho de área para o cultivo da espécie em questão.

Figura 5 – Fluxograma metodológico para avaliação da vulnerabilidade do setor de energias renováveis – Matriz biocombustíveis/bioetanol



2.5 Pressupostos da análise estatística

Para a avaliação de significância nas tendências climáticas, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (SNEYERS, 1975). Esse teste considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). O teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries climatológicas (GOOSSENS; BERGER, 1986).

Uma das vantagens desse teste é o fato de ser um teste não paramétrico, ou seja, os dados não precisam pertencer a uma distribuição particular. Outra vantagem é que seu resultado é menos afetado por valores *outliers*, pois seu cálculo é baseado no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores da variável. As fórmulas para o cálculo do teste estatístico de Mann-Kendall são apresentadas nas equações a seguir.

$$Z = \frac{S + u}{[VAR(S)]^{1/2}}$$

onde:

$$u = -1 \text{ se } S > 0$$

$$u = 0 \text{ se } S = 0$$

$$u = +1 \text{ se } S < 0$$

Sendo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

onde:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

e

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Nas equações anteriores, x são as séries temporais, variando de k ($j = k + 1$) a n . O número de grupos de valores repetidos é dado por g e o número de valores repetidos em cada grupo p (até g) é representado por t . A tendência é indicada pelo valor de Z , em que um Z positivo (negativo) significa uma tendência crescente (decrescente). Se a probabilidade p do teste de Mann-Kendall for menor que o nível de significância α , uma tendência estatisticamente significativa existe, enquanto que um valor de p maior que α , confirma uma tendência não significativa. Para amostras nas quais não há tendência, o valor de Z é próximo de zero e o valor de p é próximo de α .

A Curvatura de Sen é um método não paramétrico (assumindo uma tendência linear) utilizado para estimar a magnitude das tendências (SEN, 1968). Para o cálculo da Curvatura de Sen, expressa pelo valor de b na equação a seguir, computam-se todas as curvaturas de todos os pares de valores usando uma série temporal. Como a Curvatura de Sen é insensível a valores *outliers* e dados ausentes, tal teste é mais rigoroso que a usual curvatura de regressão e provê uma medida mais realística das tendências numa série temporal.

$$b = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_k}{j - i} \right), \forall j > i$$

2.5.1 Pressupostos do mapeamento

Para a consecução dos resultados propostos neste estudo, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento que, associando os princípios da geoestatística e da representação gráfica, favoreceram a apresentação de resultados consistentes.

Para a confecção dos mapas e elaboração dos índices climáticos e indicadores de vulnerabilidade, utilizou-se ambiente do Sistema de Informações Geográficas (SIG), o qual foi alimentado com os dados da modelagem climática, enviadas pelos consultores sediados no INPE, tanto do modelo Eta-HadGEM2-ES quanto do MIROC5. Esses dados estavam representados na forma de ponto de grade, para os quais se procedeu aos cálculos dos índices e indicadores para cada ponto de grade.

Os dados acima mencionados representavam observações pontuais que não supriam as necessidades metodológicas deste estudo, visto a necessidade de trabalhar com todo o território nacional e a modelagem ter uma resolução de 20 km. A partir dessa limitação, aplicou-se a técnica geoestatística da interpolação, cujo objetivo é a estimativa de valores de atributos em locais não amostrados, ou seja, converter informações pontuais em informação contínua, partindo da lógica espacial de que os valores de um atributo tendem a ser semelhantes em locais próximos, por comparação com locais afastados.

Sendo coerentes com o princípio da lógica espacial supracitado, optou-se pelo modelo estatístico denominado Inverso das Distâncias (IDW) para a interpolação dos dados pontuais. Esse interpolador baseia-se na dependência espacial, ou seja, supõe que, quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Dessa forma, atribui maior peso para as amostras mais próximas do que para as amostras mais distantes do ponto a ser interpolado. Assim, essa técnica multiplica os valores das amostras pelo inverso das suas respectivas distâncias ao ponto de referência para a interpolação dos valores conforme equação a seguir.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}$$

Em que:

z = valores estimados;

n = número de amostras;

z_i = valores conhecidos;

d_i = distâncias entre os valores conhecidos e estimados (z_i e z).

A equação estatística pode ser adaptada para incluir uma potência para as distâncias. Com isso, pode-se atribuir pesos diferentes para a estimativa do valor de uma amostra para uma mesma distância, dessa forma:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

A partir dessa equação, verifica-se a adição da potência p ao inverso das distâncias $1/d_i$. Com essa modificação na equação, pode-se atribuir diferentes valores a potência p , sendo que, quanto maior for o valor dessa potência, maior será a influência do vizinho mais próximo na estimativa dos valores.

Posteriormente, os resultados desse processo foram submetidos a uma estimativa do erro, incorporada ao resultado final, em queo dado interpolado, apresentados no formato de *grid*, foi corrigido por meio da técnica de análise dos histogramas, a qual permitiu a correlação dos valores interpolados com os dados originais, segundo metodologia recomendada por Isaaks e Srivastava (1989). Ainda com o uso dos recursos das ferramentas de geoprocessamento, os índices climáticos foram classificados de acordo com o referencial teórico-metodológico de cada matriz e esses *grids* foram reclassificados, convertidos para o formato vetorial e projetados cartograficamente, tornando viável a estimativa de área (em km²) sob influência de cada classe pré-definida.

3 Resultados e discussão

3.1 Energia hidrelétrica

Bacias hidrográficas, também chamadas de bacias de drenagem, são delimitadas pela topografia do terreno, ou seja, a formação destas se dá pelos desníveis dos terrenos que orientam os cursos de água para um rio principal e seus afluentes, sempre das áreas mais altas para as mais baixas.

O Brasil possui diversas divisões e classificações para suas bacias hidrográficas. Para este estudo, optou-se por utilizar a classificação do antigo Dnaee (atual Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)), que divide o país em oito grandes bacias hidrográficas (figura 6), a saber: Bacia Amazônica; Bacia do Atlântico Norte e Nordeste; Bacia do Tocantins-Araguaia; Bacia do Rio São Francisco; Bacia do Atlântico Leste; Bacia do Rio Paraná e Paraguai; Bacia do Atlântico Sul e Sudeste; e Bacia do Rio Uruguai.

Figura 6 – Divisão de bacias hidrográficas segundo o Dnaee



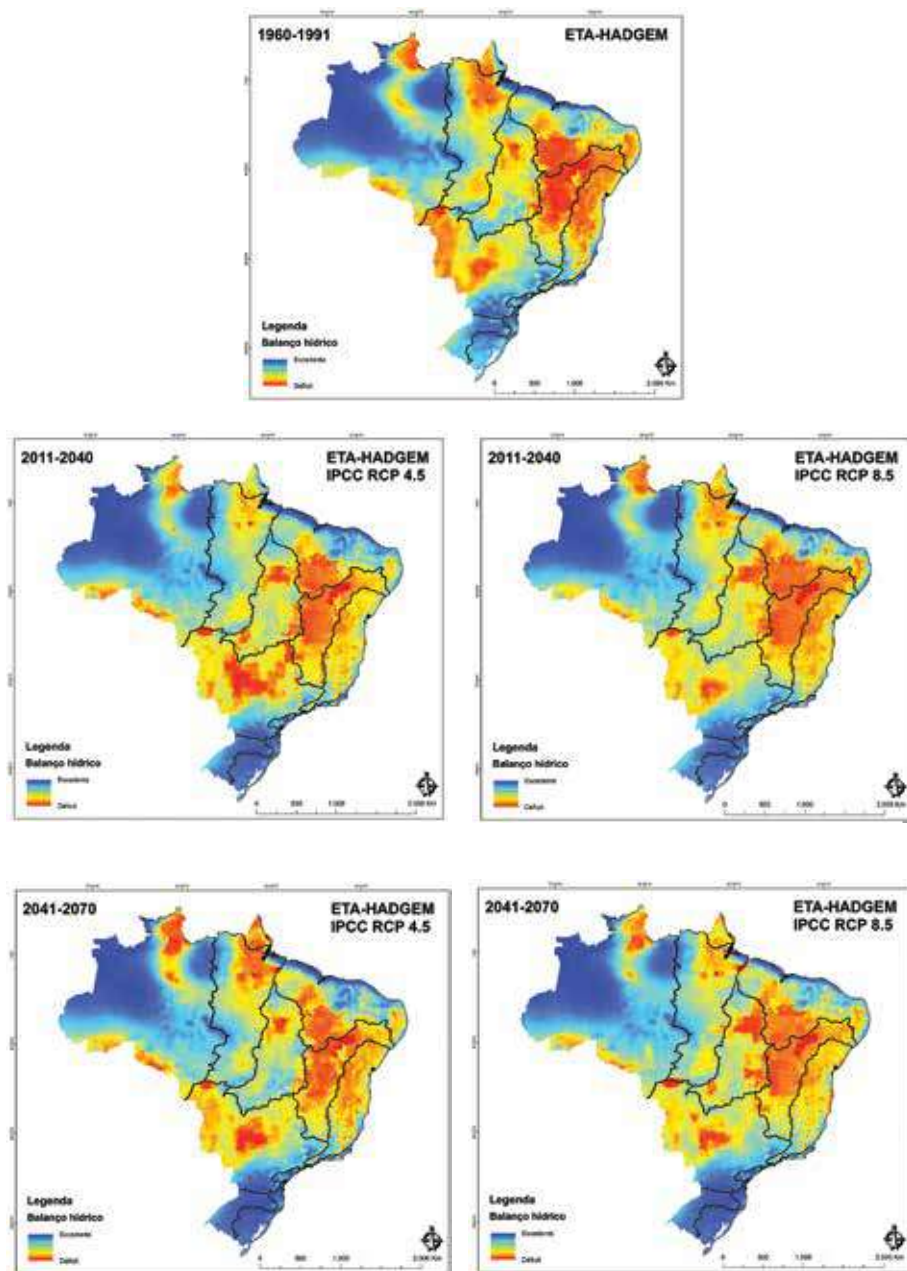
Fonte: Aneel (2008)

O resultado do índice de balanço hídrico calculado neste estudo é mostrado na figura 7, distribuído por todo o território nacional, por meio da técnica de mapeamento utilizada. São apresentados o período de tempo histórico, correspondente aos anos entre 1961 e 1990 e para os períodos de tempo futuros, separadas em três períodos de tempo, que são, respectivamente, 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100, calculados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, cenários RCP 4.5 e 8.5, otimista e mais pessimista.

De uma forma geral, pode-se observar uma tendência ao aumento das áreas com índices de BH negativos (déficit hídrico) e tendendo a zero em ambos os cenários. O aumento da área do déficit hídrico é maior no cenário mais pessimista. Somente nas bacias localizadas mais ao sul do Brasil, Paraná e Paraguai, Atlântico Sul e Sudeste e Uruguai, é que há a tendência do aumento do excedente hídrico para os períodos de tempo projetados.

Em termos de produção hidrelétrica, quanto maior o excedente hídrico, maior é o potencial de produção hidrelétrica da bacia. Assim, de uma forma geral, o índice de BH calculado por meio dos cenários de mudanças climáticas modelados pelo INPE evidencia uma tendência de redução do potencial de produção de energia hidrelétrica nas bacias ao norte e na região central do país e o aumento desse potencial nas bacias ao sul do país (figura 7).

Figura 7 – Distribuição do balanço hídrico no território nacional para o cenário histórico e para cenários futuros, usando o modelo Eta-HadGEM2-ES, cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



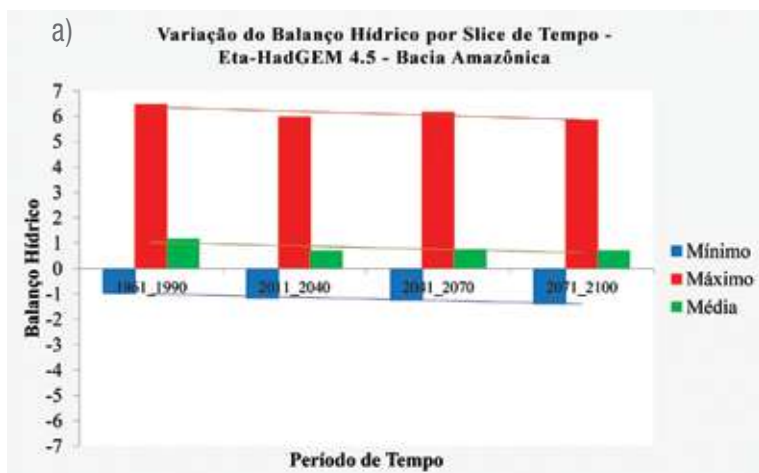


3.1.1 Bacia do Rio Amazonas

A Bacia do Rio Amazonas mostrou uma tendência de decréscimo do balanço hídrico médio em ambos os cenários, sendo mais evidente no cenário RCP 8.5 (figura 8 e tabela 1).

Ambos os cenários (RCP 4.5 e 8.5) mostraram uma tendência de aumento das áreas com balanço hídrico tendendo a zero ou negativo, sendo, no cenário RCP 8.5, essa tendência mais acentuada observada tanto no gráfico, quanto na curva de SEN (figura 11 e tabela 1). Os valores máximos possuem uma tendência de decréscimo enquanto os valores mínimos aumentaram (mais negativo, logo, maior déficit hídrico).

Figura 8 – Bacia do Rio Amazonas – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Contudo, a análise estatística feita para a tendência da média (tabela 1) apresentou uma alta significância apenas para o cenário RCP 8.5. Quanto à geração energética, pode-se dizer que há uma tendência de redução do potencial de produção hidrelétrica na bacia.

Tabela 1 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Rio Amazonas

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	-0,0927
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,0894
Curvatura de SEN	-0,247

3.1.2 Bacia do Atlântico Norte e Nordeste

O BH médio da Bacia do Atlântico Norte e Nordeste apresentou uma diminuição ao longo dos períodos futuros quando comparados ao presente. A diminuição da média para o cenário RCP 4.5 foi bastante suave. Já no cenário RCP 8.5 pode ser observado um declínio um pouco mais acentuado (figura 9 e tabela 2). Contudo, a análise estatística feita para a tendência da média, mais uma vez apresentou alta significância apenas para o cenário RCP 8.5. De uma forma geral, pode-se dizer que há uma tendência de redução do potencial de produção hidrelétrica na bacia.

Figura 9 – Bacia do Atlântico Norte e Nordeste – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5

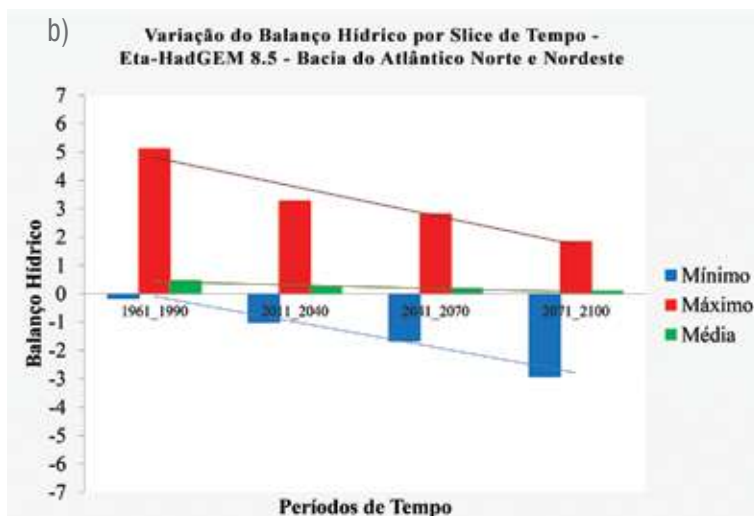
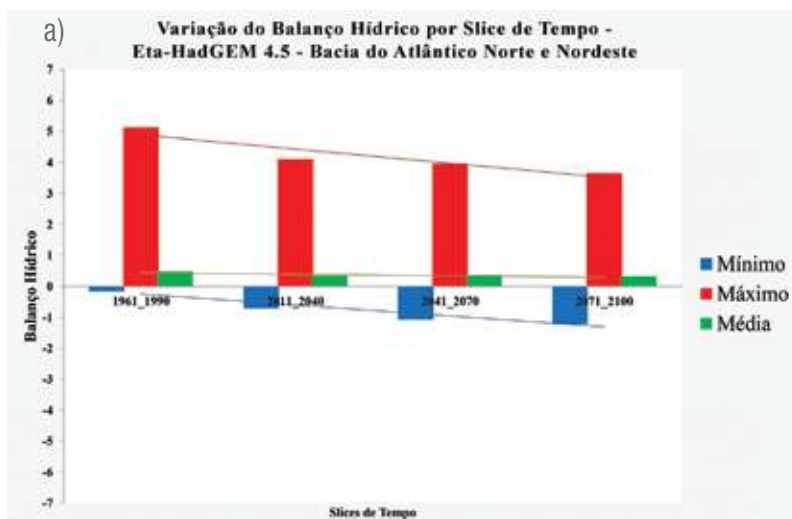


Tabela 2 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Atlântico Norte e Nordeste

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	-0,0497
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,0894
Curvatura de SEN	-0,1057

3.1.3 Bacia do Tocantins-Araguaia

Conforme pode ser observado na figura 11, para a Bacia Tocantins-Araguaia, em ambos cenários (RCP 4.5 e 8.5), apresenta uma tendência de aumento das áreas com balanço hídrico tendendo a zero.

Ambos os modelos possuem uma tendência de decréscimo dos valores máximos do balanço hídrico e também um pequeno aumento dos valores mínimos, evidenciando, assim, a tendência da bacia em ter valores do BH mais próximos de zero (figura 10).

O resultado da média, contudo, ainda que mostre valores positivos de BH, apresenta uma tendência à redução da disponibilidade hídrica da bacia em ambos os modelos. Pode-se verificar que, no cenário RCP 4.5, no primeiro período de tempo projetado (2011–2040), há um relativo aumento dos pontos com BH negativo na bacia, contudo, nos períodos seguintes esse percentual reduz significativamente. No cenário RCP 8.5, é contínuo o aumento do percentual de pontos com BH negativo, com exceção do último período (2071–2100), em que há a redução destes. A análise estatística feita para a tendência da média (tabela 3) não apresentou significância de tendência para ambos os cenários. De forma geral, pode-se dizer que há uma tendência de redução do potencial de produção hidrelétrica nesta bacia em função das alterações climáticas projetadas.

Figura 10 – Bacia do Tocantins-Araguaia – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Tabela 3 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Tocantins-Araguaia

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	-0,0506
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	-0,0538

3.1.4 Bacia do Rio São Francisco

Como pode ser observado na figura 11, a Bacia do Rio São Francisco apresenta a tendência de aumento das áreas com balanço hídrico negativo, em ambos cenários, sendo que, para o cenário RCP 8.5, essa tendência mostrou-se mais acentuada.

Conforme observado na figura 11, ambos os cenários possuem uma tendência bem acentuada do aumento dos valores mínimos, maior déficit hídrico. Para os valores de máximo, percebe-se a tendência ao decréscimo do balanço hídrico, tendendo este a zero, assim como os valores médios.

O percentual de pontos com BH negativo no cenário RCP 4.5 sofre um aumento no primeiro período de tempo (2011–2040) em comparação a média histórica e depois tende a decair. Já no cenário RCP 8.5, esse aumento é constante em todo o período projetado, tendo apenas um pequeno decréscimo no último período (2071–2100).

Essa é a bacia com os maiores valores mínimos (figura 11) e com o maior percentual de pontos negativos (tabela 4). Essa tendência pode ser justificada pelo fato dessa bacia pertencer a uma região semiárida do Brasil. A análise estatística feita para a tendência da média não apresentou significância de tendência para ambos os cenários. Contudo, ainda sim, essa é a bacia mais crítica em termos de déficit hídrico, devendo ser elaborados estudo com maior grau de detalhamento.

Figura 11 – Bacia do Rio São Francisco – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5

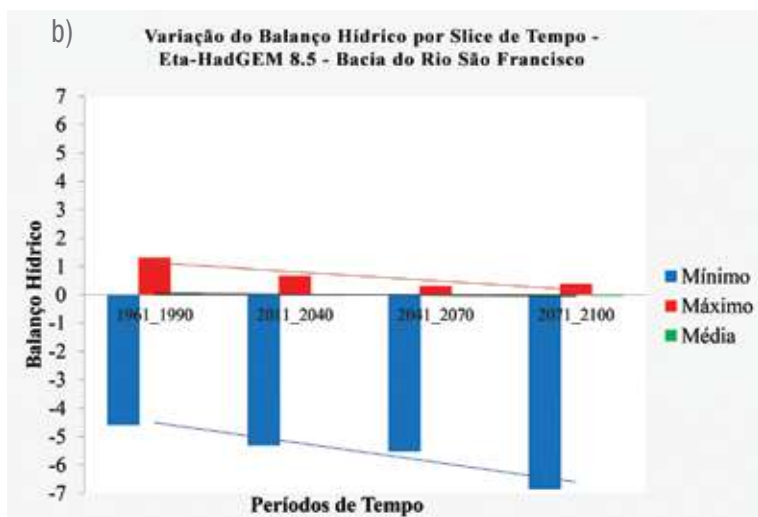
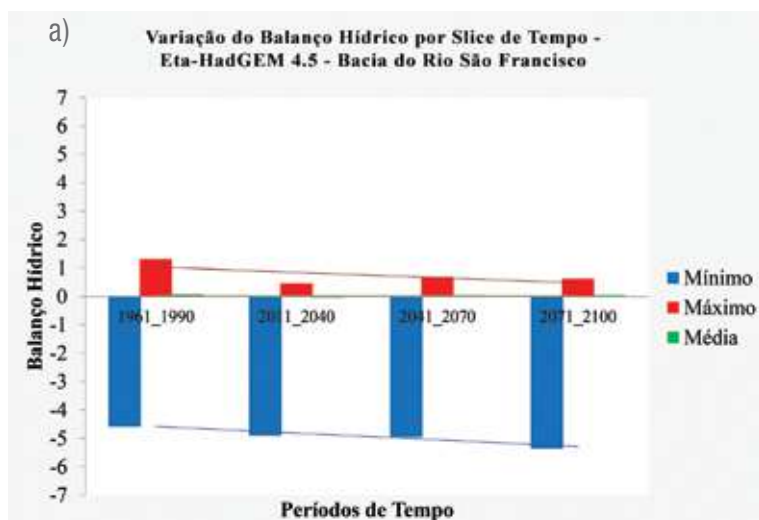


Tabela 4 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Rio São Francisco

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	0
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	-0,0195

3.1.5 Bacia do Atlântico Leste

Como pode ser observado, ambos os cenários (RCP 4.5 e 8.5) mostram uma tendência da redução dos valores de BH máximo, sendo a do cenário RCP 8.5 mais acentuada em relação ao cenário RCP 4.5. Há também a tendência da diminuição dos valores de mínimos. As médias sofrem pouca oscilação nessa bacia, contudo, encontram-se bem próximas de zero (figura 12).

Mais uma vez o cenário RCP 4.5 mostra uma tendência grande de aumento do déficit hídrico no primeiro período de tempo (2011–2040), sendo essa tendência reduzida nos demais períodos. O cenário RCP 8.5 já mostra, para essa bacia, um cenário mais contínuo em relação à frequência de pontos com BH negativo e zero (figura 12). A análise estatística feita para a tendência média apresentou uma alta significância também para o cenário RCP 8.5.

Com essa análise, pode-se inferir que haverá, em média, pouca alteração no potencial de produção hidrelétrica nessa bacia, sendo mais significativa, caso alcancemos os padrões de emissão característicos do cenário RCP 8.5.

Figura 12 – Bacia do Atlântico Leste – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Tabela 5 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Atlântico Leste

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	-0,002
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,0894
Curvatura de SEN	-0,0476

3.1.6 Bacia do Rio Paraná e do Rio Paraguai

A figura 13 apresenta os gráficos gerados para a Bacia do Rio Paraná e do Rio Paraguai. De acordo com os dados, essa bacia possui a maior parte de seus pontos constituídos de balanço hídrico positivo, seja no período histórico, sejam nos períodos projetados, em ambos cenários (RCP 4.5 e 8.5). Quanto aos valores de BH mínimos negativos obtidos, são próximos à zero. Estatisticamente, não há uma tendência significativa da média para ambos os cenários.

Há tendência ao aumento dos valores máximos e das médias de BH observada em ambos cenários (figura 17) pode ser interpretado como um aumento da disponibilidade hídrica na bacia e, conseqüentemente, um aumento no seu potencial de produção hidrelétrica.

Figura 13 – Bacia do Rio Paraná e do Rio Paraguai – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Tabela 6 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Rio Paraná e do Rio Paraguai

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	0,0099
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	-0,0246

3.1.7 Bacia do Atlântico Sul e Sudeste

É possível observar uma tendência de aumento das médias de BH em ambos os cenários (RCP 4.5 e 8.5), ainda que haja a tendência de diminuição dos valores máximos. Os valores de mínimo tendem a ficar próximos a zero, indo de negativos no cenário histórico e assumindo valores positivos nos últimos períodos de tempo (figura 14). Essa tendência de aumento da disponibilidade hídrica da bacia tende a influenciar o aumento do potencial de produção hidrelétrica desta. Estatisticamente, a tendência média não apresentou significância de tendência para ambos os cenários.

Figura 14 – Bacia do Atlântico Sul e Sudeste – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Tabela 7 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Atlântico Sul e Sudeste

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	0,1482
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	0,1518

3.1.8 Bacia do Rio Uruguai

A Bacia do Rio Uruguai foi a que obteve maior similaridade de resultados quando comparados os dados da modelagem climatológica dos cenários RCP 4.5 e 8.5. Nessa bacia, não foi observado déficit no BH, isto é, áreas com BH negativo (figura 15). O BH médio mostrou uma diminuição no período de tempo de 2011–2040, com estabilização e aumento nos períodos seguintes, em ambos os cenários RCP 4.5 e 8.5 (figura 15). Estatisticamente não há uma tendência média significativa para ambos os cenários. Entretanto, os máximos e mínimos mostraram tendência de aumento dos valores. Assim, constata-se que essa bacia poderá ter aumentos pontuais em sua disponibilidade hídrica, o que tende a influenciar o aumento do potencial de produção hidrelétrica, cabendo estudos mais detalhados para confirmar ou refutar esta hipótese.

Figura 15 – Bacia do Rio Uruguai – Variação dos valores mínimos, médios e máximos ao longo dos períodos presente (1961–1990) e futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) usando o modelo Eta-HadGEM2-ES: (a) cenário RCP 4.5; e (b) cenário RCP 8.5



Tabela 8 – Resultados estatísticos para a tendência média da Bacia do Rio Uruguai

Cenário RCP 4.5	
Mann-Kendall	0,7341
Curvatura de SEN	0,1997
Cenário RCP 8.5	
Mann-Kendall	0,3082
Curvatura de SEN	0,1927

Em uma análise geral dos resultados encontrados nesse produto, pode-se observar a previsão do aumento da escassez de água em quase toda a extensão do Brasil, principalmente, na região central, para os próximos anos (período 2011–2040), seguido de uma pequena recuperação nos períodos seguintes. Ao mesmo tempo, a região Sul do país apresentará crescente aumento da disponibilidade hídrica, a partir do cenário atual. Essas previsões devem ser avaliadas com cautela, pois para uma correta e robusta análise, deveria ser considerada a vegetação dos biomas, que possui papel fundamental no balanço hídrico final.

3.2 Energia eólica

Conforme supracitado, para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável é necessária uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB *et al.*, 1993 *apud* ANEEL, 2008). Já para Schaeffer *et al.* (2008), a velocidade mínima considerável para o aproveitamento eólico é de 6 m/s e valores acima de 8,5 m/s são consideradas altas velocidades.

A partir do cálculo da velocidade total dos ventos para os pontos da modelagem do INPE, foi elaborado o mapa da figura 16, que mostra a distribuição das velocidades totais dos ventos dividido em classes de intensidade ($< 3 \text{ m s}^{-1}$, $3\text{--}4 \text{ m s}^{-1}$, $4\text{--}5 \text{ m s}^{-1}$, $5\text{--}6 \text{ m s}^{-1}$, $6\text{--}7 \text{ m s}^{-1}$, $7\text{--}8 \text{ m s}^{-1}$, $> 8 \text{ m s}^{-1}$). É apresentado o período de tempo histórico correspondente aos anos entre 1961 e 1990 e os períodos de tempo

futuros, separados em três períodos de tempo, que são, respectivamente, 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100, calculados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, cenários RCP 4.5 e 8.5, otimista e mais pessimista, respectivamente.

Cabe ressaltar de antemão que, ao se utilizar de médias de 30 anos, sem considerar a sazonalidade, há um efeito de amenização da velocidade total dos ventos. Assim sendo, o que deve ser reparado são as tendências de aumento de velocidades destes. Com esse propósito, foram elaborados mapas de variação da velocidade dos ventos considerando a sazonalidade. As figuras 17 e 18 apresentam os mapas de variação da média (de 30 anos) da velocidade total dos ventos para os períodos de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100 em comparação ao período histórico (1961–1990) para cada estação do ano (verão: DJF; outono: MAM; inverno: JJA; e, primavera: SON) dos cenários RCP 4.5 e 8.5 respectivamente.

Para ambos cenários, pode-se observar a tendência ao aumento da intensidade da velocidade do vento nas regiões Norte, Nordeste e Sul, definindo-as como áreas potencialmente produtoras de energia eólica. O aumento da velocidade dos ventos é mais acentuado nos períodos do verão e do outono para o cenário RCP 4.5 e, nos períodos de primavera e verão, no RCP 8.5. Áreas com projeção de redução da velocidade dos ventos podem ser observadas principalmente no Centro-Oeste e no estado do Amazonas, constatando que essas áreas continuarão não sendo potenciais produtoras de energia eólica.

Quanto às análises estatísticas do teste de Mann-Kendall e da curvatura de SEN (tabelas 9 e 10), apontam para uma alta significância estatística do indicador para as regiões brasileiras apenas no cenário 8.5, exceto para o Centro-Oeste. Já o cenário RCP4.5 não apresenta significância estatística em sua tendência. A magnitude dessa variação será maior no cenário RCP4.5 na região Nordeste e, no RCP8.5, na região Sudeste do Brasil. De uma forma geral, os resultados apontam para uma tendência de aumento da velocidade média ventos em todas as regiões do Brasil em ambos os cenários, exceto para a região Centro-Oeste no cenário RCP 4.5, *a priori* indicando impacto positivo na prospecção da matriz energética eólica.

Tabela 9 – Análise estatística da velocidade do vento a 100 m para as regiões brasileiras no cenário RCP 4.5

Análise estatística do valor médio regional do índice aridez*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,7341	+0,082m s ⁻¹ (por período)
Norte	0,7341	+0,014m s ⁻¹ (por período)
Centro-Oeste	0,7341	-0,008 m s ⁻¹ (por período)
Sudeste	0,7341	+0,077 m s ⁻¹ (por período)
Sul	0,7341	+0,069 m s ⁻¹ (por período)

* Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

Tabela 10 – Análise estatística da velocidade do vento a 100 m para as regiões brasileiras no cenário RCP 8.5

Análise estatística do valor médio regional do índice aridez*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,0894	+0,269m s ⁻¹ (por período)
Norte	0,0894	+0, 251m s ⁻¹ (por período)
Centro-Oeste	0,3082	+0,131 m s ⁻¹ (por período)
Sudeste	0,0894	+0,322 m s ⁻¹ (por período)
Sul	0,0894	+0,309 m s ⁻¹ (por período)

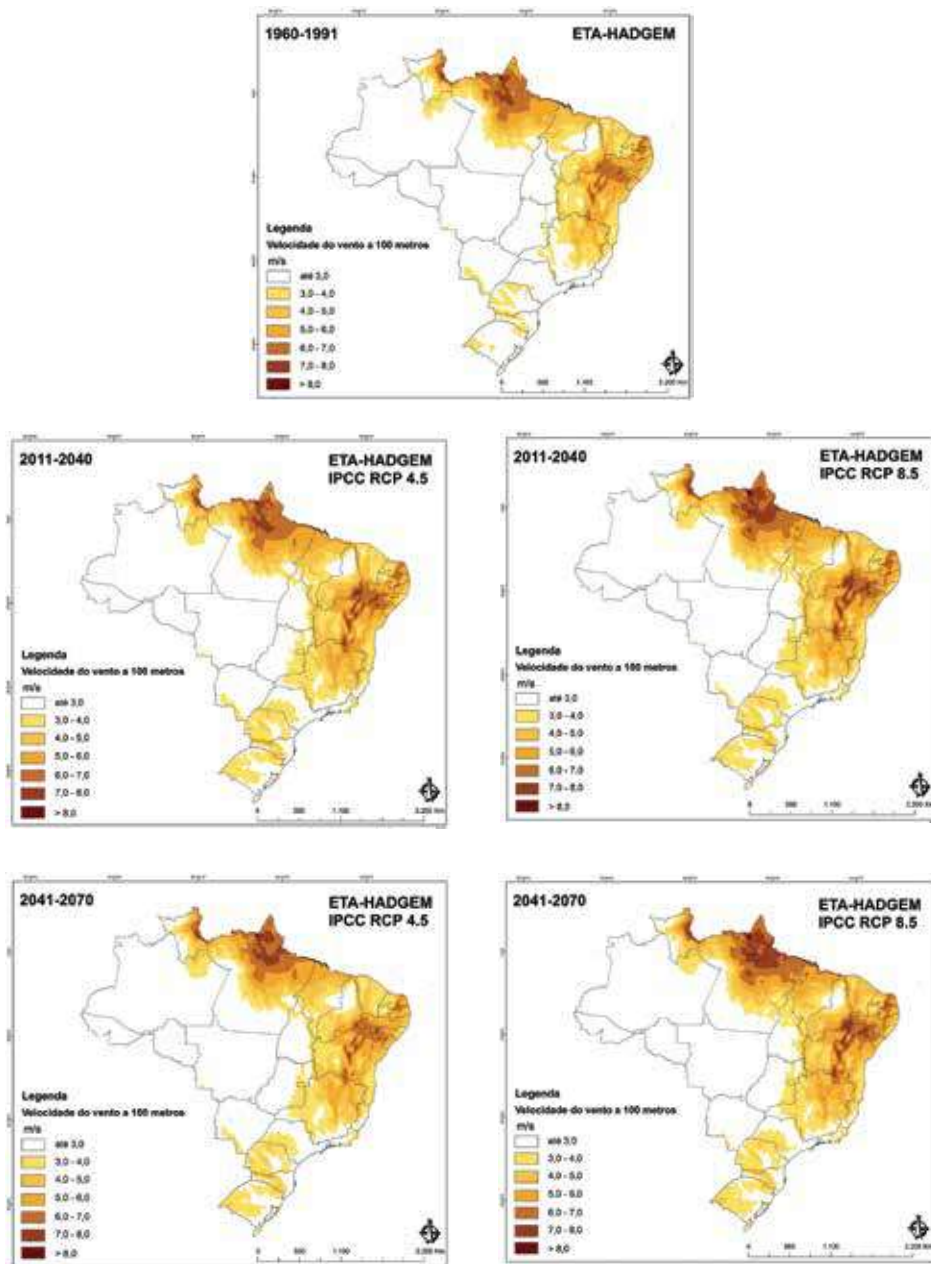
* Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

Cabe destacar que, de acordo com Chou *et al.* (2014), o modelo Eta-HadGEM2-ES possui a temperatura superestimada na região do Amapá, o que pode estar correspondendo também a uma superestimação da velocidade dos ventos nessa região, devido ao consequente aumento de pressão. Para o cenário RCP 8.5, essa tendência pode levar a um erro ainda maior nesta superestimação do potencial de geração de energia eólica, quando comparado ao cenário de RCP 4.5.

A tendência observada de aumento da velocidade total dos ventos acarreta um aumento do potencial de geração de energia eólica no país segundo os dados climatológicos projetados por meio do modelo em estudo. Ressalte-se que, sem um grande salto na eficiência no custo/benefício para uso de energia eólica, essa matriz energética poderá ser considerada apenas como complementar a geração hidrelétrica.

Por fim, para uma avaliação mais apurada sobre a tendência de utilização dos ventos para geração de energia, seriam necessárias projeções de uso do solo, baseadas nas projeções climáticas do modelo utilizado neste estudo. Dessa forma, cabe salientar que este estudo apresenta uma avaliação simplificada da velocidade total dos ventos. Sabe-se de antemão que os impactos da rugosidade do terreno sobre as projeções climáticas da velocidade dos ventos são de suma importância, devendo ser incluídas em análises futuras.

Figura 16 – Classes de intensidade da velocidade do vento a 100 m ($< 3 \text{ m s}^{-1}$, $3\text{-}4 \text{ m s}^{-1}$, $4\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$, $5\text{-}6 \text{ m s}^{-1}$, $6\text{-}7 \text{ m s}^{-1}$, $7\text{-}8 \text{ m s}^{-1}$, $> 8 \text{ m s}^{-1}$) para os períodos presente (1961–1990) e o futuro (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) nos cenários RCP 4.5 e 8.5



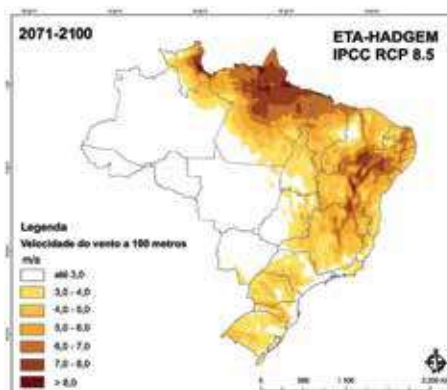


Figura 17 – Variação da velocidade do vento a 100 m para os períodos futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) em relação ao presente (1961–1990) e no cenário RCP 4.5 do modelo regional Eta-HadGEM2-ES

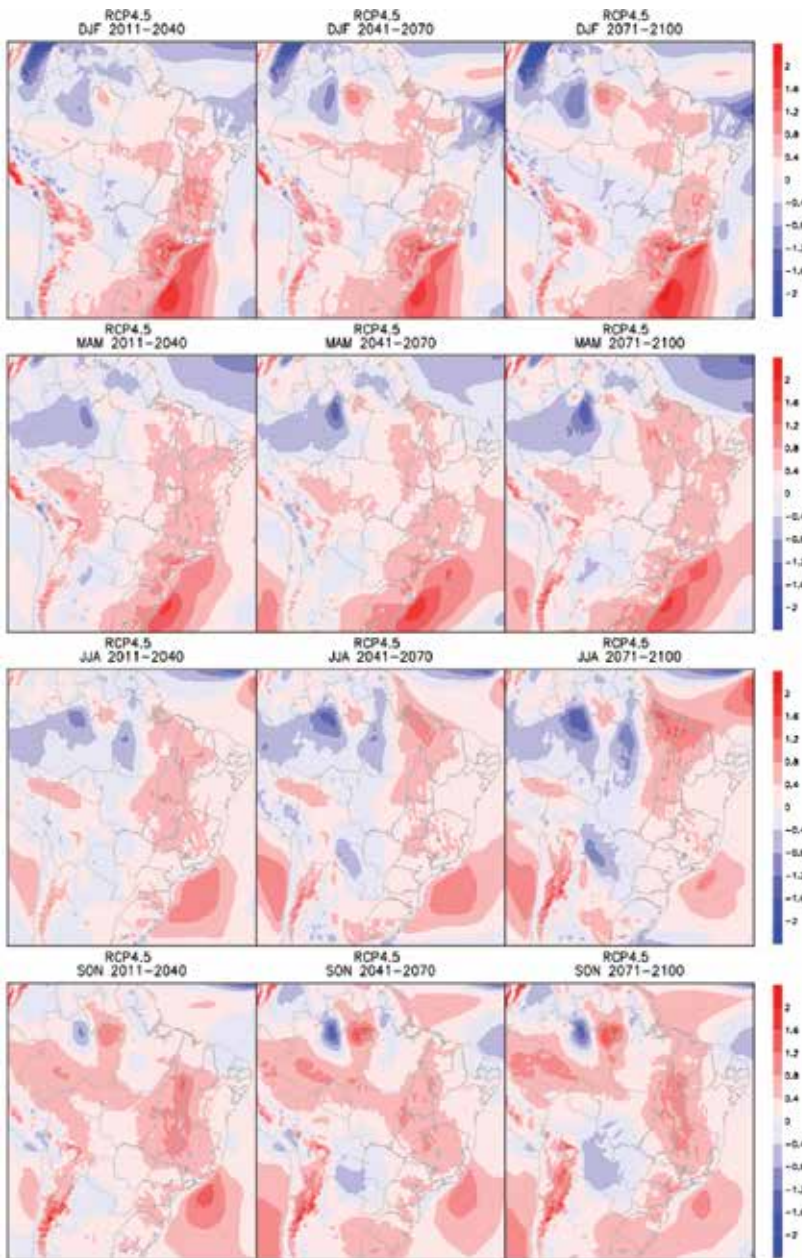
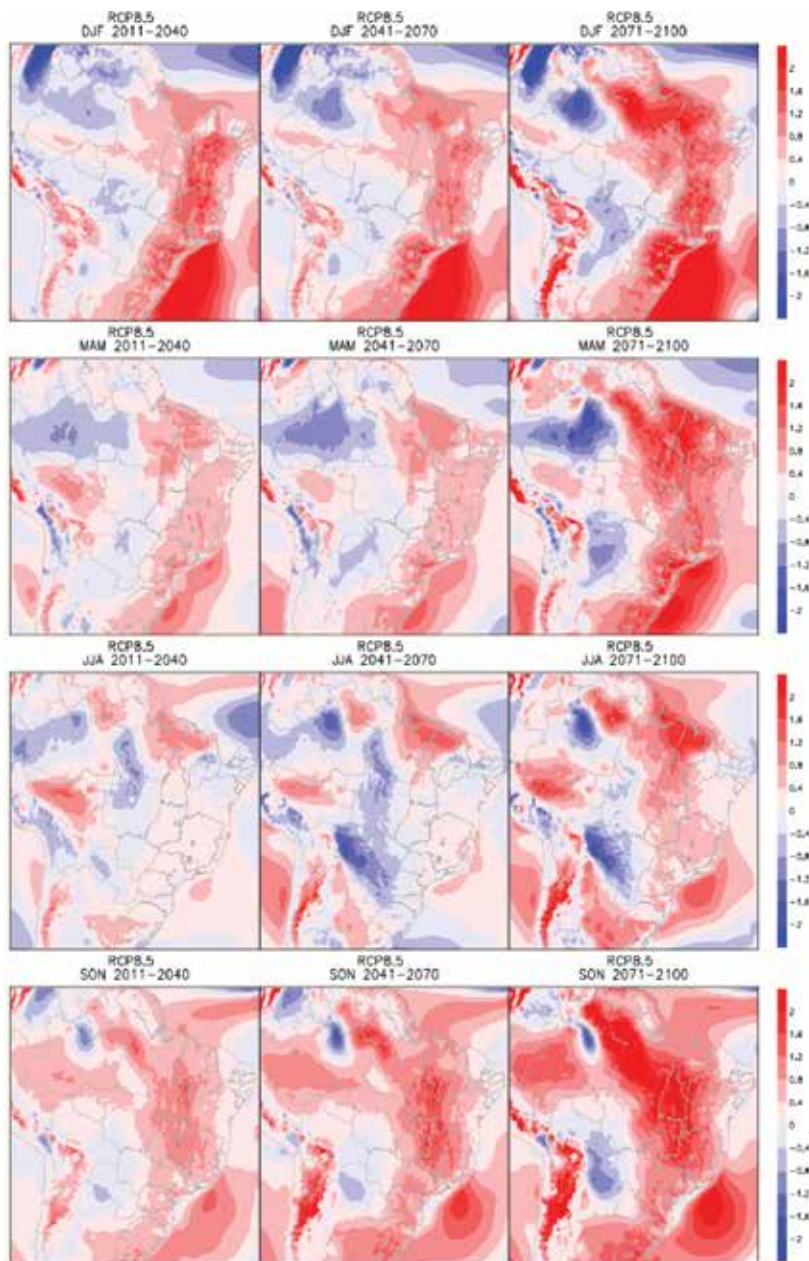


Figura 18 – Variação da velocidade do vento a 100 m para os períodos futuros (2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100) em relação ao presente (1961–1990) e no cenário RCP 8.5 do modelo regional Eta-HadGEM2-ES

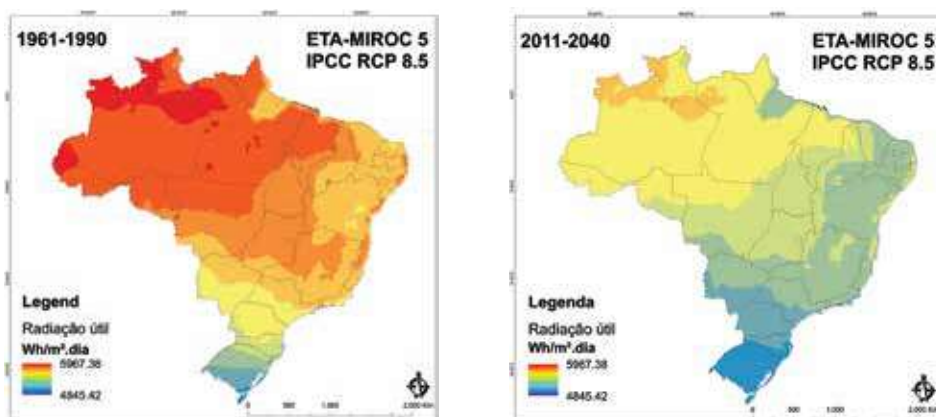


3.3 Energia solar

Analisando-se de maneira generalizada todos os mapas produzidos pelos distintos cenários do modelo climático regional Eta-MIROC5 (figura 19), observa-se um mesmo padrão que se mantém de modo notório: uma relação inversamente proporcional entre a intensidade de radiação solar e a latitude; ou seja, em menores latitudes (áreas próximas à linha do equador, como as regiões Norte e Nordeste do Brasil), a radiação solar é elevada, enquanto que, em latitudes maiores (em direção à região Sul do país), a intensidade desta radiação é reduzida. Esse fato ocorre em virtude da incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre, isto é, perpendicular na faixa equatorial e tropical e de forma mais oblíqua em direção aos polos.

Quando o período histórico (1961–1990) do modelo Eta-MIROC5 é avaliado, nota-se que a região Norte do Brasil apresenta os maiores valores do indicador de radiação útil, sendo que estes se estabelecem entre cerca de 5.700 e 5.900 $W.h/m^2.dia$. Em seguida, encontram-se as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do país, com valores em torno de 5.500 a 5.700 $W.h/m^2.dia$. A região Sul possui a mais acentuada variação de intensidade dessa radiação, com valores oscilando entre 5.500 $W.h/m^2.dia$ na área mais ao norte e até 4.900 $W.h/m^2.dia$ no sul da região.

Figura 19 – Clima presente (1961–1990) simulado e clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) projetado para o indicador de radiação útil no Brasil por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5





Como mencionado anteriormente, os eminentes valores do indicador de radiação útil na região Norte do Brasil se devem à enfática energia solar que esta área recebe no decorrer de todo o ano. Assim, apesar das médias anuais para a representação do indicador, os valores deste permanecem expressivamente altos. Em contraste, a região Sul exhibe valores inferiores em função da menor quantidade de energia solar recebida por esta área. Além disso, o Sul do país tem como característica marcante a atuação bastante frequente de sistemas meteorológicos que amplificam a cobertura de nuvens, especialmente as frentes frias.

Observando-se as projeções futuras do indicador de radiação útil geradas pelo modelo Eta-MIROC5 forçado com o cenário RCP 8.5 do AR5 do IPCC, verifica-se que os valores simulados até o final do século XXI são menores em comparação com o clima presente (período histórico). Em média, tais reduções da intensidade de radiação variam entre 4% e 8% em todo o Brasil, valores estes considerados não significativos, uma vez que o país ainda se encontraria dentro de uma faixa satisfatória para a geração de energia oriunda da radiação de onda curta (radiação solar).

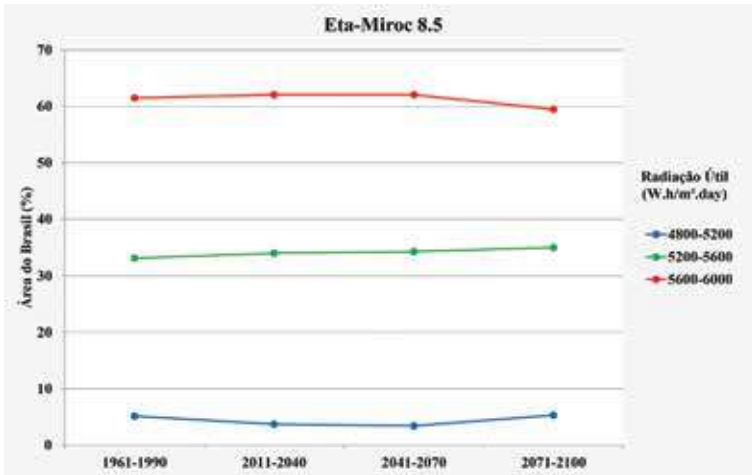
Entre 2011 e 2040, a região Norte e o setor norte da região Centro-Oeste do Brasil devem apresentar um valor médio do indicador de radiação útil em cerca de $5.600 \text{ W.h/m}^2.\text{dia}$, ou seja, uma diminuição em torno de 4% em comparação com o clima presente. O centro-sul da região Centro-Oeste, assim como as regiões Nordeste e Sudeste do país, provavelmente terão valores por volta de $5.300 \text{ W.h/m}^2.\text{dia}$, representando, deste modo, uma redução na casa de 6% em relação

ao período histórico. A região Sul deve mostrar o maior decaimento na intensidade de energia solar, isto é, cerca de 8%, uma vez que o valor médio nesta área passaria a ser em torno de 5.100 W.h/m².dia.

Acompanhando as projeções futuras ao longo do período de 2041 a 2070, nota-se um irrisório aumento dos valores do indicador de radiação útil no Brasil. Essas elevações são em torno de 2% em comparação com o período anterior (2011–2040), mas ainda se conservam por volta de 4% menores em relação ao clima presente (1961–1990). No período de 2071 a 2100, o panorama simulado de radiação solar no país é bastante semelhante ao primeiro período futuro analisado (2011–2040), com a distribuição dos valores de maneira similar a este período. Há somente uma curta exceção nos estados de Minas Gerais e do Paraná, que mantêm o valor do período anterior (2041–2070).

A figura 20 apresenta as frações percentuais de área do Brasil para determinadas faixas do indicador de radiação útil em função do tempo simuladas pelo modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5. Levando-se em consideração uma área territorial do país igual a 8,9 milhões de quilômetros quadrados, tem-se que atualmente (1961–1990) e futuramente (2011–2100) a maior parte (por volta de 61%) tem/terá uma intensidade de radiação média anual entre 5.600 e 6.000 W.h/m².dia. Em uma faixa de energia um pouco menor (5.200 a 5.600 W.h/m².dia), encontra-se e projeta-se que assim permanecerá algo em torno de 34% da área total do Brasil. Por fim, cerca de 5% das terras do país possuem/possuirão radiação solar entre 4.800 e 5.200 W.h/m².dia.

Figura 20 – Porções percentuais de área do Brasil para faixas do indicador de radiação útil ($W.h/m^2.dia$) entre 1961 e 2100 simuladas pelo modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP8.5

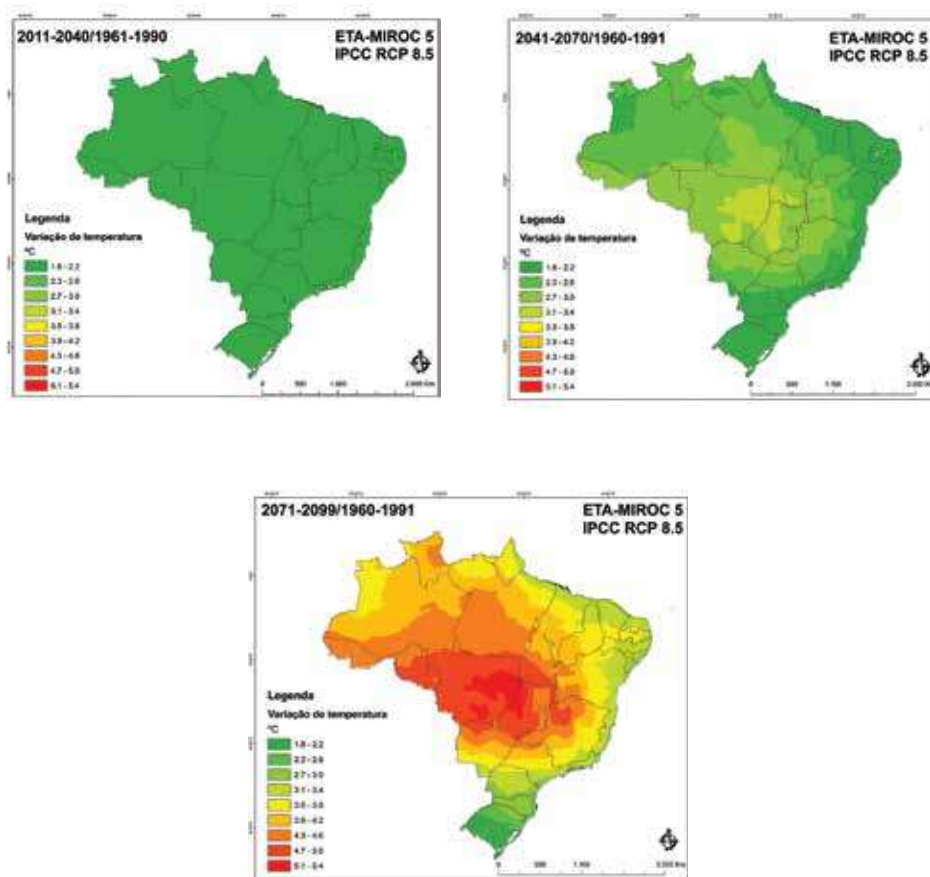


Ainda de acordo com as figuras 19 e 20, é possível observar que a faixa de maior intensidade do indicador de radiação útil (de 5.600 a $6.000 W.h/m^2.dia$) está localizada sobre a região Norte e em partes das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Por outro lado, a faixa com menor valor de radiação solar (de 4.800 a $5.200 W.h/m^2.dia$) fica confinada apenas em um dado trecho da região Sul do país. Isso reforça uma das principais características geográficas e, conseqüentemente, climáticas do Brasil: um país predominantemente tropical e com veemente energia solar disponível.

A figura 21 apresenta as diferenças de temperatura do ar entre o clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) e o período histórico (1961–1990) projetadas para o Brasil por meio do modelo Eta-MIROC5 RCP 8.5. As estimativas apontam para um aumento de cerca de $+2,0^{\circ}C$ em todo o Brasil entre 2011–2040. No período 2041–2070, as projeções indicam uma elevação de temperatura semelhante, contudo, de maneira mais acentuada no centro do país, com valores que alcançam até $+3,0^{\circ}C$ na região Centro-Oeste e adjacências. Analisando-se o

período de 2071–2100, nota-se que o aumento da temperatura do ar é enfático em todo o Brasil. As simulações mostram uma elevação entre +2,0 e +3,0°C na região Sul e no litoral leste do país, enquanto que, no interior, a diferença pode atingir até +5,5°C na região Centro-Oeste e algo em torno de +4,0°C na região Norte e em grande parte das regiões Nordeste e Sudeste.

Figura 21 – Diferenças de temperatura do ar entre o clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) e o clima presente (1961–1990) projetadas para o Brasil por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5



A priori, é possível concluir que o Brasil possui área altamente expressiva para a utilização de energia solar, tanto nos dias atuais quanto nas próximas décadas, principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Contudo, por dificuldades encontradas na consecução do trabalho, não foi possível uma análise sazonal, que certamente elevaria a qualidade do material. Ademais, os dados médios mascaram de forma sistemática os resultados, mas oferecem uma aproximação necessária para equipar-se de elementos para antecipar os impactos negativos decorrentes das mudanças do clima.

Feitas essas considerações, cabe destacar que, uma vez que os valores apresentados se tratam de médias anuais em 30 anos, espera-se que, no verão, a intensidade de radiação solar incidente seja ainda mais significativa, havendo atenuações somente diante da presença de nebulosidade, principalmente na região Norte, fator este não impeditivo em um país tropical.

Além disso, projeta-se um aumento expressivo da temperatura do ar média até o final do século XXI em todo o país, que pode significar uma redução na capacidade de conversão de energia, sensível às variações de temperatura ambiente, sobretudo, no Centro-Oeste e Norte do país, e ainda limitações de área para a instalação de estações fotovoltaicas e do tipo CSP (sigla em inglês para “energia solar concentrada”) devido à grande expansão do fenômeno urbano no território nacional, deixando poucas áreas livres para estes empreendimentos.

Em termos estatísticos, o teste de Mann-Kendal e da curvatura de SEN apontam para uma tendência pouco significativa para o índice de radiação útil em todas as regiões brasileiras (0,73), isso se deve a alguns fatores, entre eles: o uso da média de 30 anos e a baixa frequência de variação dos dados de radiação solar. Contudo, a partir da análise da curvatura de SEN, é possível observar a magnitude da tendência, com unanimidade em decréscimo na disponibilidade de ondas curtas, sobretudo nas regiões Norte e Centro-Oeste entre o período analisado, o que, associando diminuição da radiação útil disponível e elevação da temperatura, poderá interferir na capacidade de produção de energia dos equipamentos fotovoltaicos, bem como as CSPs.

Tabela 11 – Análise estatística do índice de radiação útil para as regiões brasileiras

Análise estatística do valor médio regional do índice de radiação útil (Radútil)*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,73	–84,60 W.h/m ² .dia (por período)
Norte	0,73	–99,56 W.h/m ² .dia (por período)
Centro-Oeste	0,73	–92,91 W.h/m ² .dia (por período)
Sudeste	0,73	–89,57 W.h/m ² .dia (por período)
Sul	0,73	–71,72 W.h/m ² .dia (por <i>slice</i>)

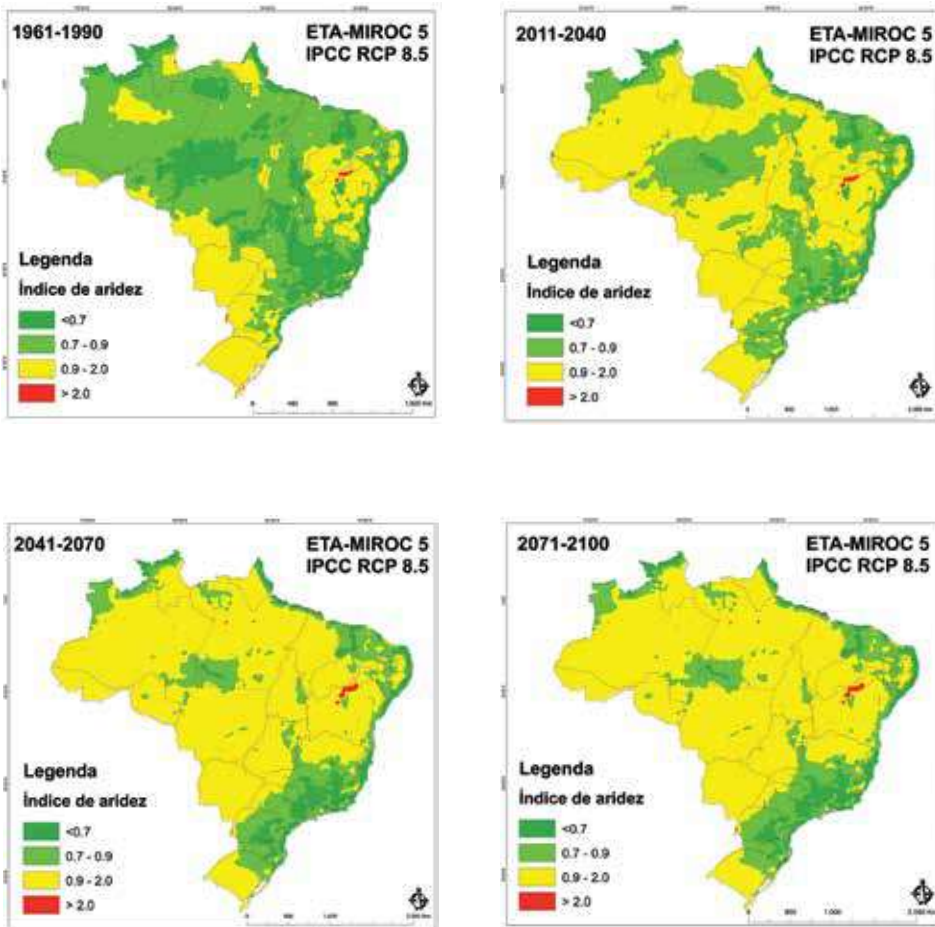
* Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

3.4 Biocombustíveis (bioetanol)

A energia advinda dos biocombustíveis se dá a partir de fontes renováveis, que, em território brasileiro, são essencialmente representados pelo etanol e o biodiesel, produzidos a partir de oleaginosas. Em geral, essas espécies se adaptam bem a diversos ambientes, seja quanto à variabilidade térmica ou à disponibilidade hídrica. Contudo, apesar da elevada adaptabilidade, situações que fogem do ótimo climático das espécies podem representar queda na produtividade agrícola do gênero, repercutindo negativamente na geração desse tipo de energia, que, segundo dados da EPE (2011), terão grande importância para suprir a demanda futura por energia no país.

O índice de aridez proposto por Thornthwaite (1941) e reformulado algebricamente por Hare (1983) é um excelente indicativo para avaliar a disponibilidade hídrica em determinado tipo climático, apontando aquelas regiões suscetíveis à ocorrência de secas severas e do processo de desertificação. No caso brasileiro, é notória a predisposição à aridez do sertão nordestino. A partir do índice proposto (figura 22), o norte da Bahia apresenta-se como área em processo de desertificação, que evolui em termos de extensão do *slice* temporal de 1961–1990 para 2071–2099 e surgem também focos de desertificação no estado do Pará.

Figura 22 – Clima presente (1961–1990) simulado e clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) projetado para o índice de aridez no Brasil por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP8.5



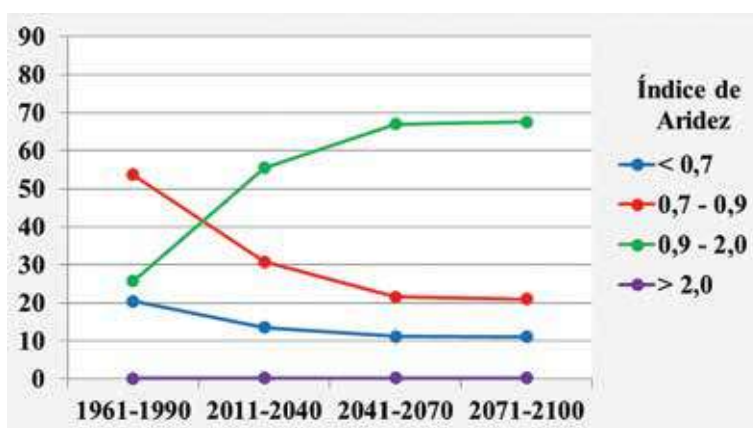
O litoral brasileiro, tanto na sua fachada leste quanto nordeste, permanece com alto saldo de umidade, assim como o Sudeste brasileiro, que sofre com retração significativa dessa área no período de 2011–2040, sobretudo, nos estados de São Paulo e do Paraná, mas que, a partir do período de 2041–2070, volta a se elevar novamente. Certamente, a característica litorânea brasileira, associando uma topografia fechada com alta insolação e temperatura da superfície, garante considerável

teor de umidade e baixa estabilidade estática no ar sobrejacente, permitindo, quando a situação sinótica for favorável, ocorrência de instabilidade convectiva e, consequentemente, saldo positivo de umidade no ambiente.

Os impactos mais significativos serão sentidos nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, onde há expressiva redução da umidade disponível ao longo dos períodos de tempo, sobretudo, na região amazônica e nos estados do Tocantins, de Mato Grosso e de Goiás, apresentando maior suscetibilidade a situações de aridez, ou seja, de seca.

Em termos quantitativos (figura 23), os dados da projeção do cenário 8.5 do Eta-MIROC5 demonstram que, no período de 1961–1990, mais de 74% do território brasileiro apresentava índice de aridez abaixo de 0,9, ou seja, indicativo de oferta umidade. Contudo, a modelagem demonstra uma inversão nesse cenário até 2099, em que, aproximadamente, 67% estarão em classe próxima da aridez, ou seja, entre os índices 0,9 e 2,0. Já as áreas em desertificação, no norte da Bahia e em situações pontuais do Pará, sofrerão acréscimo de 0,2% em extensão de área até 2099.

Figura 23 – Evolução de áreas do segundo índice de aridez para o Brasil por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5



Quanto às análises estatísticas, o teste de Mann-Kendall aponta para uma altíssima significância estatística do indicador para as regiões brasileiras, exceto para o Sudeste. A magnitude dessa variação será maior na região Norte do Brasil, na qual diversos estudos têm apontado para a tendência de savanização da floresta amazônica, o que corrobora os resultados. Destoante das demais regiões, o Sul do Brasil apresenta uma tendência de aumento da umidade, ou seja, ao longo dos períodos em análise a tendência a ser observada nessa região é a de maior disponibilidade de umidade.

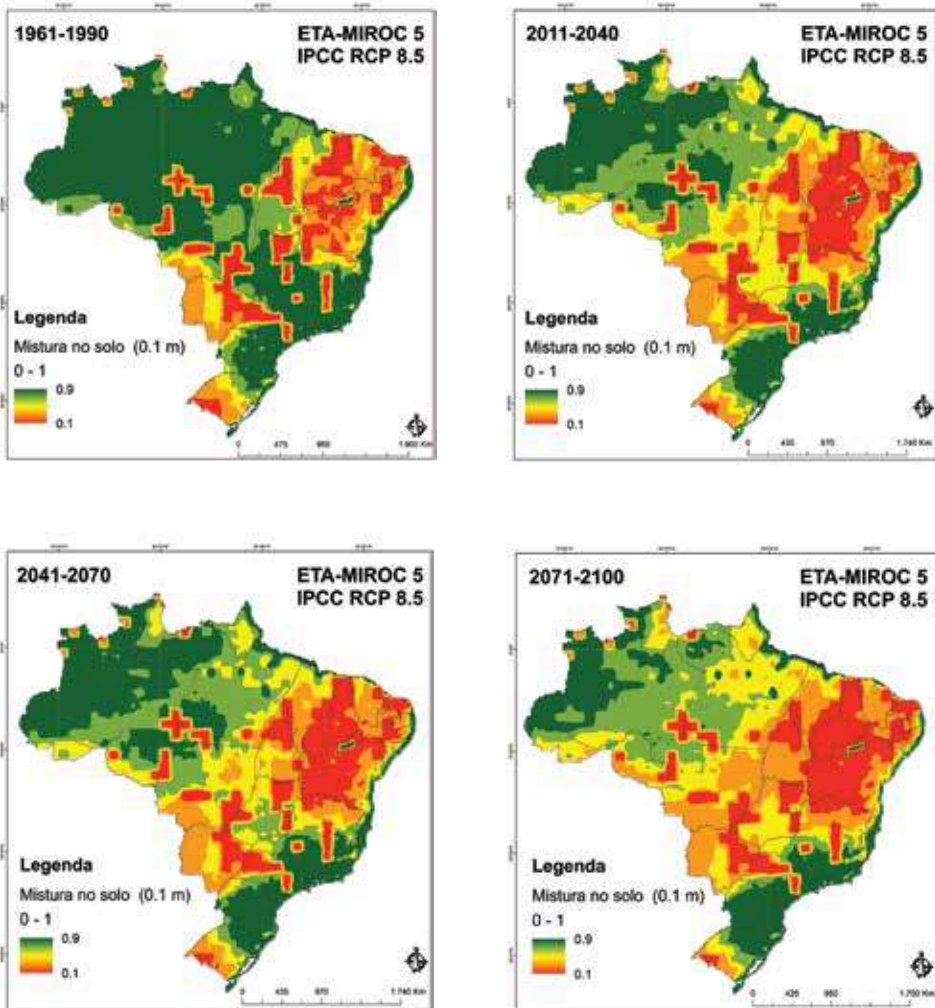
Tabela 12 – Análise estatística do índice de aridez para as regiões brasileiras

Análise estatística do valor médio regional do índice aridez*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,09	+0,02 (por período)
Norte	0,09	+0,04 (por período)
Centro-Oeste	0,09	+0,03 (por período)
Sudeste	0,73	+0,01 (por período)
Sul	0,09	-0,03 (por período)

* Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

Os dados de umidade do solo (figura 24) corroboram também a tendência espacial observada no índice de aridez, ou seja, apontam para uma ampliação da área com deficiência hídrica, sobretudo, nos estados da Bahia, do Piauí e de Minas Gerais. O dado aponta ainda para a redução de umidade superficial disponível para Centro-Oeste brasileiro e prevê alteração pouco expressiva para o litoral brasileiro e para o Sudeste. Já o Mato Grosso do Sul e a região amazônica ao longo dos períodos de tempo apresentam perdas significativas de umidade superficial do solo, características comuns graças ao tipo de solos desenvolvidos nessas áreas.

Figura 24 – Clima presente (1961–1990) simulado e clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) projetado para umidade do solo (0,1 m) no Brasil por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5



Esses dados têm importância, uma vez que são indicativos da disponibilidade hídrica para o sistema radicular do vegetal, repercutindo diretamente na capacidade de absorção de nutrientes pelo vegetal. Dessa forma, a partir dos dados da modelagem, é possível estimar uma redução da área com disponibilidade hídrica para o desenvolvimento da vegetação, implicando diretamente na produtividade de vários gêneros que se distribuem entre a região Nordeste e Centro-Oeste.

A análise estatística apresentou uma alta significância apenas para a região Nordeste, cuja magnitude é de redução em -0,01% da umidade entre os períodos de tempo em estudo. A região que destoa dessa característica é o Sul do Brasil, cuja tendência é de acréscimo da umidade do solo na ordem de +0,01% entre os períodos de tempo em estudo, estabelecendo forte ligação com os resultados apresentados para o índice de aridez nessa mesma região.

Tabela 13 – Análise estatística do índice de umidade no solo para as regiões brasileiras

Análise estatística do valor médio regional do índice umidade no solo*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,09	-0,01% (por período)
Norte	0,31	-0,01% (por período)
Centro-Oeste	0,31	-0,01% (por período)
Sudeste	0,31	-0,01% (por período)
Sul	0,31	+0,01% (por período)

⁶ Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

Ademais, complementando esta análise, os dados de variação de temperatura entre os períodos temporais e o clima presente projetado, mostra a tendência espacial de variação da temperatura, elemento fundamental para avaliar o estresse térmico ao qual a vegetação estará submetida (figura 21). Essa informação é relevante, uma vez que aponta para aquelas áreas onde haverá alteração nas taxas fotossintéticas, mais uma vez reduzindo o potencial produtivo do tipo vegetacional.

Além disso, deve-se considerar que alterações bruscas da temperatura repercutem também em alterações físico-químicas do solo que, conseqüentemente, se reverberará na capacidade produtiva deste.

Segundo os dados da modelagem do Eta-MIROC5, a região Centro-Oeste brasileira, seguida da região Norte, são aquelas que apresentaram maior acréscimo de temperatura. Até 2100, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Rondônia poderão sofrer um acréscimo de temperatura superior a 5°C. A literatura tem apontado que aumentos na temperatura local na ordem de 1 a 2°C já seriam responsáveis pela queda da produtividade das culturas. Desse modo, todo o território brasileiro estaria sujeito à queda de produtividade, dependendo do gênero em questão. Contudo, merecem maior atenção os estados já destacados anteriormente.

Esse cenário de aumento significativo das temperaturas médias e decréscimo de umidade disponível para a vegetação poderá repercutir, caso não haja investimento em tecnologias para melhoramento genético dos vegetais, correção do solo e irrigação, em queda significativa da produtividade agrícola brasileira. Isso porque o Centro-Oeste, grande produtor nacional de gêneros agrícolas, será o maior afetado pelas mudanças do clima segundo projeção do cenário 8.5 do modelo EtaMIROC5.

Em termos estatísticos, as análises apontaram para uma forte significância de tendência para a temperatura média do ar em 30 anos para as cinco regiões brasileiras, corroborando a possibilidade de aquecimento e de aumento da frequência de extremos de temperatura, que se reverberarão no estresse vegetacional conforme já mencionado. Com base nessa análise, as regiões Centro-Oeste e Norte apresentarão maiores taxas de elevação média da temperatura a 2 metros, +1,51°C por *slice* de tempo e +1,37°C por período de tempo, respectivamente. A região com menor magnitude de elevação entre o período analisado é o Sul do Brasil, com acréscimo de aproximadamente 0,87°C por *slice* de tempo.

Tabela 14 – Análise estatística da temperatura do ar a 2 metros para as regiões brasileiras

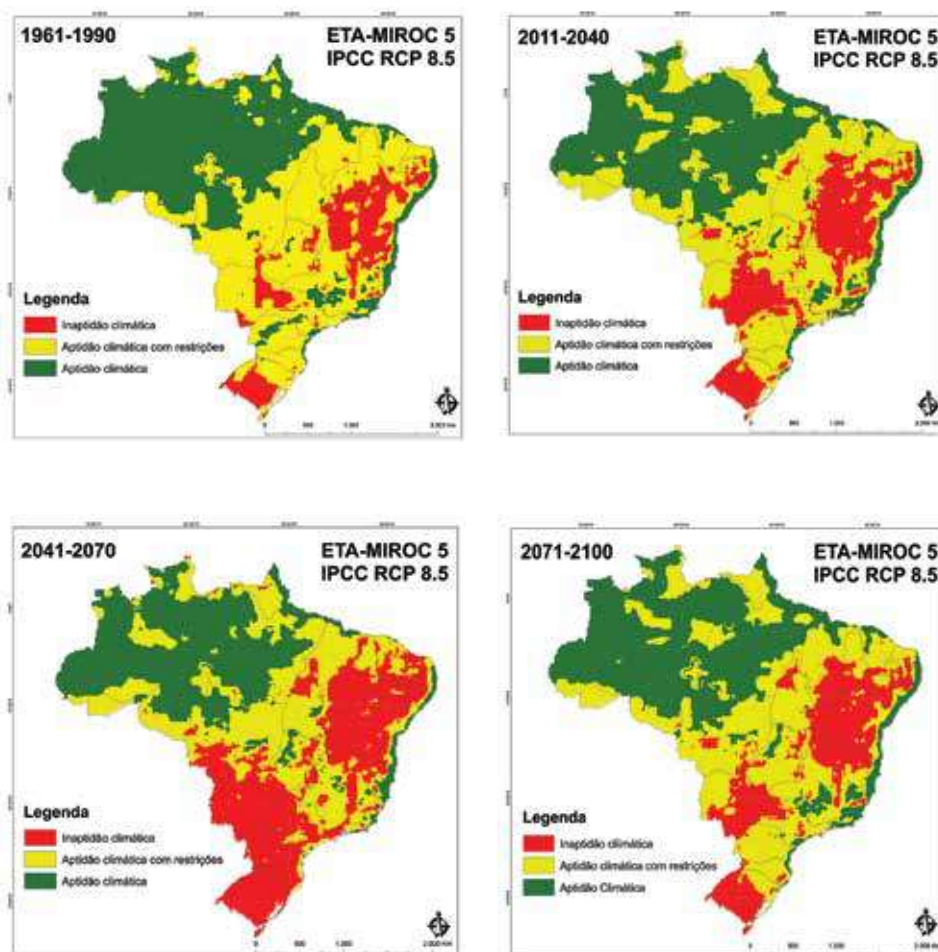
Análise estatística do valor médio regional da temperatura a 2 metros*		
Região	Mann-Kendall	Curvatura de SEN
Nordeste	0,09	+1,22°C (por período)
Norte	0,09	+1,37°C (por período)
Centro-Oeste	0,09	+1,51°C (por período)
Sudeste	0,09	+1,27°C (por período)
Sul	0,09	+0,87°C (por período)

* Trata-se da análise da média do indicador para todos os pontos modelados pelo MIROC5 nos quatro períodos temporais selecionados, com frequência dos dados de 30 anos.

A partir do equacionamento desses indicadores e alicerçados na metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2008), tornou-se possível à elaboração da figura 25, que se trata de um mapa síntese, o qual apresenta aquelas áreas do território brasileiro com inaptidão¹ para o cultivo em virtude das características climáticas projetadas, assim como aquelas áreas que terão potencial de produção, porém com necessária intervenção humana com o uso de práticas mais extensivas de irrigação, ou, então, em uma situação ideal a aptidão ao cultivo, áreas cuja produtividade chegará ao máximo possível, se as demais condições agrônômicas e ambientais e de uso da terra assim o permitirem.

¹ Considerou-se apenas o recurso climático como indicativo, para uma análise de melhor detalhamento recomenda-se inserir informações pedogeomorfológica e características agrônômicas mais específicas do gênero de interesse.

Figura 25 – Mapa síntese de classe de aptidão de cultivo do território brasileiro do Clima presente (1961–1990) simulado e clima futuro (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) por meio do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP 8.5

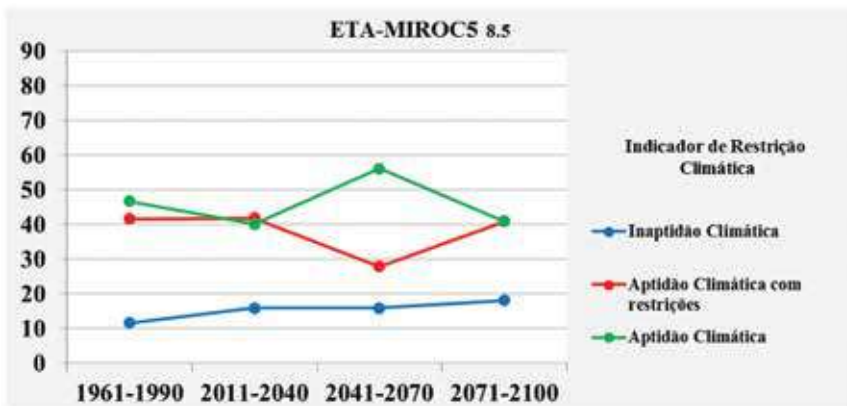


A partir dos resultados apresentados, aponta-se para o Sudeste e, de forma geral, para o litoral brasileiro como áreas propícias para a produtividade agrícola. Contudo, essas são áreas historicamente destinadas à ocupação e ao desenvolvimento do processo de urbanização, ou seja, com pouca disponibilidade e oferta de terras para a produção primária. Já o Centro-oeste, grande produtor

nacional de gêneros agrícolas, terá reduzida sua oferta de terras aptas climatologicamente ao cultivo, o mesmo acontece para o Norte e o Sul. Contudo, nesse último caso, a partir de 2071, observa-se a reversão desse quadro para o Paraná e Santa Catarina, os quais apresentaram algumas restrições hídricas, mas estará apto ao cultivo.²

Em termos quantitativos, a figura 26, demonstra que, ao longo dos períodos temporais, ampliam-se percentualmente as porções de terra classificadas como inaptas climaticamente, bem como há possibilidade de redução daquelas aptas (exceto entre 2041–2070, em que existe um aumento na disponibilidade em terras aptas). Contudo, de forma mais significativa, o que se observa é a ampliação daquelas áreas aptas climaticamente, porém que apresentam alguma restrição, sobretudo, hídrica, que deverá ser suprida a partir de técnicas de irrigação.

Figura 26 – Evolução de áreas aptas ao cultivo em território brasileiro segundo dados do modelo climático regional Eta-MIROC5 RCP8.5



² Em especial para o Sul, esse resultado se faz coerente em virtude, sobretudo, da tendência observada por meio dos testes estatísticos de redução do índice de aridez e aumento da umidade do solo.

A partir de agora, ênfase será dada aos principais gêneros da produção brasileira de biodiesel: girassol, mamona, soja e cana-de-açúcar, tomando como base as características climáticas modeladas para o futuro, segundo o modelo Eta-MIROC5 para o cenário 8.5. Por limitações técnicas e de tempo para a consecução do estudo, optou-se pela análise em escala de 30 anos dos dados; a partir daí, limitações se impõem a esta análise, visto que seria de grande valia um subsídio no intuito de compreender o comportamento vegetacional de acordo com a sazonalidade anual, aqui abdicada. Além disto, é necessário levar em conta que, por representarem dados médios, esses resultados mascaram as irregularidades climáticas tal como os extremos climáticos. Dessa forma, os cenários analisados podem subestimar os efeitos das mudanças climáticas nos gêneros abordados. Contudo, oferecem uma aproximação necessária para estimar a vulnerabilidade do setor as mudanças do clima.

3.4.1 Girassol

O girassol tolera uma temperatura ambiente entre 10°C e 34°C, o que possibilita seu plantio em regiões com elevada amplitude térmica, contudo, a temperatura ótima para o seu desenvolvimento é de aproximadamente 27°C a 28°C. Temperaturas baixas prolongam o ciclo da cultura, atrasando a floração e a maturação e quando a queda de temperatura ocorre após o início da floração podem afetar significativamente o rendimento. A produção do óleo pode ser afetada também pela variação térmica, acima de 35°C ocorre uma alteração na composição de ácidos graxos influenciando na redução do teor de óleo.

Quanto às características hídricas, o girassol é uma planta resistente a períodos de seca. As necessidades hídricas do girassol ainda não estão bem definidas, existindo informações que indicam desde menos de 200 mm até mais de 900 mm por ciclo. Entretanto, na maioria dos casos, de 500 mm a 700 mm de água, bem distribuídos ao longo do ciclo, resultam em rendimentos próximos ao máximo. O consumo de água pela cultura varia com as condições do solo. Os que têm alta capacidade de armazenar água permitem à planta tolerar maiores períodos sem chuva ou irrigação.

O sistema radicular desse gênero é profundo e bem desenvolvido lateralmente e sua capacidade de manutenção da fotossíntese mesmo em condições adversas permite tolerar curtos períodos de seca, assegurando algum rendimento em condições nas quais outras espécies nada produzem.

Devido a essas características, é possível compreender, de acordo com a figura 27, a alta produtividade desse gênero em Mato Grosso, em Goiás e, com menos expressividade, em Minas Gerais e no Rio Grande do Sul. Conforme apontam os dados para o clima presente, essas são áreas com disponibilidade de água no solo, bem como em domínios subúmidos e úmidos, com temperaturas médias próximas a 27°C.

A partir dos dados, estima-se que, devido às mudanças climáticas, a oferta de área apta para o cultivo de girassol sofrerá redução, sobretudo, nos estados de Mato Grosso e Goiás, significando uma redução de área apta de até 18% em 2100, além de queda na produtividade das demais, principalmente em função do estresse térmico ao qual estará suscetível o gênero. As regiões mais afetadas devem ser o Agreste e o Cerrado nordestino, que atualmente não apresentam expressividade nesse cultivo e que, portanto, não devem ser incentivados. Já no estado de Minas Gerais, deverão ser feitos mais investimentos, visto que as condições hídricas e de temperatura não sofreram significativas alterações, o que pode repercutir positivamente para o aumento da área atualmente cultivada.

Figura 27 – Produção de girassol no Brasil de acordo com a safra 2013/2014



Fonte: Conab (2015)

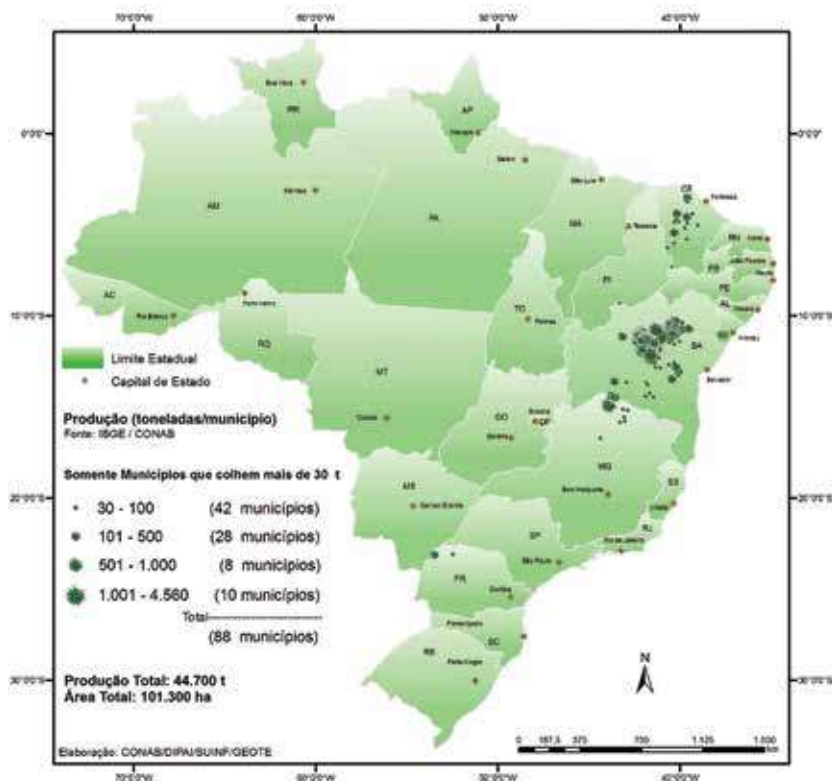
3.4.2 Mamona

A mamoneira é uma planta de hábito arbustivo, que cresce espontaneamente nos países de clima tropical e subtropical. Precisa de solos férteis e profundos para se desenvolver bem, com bom teor de umidade, mas que não se encharquem facilmente. Pode ser considerada uma planta heliófila, ou seja, deve ser plantada exposta diretamente ao sol e não tolera sombreamento. A condição ideal para cultivo de mamona inclui altitudes entre 300 e 1.500 m e temperatura média entre 20 e 30°C.

Devido a essas características, o Ceará e a Bahia (figura 28) são os maiores produtores de mamona do Brasil, por apresentarem alto teor de insolação, disponibilidade hídrica compatíveis com a demanda do gênero e enquadrarem-se no índice ente 0,7–0,9 segundo a metodologia de Hare (1993), que pode ser classificada como uma área subúmida, corroborando os dados apresentados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2013).

Em virtude dos resultados obtidos pela modelagem climática e das próprias condições de ótimo climático da mamoneira, pouca alteração ocorrerá na área apta para o cultivo. A maior repercussão será na Bahia e em Pernambuco (produtor de destaque na safra de 2011/2012), que, em função da redução do teor de umidade no solo poderá reduzir a produtividade desse gênero agrícola. Assim, o aumento da temperatura apresentada, que, por consequência, eleva a evapotranspiração, aumentando a demanda hídrica da planta, fará com que esses estados reduzam sua contribuição na produtividade nacional da mamona.

Figura 28 – Produção de mamona no Brasil de acordo com a safra 2013/2014



Fonte: Conab (2015)

Em contrapartida, baseando-se nesses dados, é possível observar o potencial de desenvolvimento deste gênero na Zona da Mata nordestina, cujas condições de insolação, orografia e disponibilidade de umidade permitiram adequado desenvolvimento e produtividade desse gênero mesmo diante do cenário de aumento da temperatura.

Em termos de umidade disponível e estresse térmico, Paraná e São Paulo também poderiam ser ótimas alternativas, contudo, a incidência de radiação solar nesses estados tende a ser menor que a da região nordestina, o que implicaria uma produtividade inferior a opção anteriormente apresentada.

3.4.3 Soja

O Brasil é o segundo produtor mundial e exportador de soja, perdendo apenas para os EUA. A cultura se adapta melhor a temperaturas do ar entre 20°C e 30°C; a menos de 10°C o crescimento vegetativo é pequeno ou nulo, já acima de 40°C ocorrem distúrbios na floração e diminuição da capacidade de retenção de vagens. Para ocorrer a floração, é necessária uma temperatura mínima de 13°C, mas acima de 30°C pode ocorrer floração precoce, deixando a planta menor do que o habitual. A época em que a semeadura é feita é um dos fatores que mais influenciam no rendimento da soja, uma vez que determina a exposição da cultura à variação dos fatores climáticos limitantes. Assim, semeaduras em épocas inadequadas podem afetar o porte, o ciclo e o rendimento das plantas e aumentar as perdas.

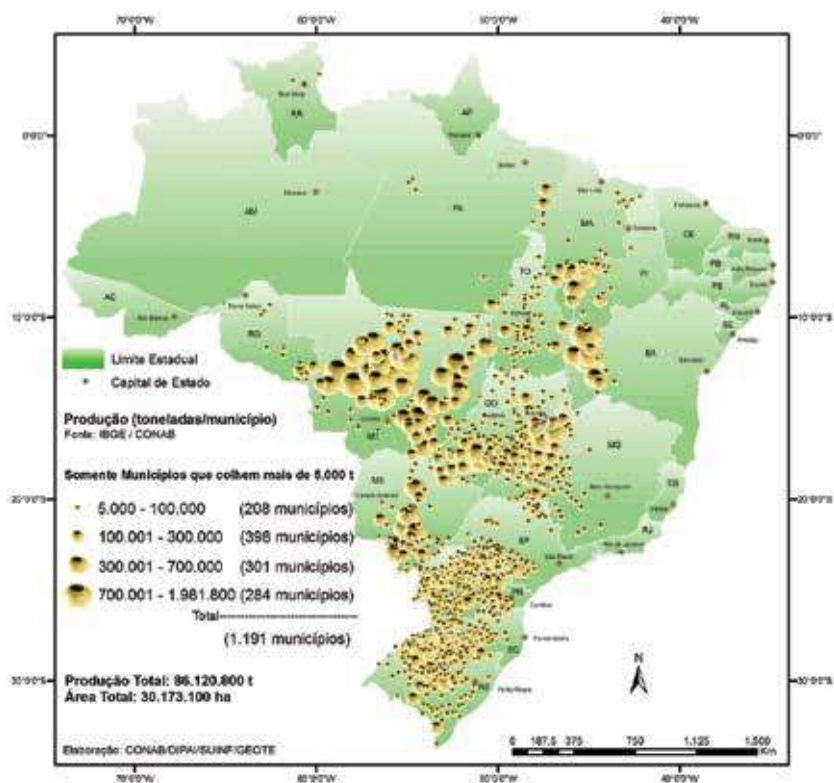
A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Défcits hídricos expressivos durante a floração e o enchimento de grãos provocam alterações fisiológicas na planta, afetando diretamente o desenvolvimento das folhas. A disponibilidade ideal para esse período é de cerca de 250 mm de água. Do contrário, pode haver queda prematura de folhas e de flores e o abortamento de vagens, resultando em redução do rendimento de grãos. No ciclo total, estima-se uma demanda de 650 mm no Centro-Oeste e de até 850 mm no Sul do país.

Segundo dados apresentados pelo Conab (2015), na figura 29, os principais produtores do grão são Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul. A produção nacional de soja vem crescendo no território nacional. Em 2007, o IBGE estimou uma colheita de 58 milhões de toneladas em pouco mais de 20,6 milhões de hectares. Já em 2012, esse valor subiu para aproximadamente 66 milhões de toneladas em pouco mais de 25 milhões de hectares.

Contudo, apesar do crescimento na produção desse gênero, a soja é a que mais deve sofrer com a elevação de temperatura e, consequentemente, na disponibilidade hídrica. As simulações mostram que as regiões do Sul do país e as localizadas nos Centro-Oeste serão fortemente atingidas. No pior cenário, as perdas

podem chegar a 40%, em decorrência do aumento da deficiência hídrica em cerca de 23% da área hoje ocupada pelo cultivo no Centro-Oeste. Já na região Sul, os índices de aridez e a umidade superficial dos solos indicam bom aproveitamentos dessa região para o cultivo desse gênero, o que não suprirá, contudo, o impacto que poderá ser ocasionado pela queda de produtividade do Centro-Oeste.

Figura 29 – Produção de soja no Brasil de acordo com a safra 2013/2014



Fonte: Conab (2015)

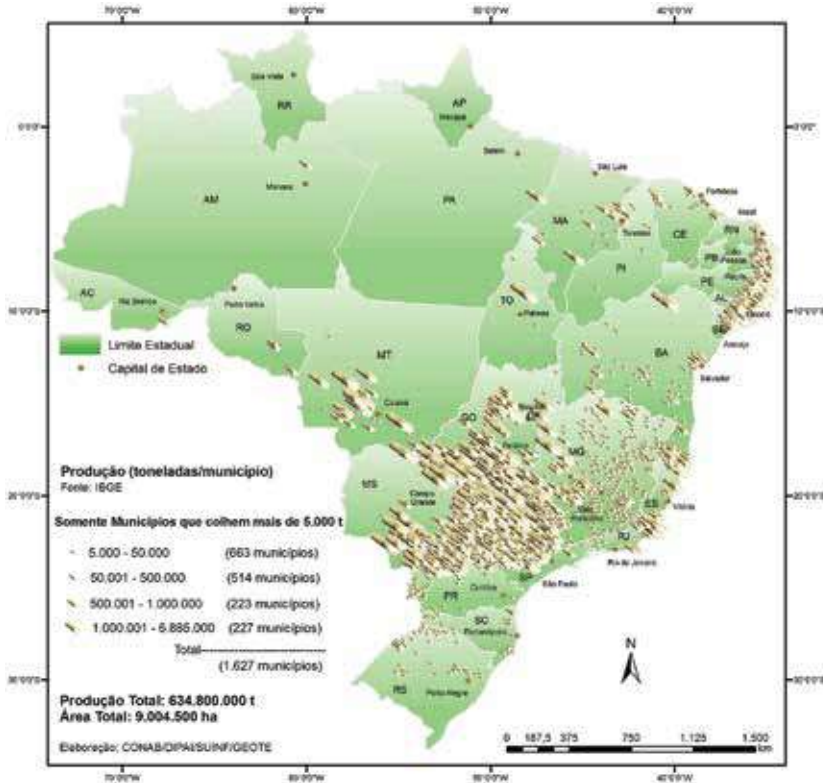
3.4.4 Cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar pode sofrer significativamente com a variação da temperatura do ar. Entre 22°C e 30°C, a planta apresenta taxas máximas de crescimento e acúmulo de biomassa. Já acima de 38°C, esses índices tornam-se praticamente nulos e, com menos de 19°C, começam a aparecer problemas de restrições térmicas. Uma das vantagens da cana com as mudanças climáticas é que a planta se beneficia dos altos níveis de CO₂ na atmosfera sem se afetar muito com as altas temperaturas.

Regiões com deficiência hídrica entre 10 mm e 180 mm por ano tendem a apresentar uma estação seca moderada, ideal para a cultura. Contudo, se essa deficiência ficar acima de 180 mm e 400 mm por ano, a área pode ser cultivada, mas haverá necessidade de irrigação.

A cultura é plantada em quase todo o país, sendo o maior produtor o estado de São Paulo, seguido do Paraná, de Minas Gerais e de Alagoas, de acordo com os dados do Conab (2015) presentes na figura 30. Por apresentar um ciclo perene, a cana sofre influência da variabilidade climática, desenvolvendo-se melhor no período quente e úmido, com intensa radiação solar, durante a fase de crescimento, seguido de um período seco na época de maturação e colheita.

Figura 30 – Produção de cana-de-açúcar no Brasil de acordo com a safra 2013/2014



Fonte: Conab (2015)

Os dados da modelagem mostram que áreas do Sul do Brasil, hoje com restrições ao cultivo da cana, podem se transformar em regiões de potencial produtivo até 2041. Alterações muito pouco significativas ocorreram para o Centro-Oeste, que, hoje, apresenta um alto potencial produtivo e que deve permanecer como área de baixo risco até 2070, porém, a partir daí, essa região será cada vez mais dependente de irrigação complementar no período mais seco. Em virtude do aumento contínuo da temperatura, a cultura atingirá um ótimo entre os *slices* temporais de 2011 e 2070, podendo ampliar em cerca de 17 milhões de hectares a área de cultivo, porém, a partir daí, os cenários climáticos projetam que condições climáticas

já não propiciarão condições tão confortáveis para o cultivo do gênero, demandando paulatinamente por irrigação para suprir a carência hídrica, o que poderá provocar queda para até 13 milhões de hectares em função do significativo aumento da temperatura no Centro-Oeste brasileiro.

A Zona da Mata nordestina, produtora histórica de cana-de-açúcar, se depender das características térmicas e disponibilidade de umidade no solo, para todos os *slices* temporais, não sofrerá impacto na área cultivada, assim como o estado de São Paulo, com excessão da porção noroeste do estado, que devido as características térmicas poderá reduzir queda na produtividade do estado e demandar uma irrigação mais intensiva até 2099.

Referências

ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (Brasil). **Boletim de Dados**, ABEEólica, São Paulo, SP, 8p, jun. 2014.

AMARANTE, O.A. C. *et al.* **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Cresesb, 2001.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: Aneel, 2008.

_____. **Banco de Informações de Geração – BIG**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/15.htm>>. Acesso em: 11 ago.2014.

_____. **Informações Gerenciais – Junho 2014**. Brasília: Aneel, 2014b. 106p.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Delaware, EUA, v.3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Mapas Temáticos**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1102&ct=2>>. Acesso em: 9 mar. 2015.

_____. **Acompanhamento de safra brasileira: Grãos, décimo primeiro levantamento, setembro 2013**. Brasília: Conab, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_09_10_16_05_53_boletim_portugues_setembro_2013.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2015.

_____. **Evolução de culturas.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1099&t=2>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento.** Brasília: Embrapa, 2008.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional (BEN) 2011.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 15 jun.2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements,** FAO irrigation and drainage paper. Rome: FAO, 1998.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Calendário de chuvas do Estado no Ceará, 2013.** Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorol%C3%B3gico/633-calend%C3%A1rio-das-chuvas>>. Acesso em: 15 jun.2015.

GLIESSMAN, S.R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável.** 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001. 652p.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and Seasonal Climatic Variations over the Northern Hemisphere and Europe during the Last Century. **Annales Geophysicae,** Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

HARE, F. K. **Climate and Desertification: A Revised Analysis.** World Climate Program. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 1983.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2011.** Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf>. Acesso em: 21 set. 2014.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group II Report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001.86 p.

_____. **Climate Change 2007: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [CORE WRITING TEAM, PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. 104 p.

_____. **Climate change 2014: Mitigation of climate change.** Contribution of working group III to the fifth assessment report of intergovernmental panel on climate change. [Edenhofer, O. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, Reino Unido; Nova Iorque: Cambridge University Press, 2014.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York:Oxford University Press, 1989.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on titled surfaces. **Solarenergy**, v.19, n. 4, p.325-329, 1975.

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

PORFIRIO, A. C. S. **Estimativas de irradiação solar direta normal mediante satélite: um estudo para o Nordeste brasileiro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – PGMET, INPE, Cachoeira Paulista,2012.

SCHAEFFER, R. *et al.* **Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Brasileira, 2008. 67p.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. **Journal of American Statistics Association**, Alexandria: v. 63, n.1, p. 1379-1389, 1968.

SNEYERS, R. **Sur L'analyse Statistique des Series D'observations**. Genève: OrganisationMétéorologique Mondial, 1975. p. 192.

SOARES, V. S. **Introdução à Hidrologia de Florestas**.São José dos Campos: INPE,2004. (cap. 7). Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/dsr/vianei/hidrologia/PPTs_PDFs>. Acesso em: 1 set. 2015.

SOUZA, O.T.L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para determinação do calor latente com aplicação em sistemas de irrigação**. 2004. 113 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – UNESP, 2004.

THORNTHWAITE, C.W. Atlas of climatic types in the United States. **Mixed Publication**, 421, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1941.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration bay satellite remote sensing: A case study in HupselseBeek**. 2005. Dissertation (Master of Science) – International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, Wageningen, Netherlands, 2005.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e confiança do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud), via Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que possibilitou a elaboração do presente estudo, no contexto do Projeto Pnud BRA/10/G32, passo essencial no âmbito do planejamento estratégico nacional. Ao INPE e seus consultores, pela disponibilidade em atender as necessidades e questionamentos quanto aos dados

extraídos da modelagem climática. A Rede CLIMA, sub-rede Energias Renováveis, coordenada pelo professor Luiz Pinguelli Rosa e pelo professor Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas. Ao Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (Ivig/Coppe/UFRJ), pela disponibilização da infraestrutura necessária para a consecução dos resultados. E, finalmente, ao professor André F. P. Lucena (PPE/Coppe/UFRJ), pelos esclarecimentos acerca do trabalho desenvolvido por ele, na Segunda Comunicação Nacional, favorecendo a continuidade desta produção.



CAPÍTULO 7

Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais no Brasil, no contexto de mudanças climáticas

Nathan S. Debortoli

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Campus Trindade

Pedro Ivo M. Camarinha

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Regina R. Rodrigues

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Campus Trindade

José A. Marengo

Centro de Alerta e Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemanden)

Resumo

É um primeiro exercício para o diagnóstico das regiões mais vulneráveis à ocorrência atual e futura dos dois tipos de desastres que mais causam óbitos no Brasil: (a) inundações bruscas, enxurradas, alagamentos; e (b) os movimentos de massa. O estudo se baseia em uma visão integrada dos desastres a partir de variáveis e indicadores que representam diferentes dimensões da vulnerabilidade: climática, físico-ambiental e socioeconômica. A análise é feita, primeiramente, para o tempo presente, em que o objetivo foi estruturar um índice composto representativo dos desastres já registrados no Brasil. Em seguida, a análise é feita para o futuro, em que foram utilizados dados de modelagem climática de projeções que consideram os cenários RCPs 4.5 e 8.5 do relatório AR5 do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Todos os dados climáticos utilizados no trabalho são provenientes dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Eventos extremos. Inundações. Movimentos de massa. Desastres naturais. Mudanças climáticas.

1 Introdução

1.1 Eventos extremos e desastres naturais

Valores anormais de um estado climático médio observado ao longo do tempo são comumente chamados de “eventos extremos”. Esses eventos ocorrem em escalas temporais que variam de horas, dias e, até mesmo, milênios, sendo que os mais importantes para as atividades humanas são os extremos de curto prazo (relacionados com o tempo) e os de médio prazo (relacionados com o clima), pois são eventos com potencial para causar impactos significativos (MARENGO, 2009a).

Os eventos extremos de tempo e clima são também um aspecto integral da variabilidade climática, e sua frequência e intensidade podem variar de acordo com a mudança climática (MARENGO *et al.*, 2009a), seja ela natural (como *El Niño* e *La Niña*) ou induzida pelas ações antrópicas. Ao se deslocarem para locais onde há qualquer tipo de atividade humana, esses eventos criam uma condição de perigo/ameaça (inundações, deslizamentos de terra, entre outros). Dependendo das vulnerabilidades existentes, esses eventos podem impactar sistemas humanos ocasionando desastres naturais.¹ Dessa forma, a ocorrência de desastres suscita e expõe a vulnerabilidade das populações, alterando o funcionamento das comunidades e o bem-estar social (BRASIL, 1999abc; VEYRET, 2013).

É importante ressaltar que um desastre também pode ocorrer devido a eventos não extremos, pois os impactos causados dependem diretamente de outros fatores não climáticos. Nesse sentido, as ações e omissões humanas contribuem para intensificar ou agravar fenômenos potencialmente indutores de desastres, os quais também se caracterizam a partir da intercorrência de fenômenos naturais adversos, atuantes sobre condições ambientais já degradadas pelo homem.

¹ Neste trabalho a definição de desastres naturais utilizada será baseada em Alexander (1993) e Tonbin (2004), em que são conceituados como: o resultado de eventos naturais intensos ou extremos que atingem qualquer sistema social que não seja capaz de refleti-los, absorvê-los e(ou) amortecê-los, causando impactos significativos para a conservação do equilíbrio social, econômico, físico, psicológico ou ambiental, sendo difícil a recuperação para a condição existente antes da ocorrência do tal evento. Seus impactos dependerão das vulnerabilidades existentes para cada indivíduo, propriedade ou grupo social atingido.

1.2 Os desastres naturais no Brasil

No Brasil, os desastres que mais causam prejuízos estão relacionados aos eventos climáticos extremos (ECEs)² de ordem hidrometeorológica. Esse fato se dá pelo território localizar-se em áreas tropicais de clima quente, propícias aos grandes acumulados de precipitação durante a estação chuvosa (verões austrais), e ao grande potencial de evapotranspiração relacionado às altas temperaturas e ao déficit pluviométrico de suas regiões semiáridas (MARENGO, 2007).

Esses eventos pluviométricos podem causar impactos de proporções catastróficas, seja pela geodinâmica natural dos solos e(ou) a grande antropização de áreas de risco, seja por conta de deficiências estruturais e variáveis institucionais não estruturais de planejamento e gestão urbana (BRASIL, 2002, 2003, 2012; CARVALHO *et al.*, 2007; TOMINAGA *et al.*, 2009; PBMC, 2013).

Nesse contexto, as variáveis socioeconômicas, institucionais e geoambientais de cada região geográfica e os diferentes tipos de organizações sociais também possuem um papel importantíssimo para a compreensão de como esses eventos extremos podem desencadear desastres. São essas características que determinarão as condições que cada sociedade tem para receber e suportar, ou não, os impactos causados pelos eventos extremos. Essa visão se torna mais clara ao pensar que todas as nações do mundo estão susceptíveis (mesmo que em graus diferentes) de serem atingidas por eventos extremos, contudo, são os países em desenvolvimento e com alto índice de pobreza os mais impactados (VEYRET 2013).

Dentre alguns tipos de desastres que afetam o Brasil, podemos destacar as inundações bruscas/enxurradas, os alagamentos e os movimentos de massa (BRASIL, 2002, 2003, 2010; TOMINAGA *et al.*, 2009). Segundo o Atlas de Desastres Naturais do Brasil (UFSC, 2013a) estes foram os desastres que mais causaram óbitos no período entre 1991–2012. Existem outros tipos de desastres, que também afetam grande parte da população brasileira, como as secas e estiagens ou as inundações graduais (também chamadas de cheias). Entretanto, o foco deste trabalho será

² Neste documento, ECEs relacionam-se com os fenômenos extremos de ordem meteorológica e climatológica.

mantido nas inundações bruscas/enxurradas, nos alagamentos, e nos movimentos de massa, pois são aqueles que requerem uma avaliação mais emergencial visando à redução dos impactos, sobretudo, da ocorrência de óbitos.

Os desastres causados por fenômenos pluviométricos extremos estão relacionados a condicionantes naturais como, por exemplo, as formas de relevo, a rede de drenagem da bacia hidrográfica; a intensidade, a quantidade, a distribuição e a frequência das chuvas; as características e o teor de umidade; a presença ou ausência de cobertura vegetal; entre outros. Quanto aos condicionantes relacionados às atividades antrópicas, cita-se: o uso e a ocupação irregular nas planícies e nas margens de cursos d'água; a disposição irregular de lixo nas proximidades de corpos hídricos; as alterações na bacia hidrográfica; e os processos de erosão do solo e assoreamento.

Devido à grande diversidade de cenários que compõem a realidade dos municípios brasileiros, há também uma heterogeneidade a respeito da distribuição de desastres pelo território nacional. Como forma de sintetizar estas características, a seguir está apresentada a tabela 1 elencando os principais tipos de desastres para cada região brasileira.

Tabela 1 – Regiões do Brasil e as principais características relacionadas aos desastres naturais

Região	Principais tipos de desastres	% do total de pessoas afetadas	% do total de óbitos	Características relevantes e determinantes do risco a desastres
Sul	Diversidades muito grande, destacando-se as secas e estiagens, inundações bruscas, vendavais e ciclones	22,68	13,43	Severamente atingida por tempestades, vendavais e granizo. É a única atingida por ciclones (zona costeira). É afetada por muitos sistemas climáticos de instabilidade e também por bloqueios atmosféricos. O vetor ameaça é determinante na intensificação dos risco atual e futuro.
Sudeste	Movimentos de massa, inundações, enxurradas e alagamentos. As secas merecem destaque no Norte e Nordeste de Minas Gerais.	22,17	66,56	Alta densidade demográfica aliada à ocupação desordenada em áreas de risco (alta exposição). Grandes contrastes sociais e alta vulnerabilidade em diversos grupos sociais. Apresenta o maior número de mortes/milhão de habitantes, cerca de 28,50. Do total de registros do país, o SE teve 79% dos registros de movimentos de massa no período 1991–2012, destacando-se o estado de MG com 60%.
Centro-Oeste	Diversificado. Destaque para inundações graduais, secas, enxurradas e de erosão, além dos recorrentes incêndios florestais.	4,09	0,41	Região com vocação agrícola, baixa densidade populacional (baixa exposição). Série histórica insuficiente para identificar padrões da evolução dos desastres. Merece atenção devido ao seu recente desenvolvimento, que pode trazer novas vulnerabilidades e aumento da exposição.
Nordeste	Majoritariamente as secas, devido à dimensão territorial. Mas as inundações (graduais ou bruscas) se destacam pela magnitude dos impactos.	44,09	15,84	Alta variabilidade interanual de chuvas e baixa capacidade de armazenamento de água no solo, sendo estes fatores limitantes para o desenvolvimento local (ameaça). Regiões metropolitanas são muito expostas e vulneráveis a inundações, desalojando e desabrigoando muitas pessoas e causando significativo número de óbitos. Região com o maior número de pessoas afetadas por desastres (47,63%).
Norte	Inundações (graduais e bruscas) e secas	6,97	3,80	População ribeirinha é fortemente atingida pelas inundações (exposição), havendo muitos problemas de saúde que são desencadeados em sequência (vulnerabilidades sociais). As principais atividades econômicas são diretamente impactadas pelas secas (exposição e vulnerabilidade econômica)

Nota: as estatísticas se referem ao período de 1991–2010 (UFSC, 2013a).

O apanhado histórico do último século demonstra que todas as regiões brasileiras sem exceção foram palco de extremos climáticos de maior ou menor intensidade (MARENGO, 2007). Citando alguns dos episódios severos podemos incluir: as secas na Amazônia nos anos de 2005 e 2010 (MARENGO *et al.*, 2011); o furacão Catarina no ano de 2004 (MCTAGGART-COWAN *et al.*, 2006); as enchentes e os deslizamentos de terra em 2008 e 2009, produzidos por chuvas torrenciais no vale do Itajaí em Santa Catarina (FRANKE *et al.*, 2009) e em 2011 na região Serrana do estado do Rio de Janeiro (DOURADO *et al.*, 2012); episódios de estiagem (veranicos) no oeste dos estados do Sul (GRIMM *et al.*, 1998; DIAZ *et al.*, 1998); secas prolongadas e enchentes súbitas no semi-árido nordestino (RODRIGUES; MCPHADEN, 2014). Todos se caracterizam como eventos extremos sem precedentes, e que ocasionaram impactos negativos de grande severidade para a sociedade, seja na forma de prejuízos financeiros ou vidas humanas.

Essas ocorrências alertam para uma possível relação das mudanças climáticas no aumento da frequência e magnitude dos ECEs. Esse aumento, juntamente com o crescimento populacional, e a invasão de áreas de risco para assentamentos humanos, ou para produção agrícola, resultam em uma ameaça real para milhares de pessoas anualmente (GOLDEMBERG 2000; ROBERTS 2009; FEARNSIDE, 1989, 1997; REIS; MARGULIS 1991; HECHET *et al.*, 1993).

1.2.1 Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos

Esses três tipos de desastres foram agrupados em uma só categoria pelo Atlas de Desastres Naturais do Brasil (UFSC, 2013a), devido à similaridade dos processos físicos dos eventos que os deflagram e à característica similar de acúmulo de grande e volume de água em poucas horas.

As inundações bruscas podem ser descritas como o extravasamento das águas do canal de drenagem para áreas marginais quando a enchente atinge a cota acima do nível máximo da calha principal do rio (BRASIL, 2003). Já as enxurradas podem ser caracterizadas como um processo hidrológico em que o escoamento superficial é concentrado e com alta energia de transporte (BRASIL, 2003). Quando

incidem sobre centros urbanos, são normalmente decorrentes da deficiência do sistema de drenagem de águas pluviais (ocasionado por chuvas intensas), podendo, ou não, estarem associadas com os processos de natureza fluvial. São classificadas também como processos de escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte.

Ambos eventos são normalmente provocados por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, causando súbita e violenta elevação dos caudais e, por consequência, o seu transbordamento. Esses fenômenos exigem um monitoramento complexo, devido aos danos humanos e materiais mais intensos do que as inundações graduais.

Os alagamentos, por sua vez, causam impactos menores e são definidos pelo acúmulo momentâneo de águas em uma dada área (normalmente) por problemas no sistema de drenagem (BRASIL, 2003). Podem ou não estar associados com processos de natureza fluvial e o depósito de lixo na superfície (IPT, 2004; MARENGO *et. al.*, 2015).

1.2.2 Movimentos de massa – Deslizamentos de terra

Existem vários fenômenos que se enquadram na categoria dos movimentos de massa, sendo classificados como processos geológicos-geotécnicos relacionados ao movimento de descida de solos, rochas, detritos e(ou) material orgânico, sob o efeito da gravidade. De uma forma genérica, no Brasil, é comum relacionar esses fenômenos aos chamados deslizamentos de terra, os quais têm sido responsáveis pelo maior número de vítimas fatais no Brasil (BRASIL, 2012). Normalmente, são induzidos pelas atividades antrópicas e, portanto, chamados de desastres mistos.

As chuvas acumuladas durante três ou quatro dias são as mais efetivas na preparação do terreno ao processo de escorregamento devido à redução da resistência e o cisalhamento. Sendo que eventos extremos de um ou dois dias também podem disparar o processo, dependendo das condições de umidade do solo.

Os deslizamentos de terra são movimentos gravitacionais de massa de solo que ocorrem de forma rápida. As condicionantes dos deslizamentos podem ser divididas em dois grupos: (a) condicionantes naturais predisponentes com

características intrínsecas (geológicas/geomorfológicas e hidrológica/climática) do meio físico natural; e (b) agentes efetivos com condicionantes antrópicas, por meio de elementos responsáveis pelo desencadeamento dos movimentos de massa preparatórios e imediatos. Esses movimentos podem apresentar diversos formatos (cunha, planares e circulares), de modo que os mais recorrentes são os escorregamentos planares rasos, que ocorrem em solos pouco espessos e jovens, geralmente encontrados em regiões de relevo escarpados, bastante acidentados.

Dentre os principais fatores do agravamento dos riscos de deslizamento estão: lançamento de águas servidas; vazamento de redes de abastecimento de água; lançamento concentrado de água pluviais; infiltração de água de fossas sanitárias; cortes realizados com declividade e altura excessivas; execução inadequada de aterros; deposição inadequada de lixo; e remoção descontrolada da cobertura florestal. Os escorregamentos costumam ocorrer em áreas de encostas ocupadas em taludes de corte, aterros e taludes naturais agravados por ações antrópicas (CARVALHO *et al.*, 2007; BRASIL, 2002 e 2003; UFSC, 2013b).

Apesar das políticas e intenções inovadoras na luta contra o aquecimento global e as mudanças climáticas (WWF, 2010), recentes deliberações e modificações ambientais e territoriais brasileiras, como o caso da alteração do Código Florestal de 1965 (SPAROVEK *et al.*, 2011), e a inaplicabilidade ou baixa implementação dos planos diretores nos municípios (LACERDA *et al.*, 2011) denotam gargalos políticos e falta de capilaridade empírica no que toca à aplicação de políticas públicas de prevenção e de adaptação aos cenários climáticos futuros. Tal omissão, no que concerne à ocupação ordenada do solo das cidades e o uso insustentável da terra, tenderá a agravar a vulnerabilidade das populações aos eventos extremos e, conseqüentemente, aos desastres.

1.3 Eventos extremos e as mudanças climáticas

Desde a década de 1990, o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) informa, por meio de seus relatórios e projeções de cenários climáticos, maior frequência dos extremos de

temperatura e precipitação no planeta, tanto para o clima presente quanto para o futuro (IPCC, 2001, 2007, 2013). Evidências climáticas coletadas a partir de 1950 sugerem uma variabilidade nas alterações dos extremos climáticos, entretanto, a confiança em mudanças observadas nos extremos depende da qualidade e da quantidade dos dados, bem como da disponibilidade de estudos que analisam esses dados, podendo variar de região para região e para diferentes extremos (IPCC, 2013).

Apesar das flutuações do clima que alteram naturalmente a frequência desses eventos em certos períodos, já é constatado como fato que atividades antrópicas (como a emissão de gases de efeito estufa GEEs e as mudanças do uso da terra) corroboram na intensificação de alguns fenômenos climáticos, como secas, tornados, enchentes, vendavais, e na alteração da circulação de massas de ar em larga e mesoescala (HANSEN *et al.* 2010). Em concordância com as projeções dos últimos cenários pessimistas (cenário RCP 8.5) do relatório AR5 do IPCC (2013), algumas regiões do globo já demonstram sinais de mudanças com episódios frequentes de estiagens, eventos de precipitações severas e temperaturas extremas ocorrendo com maior frequência e magnitude.

No que tange aos efeitos das mudanças climáticas (MC), estas poderão induzir à mudanças na frequência, na intensidade, na dimensão espacial, na duração e no calendário dos ECEs, resultando em extremos sem precedentes (IPCC, 2013). Mas é importante ressaltar que os eventos extremos são raros, o que significa que existem poucos dados disponíveis para fazer avaliações referentes a tais mudanças. Quanto mais raro o evento, mais difícil é identificar suas mudanças em longo prazo. As mudanças nos extremos podem estar associadas a alterações na média, na variância, ou, mesmo, na forma de distribuições de suas probabilidades (CARVALHO *et al.*, 2007; PBMC, 2013).

Porém, conforme explicado nos itens anteriores, os ECEs dependem de todo um arranjo físico-ambiental e de características socioeconômicas para derivar na situação de desastre; ou seja, a análise de uma possível relação das MC com o aumento da ocorrência de desastres naturais é algo muito complexo, pois deve considerar todos estes aspectos de forma integrada.

Além disso, é importante ressaltar que alguns tipos de desastres são fortemente induzidos pelas ações antrópicas que ocorrem a nível local, o que dificulta ainda mais atribuir relações entre as MC e a ocorrência de desastres. Entretanto, todos esses aspectos, climáticos ou não, compõem a vulnerabilidade das populações no que tange aos desastres naturais que podem ocorrer no futuro.

Como forma de compreender melhor como são essas relações para cada tipo de desastre que atinge o Brasil, foi elaborada a tabela 2. Basicamente, as informações apresentadas são uma síntese do relatório especial de extremos climáticos do IPCC (2013) e o último relatório AR-5 (IPCC, 2013) somando informações de outros estudos relevantes nas discussões de mudanças climáticas e eventos extremos em nível global (HELD; SODEN, 2006; HAYLOCK *et al.*, 2006; TRENBERTH e SHEA, 2006) em nível continental/regional (LIEBMANN, 2001; CARVALHO, 2002; VINCENT *et al.* 2005; GROISMAN *et al.*; 2005) e outros em nível local que avaliam também impactos na ocorrência dos processos físicos relacionados aos desastres (SILVA; GUETTER, 2003; VICENTE; NUNES, 2004; MARCELINO *et al.*, 2004. MARENGO *et al.*, 2009b; OBREGÓN *et al.*, 2014). As estatísticas contidas nas colunas 2 e 3 são provenientes do levantamento feito pelo Ceped/UFSC (2013a) durante o período compreendido entre 1991–2012 e ajudam na avaliação de prioridades para as medidas de adaptação. Para ponderar a leitura da tabela 2, recomenda-se a leitura do boxe SPM.2, intitulado *Treatment of Uncertainty*, no relatório SREX do IPCC (2012). Nele, estão contidas as informações referentes à definição dos graus qualitativos de confiança e de probabilidade que estão apresentados nas colunas 6, 7 e 9 da tabela 2. Do AR5, foi utilizado particularmente o capítulo 14 (IPCC, 2012), que trata das análises regionais, incluindo a América do Sul.

Tabela 2 – Síntese de informações relevantes às questões relacionadas aos

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Tipologia de desastres naturais	% pessoas afetadas	% óbitos	Eventos climáticos deflagradores de [1]	Efeitos das MC relacionados a [4]
Movimentos de massa (deslizamentos de terra)	1,79	15,6	Eventos extremos de precipitação (tanto aqueles que ocorrem em poucas horas como ao longo de alguns dias).	Aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos relacionados.
Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos	20,66	58,15	Eventos extremos de precipitação em períodos curtos de tempo (principalmente em poucas horas).	Aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos relacionados.
Vendavais e ciclones (efeitos do vento)	7,07	3,74	Tempestades acompanhadas de vento forte, às vezes, com granizo.	Aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos relacionados.
Secas	51,31	7,57	Períodos de estiagem, má distribuição das chuvas, aumento da temperatura (aumento da evapotranspiração).	Intensificação dos eventos Enso, anomalias de TSM no Atlântico Tropical ou Subtropical (diminuição das chuvas), deslocamento dos fluxos de umidade e aumento de temperatura da superfície terrestre.
Cheias	12,04	13,4	Aumento da precipitação nos regimes sazonais.	Intensificação dos eventos Enso e anomalias de TSM no Atlântico Tropical ou Subtropical, causando alterações no regime de precipitação sazonal (aumento).

tipos de desastres que atingem o Brasil, eventos extremos e mudanças climáticas

[6]

Principais interferências antrópicas e vulnerabilidades que favorecem a deflagração e impactos do processo apresentado em [1]

Cortes irregulares de taludes, processos erosivos na base dos taludes, desmatamento de encostas, sistemas de drenagem de águas pluviais mal planejados, sobrecarga devido a construções em áreas de risco, entre outros.

Desmatamento em áreas de APP, que favorecem para a supressão de serviços ecossistêmicos (ex.: diminuição do potencial de infiltração, aumento do escoamento superficial etc.), uso degradante do solo, deficiência do sistema de águas pluviais, grandes superfícies impermeabilizadas, entre outros.

Não há relação direta. A interferência antrópica se dá por meio da emissão de GEE e mudanças do uso e cobertura do solo, os quais estão relacionados com as mudanças climáticas globais e regionais/locais.

Mudanças do uso e cobertura do solo. Entretanto, a “seca”, no contexto de um desastre, depende muito mais das **vulnerabilidades** dos grupos sociais afetados que das condições climáticas (BRASIL, 2002). O uso degradante do solo também é visto como um fator que favorece, indiretamente, no armazenamento de água no solo e pode contribuir para esse cenário.

Obras de engenharias que podem tanto favorecer quanto conter (diques e reservatórios); interferências no meio ambiente, principalmente mudanças no uso e cobertura da terra que não aparecem claramente nos registros históricos.

[9]

Há relação das Mudanças Climáticas com as ocorrências de desastres [1]?

Pouco provável. Entretanto, é considerado muito difícil fazer essa avaliação separadamente devido aos diversos condicionantes antrópicos e também às **vulnerabilidades**, pois ambos são variáveis ao longo do tempo e espaço. Há poucos registros e métricas (indicadores) para realizar tal análise com resultados conclusivos. O aumento da **exposição** também é considerado um fator-chave para os dois tipos de desastres.

Provável. Mesmo com as incertezas, as ocorrências sem precedentes na região Sul durante a última década são evidências significativas (intensificação do vetor **ameaça**).

Improvável. Mas as mudanças nos padrões de temperatura e precipitação, tanto para as observações quanto para a modelagem, têm sido coerentes com a compreensão teórica da resposta hidrológica ao aquecimento global, em que regiões secas se tornam ainda mais secas e as úmidas se tornam ainda mais úmidas, em um mundo em aquecimento. Ainda é preciso avaliar com afinco a evolução dos desastres para ter conclusões significativas.

Portanto, fica evidenciado que existe uma relação da vulnerabilidade aos desastres e os possíveis efeitos das mudanças climáticas, de forma que é preciso avaliar todos os aspectos não climáticos que estão interrelacionados e que interferem nesse processo. É justamente a partir dessa hipótese que o presente trabalho foi elaborado, de modo que os detalhes metodológicos para tal avaliação estão apresentados nas próximas seções.

2 Objetivo e importância do estudo

Tendo em vista a relação entre as ocorrências dos eventos extremos e os possíveis desdobramentos para condições que caracterizam desastres naturais, estudos que avaliem a vulnerabilidade dos sistemas humanos têm se tornado cada vez mais pertinentes. É, nesse sentido, que o presente trabalho foi estruturado, o qual objetiva avaliar como as mudanças climáticas podem aumentar ou diminuir a vulnerabilidade aos desastres naturais no Brasil, incluindo na análise outras nuances (ou dimensões) ambientais e socioeconômicas.

Existem diversas justificativas para examinar a pertinência de vulnerabilidade aos desastres naturais no contexto das mudanças climáticas. A avaliação da vulnerabilidade como um todo (objeto de estudo deste trabalho) já foi aceita como requisito para o desenvolvimento efetivo da capacidade de gerir situações de emergência, sendo que a avaliação específica da vulnerabilidade social é reconhecida como sendo essencial para a compreensão dos riscos relacionados aos fenômenos e eventos extremos que podem alcançar a proporção de desastres (BLAIKIE *et al.*, 1994). Nos EUA, o furacão Katrina, como outros de intensidade devastadora, evidenciou que os efeitos sociais associados às tempestades e às inundações que impactam as populações socialmente vulneráveis foram, e têm sido, lamentavelmente negligenciados e subestimados (DUNNING, 2009). Isso também foi observado na Europa, como no caso da grande inundação na Bacia do Rio Elba, em 2002, caracterizada como a maior inundação da história da Alemanha (SCHWARZE; WAGNER, 2007), ou nas ondas de calor que atingiram o continente europeu em 2003, chegando a matar cerca de 50 mil pessoas (KOSATSKY, 2005); ou, ainda, no Brasil, com o desastre ocorrido na região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, considerado o maior desas-

tre climatológico e geotécnico do Brasil, com 890 mortes e cerca de 35 mil pessoas desabrigadas (ABMS, 2011).

Nestes e em muitos outros exemplos, a vulnerabilidade social é mais aparente depois que um evento extremo acontece, quando diferentes padrões de sofrimento e de recuperação são observados entre certos grupos da população (CUTTER *et al.*, 2003). Embora todas as pessoas que vivem em áreas de risco sejam vulneráveis, os impactos sociais da exposição ao risco caem desproporcionalmente sobre as pessoas mais vulneráveis da sociedade: pobres, minorias, crianças, idosos e pessoas com deficiência. Esses grupos são os menos preparados para uma situação de emergência, pois possuem menos recursos para se preparar para uma situação de perigo; tendem a viver nos locais de maior risco, em habitações precárias; e também há a falta de conhecimento/aprendizado, bem como de conexões sociais e políticas necessárias para tirar proveito dos recursos que poderiam acelerar a sua recuperação em uma situação de desastres (DUNNING, 2009; NRC, 2006).

Existe, portanto, a compreensão de que a verdadeira prevenção de desastres naturais e mitigação de seus impactos terão de abordar não apenas os fatores hidrometeorológicos e ambientais, mas também os fatores econômicos, sociais e políticos que influenciam a sociedade em geral e suportam os impactos causados por eventos extremos (WHITE, 2004). Para desenvolver estratégias eficazes é essencial compreender os processos e fatores específicos que podem alterar os impactos causados por desastres naturais. Segundo Van der Veen *et al.* (2009), alguns fatores podem ser identificados como significantes para mudar as abordagens de gestão de risco e de resposta aos desastres, incluindo: (a) o custo econômico e financeiro crescente dos desastres, o aumento de impactos potenciais e a percepção de que não é possível se proteger contra todos os tipos de catástrofes naturais; (b) a densidade de infraestrutura existente e o número absoluto de pessoas que vivem em áreas de risco; (c) a expansão e intensificação do uso da terra, o aumento dos conflitos entre o uso da terra para fins socioeconômicos e a política de mitigação de riscos; (d) a necessidade de uma melhor compreensão das inter-relações e dinâmicas sociais de percepção de risco, preparação e seus impactos; (e) disparidades de riqueza e *status* socioeconômico (desigualdade social); (f) a compreensão da importância dos impactos considerados intangíveis e da necessidade crescente de apoio pós-desastre e recuperação.

Sendo assim, há uma necessidade de determinar: quem ou o que são os elementos de vulnerabilidade social; como é possível identificar grupos sociais vulneráveis e quais grupos se beneficiariam mais de ter sua capacidade de resistência aumentada; e quais atributos ou capacidades pessoais ou sociais podem reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência.

3 Metodologia de base para ambas análises

A questão da vulnerabilidade frente às mudanças climáticas pode ter várias dimensões, tais quantas forem necessárias para representar o problema em questão e a escala de interesse, o que torna sua avaliação uma tarefa bastante complexa quando se deseja estudar um país como o Brasil, de dimensões continentais. Muitas vezes, a dificuldade em representá-la está na definição de métricas/variáveis que possam refletir parte dessa vulnerabilidade e que também possam interagir com outras, de dimensões diferentes, pois esta análise requer uma visão interdisciplinar bem direcionada dentro da temática dos desastres. Além disso, no Brasil existe um gargalo metodológico que se estreita na disponibilização de bases de dados confiáveis e padronizadas que possam ser trabalhadas em âmbito nacional.

Antes mesmo de se estabelecer qual a metodologia seria utilizada neste estudo, foi necessário identificar todas as bases de dados disponíveis, sejam elas de domínio público ou fornecidas mediante solicitação, e identificar também suas limitações quanto à forma de manuseá-las. Após uma longa busca pela aquisição dos dados de interesse, seguida da compilação e análise destes dados espaciais, ficou definido que a metodologia para avaliar a vulnerabilidade do Brasil aos desastres naturais para a Terceira Comunicação Nacional de Mudanças Climáticas se basearia em três dimensões da vulnerabilidade: (i) climática, expressada pela combinação dos índices de extremos climáticos fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE); (ii) socioeconômica, representada pela combinação de índices socioeconômicos fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010); (iii) ambiental, baseada no cruzamento de diferentes mapas temáticos, variáveis físicas e ambientais (exceto a climática abordada no ponto i) que refletem a suscetibilidade de cada ponto

geográfico em deflagrar uma tipologia de desastre. Embora a terminologia utilizada neste estudo seja diferente daquela sugerida no quarto relatório (AR4) do IPCC, elas são análogas, de forma que as dimensões deste estudo representam a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa, respectivamente.

Além disso, ficou definido que, para a análise de vulnerabilidade dos desastres no Brasil, não seria pertinente utilizar apenas um único índice e, portanto, foram estruturados dois índices diferentes. Sendo assim, foi estabelecido – juntamente com os interesses da Subrede de Desastres Naturais da Rede CLIMA – que, dentre os desastres que atingem o Brasil, seriam alvo de estudo apenas os dois desastres que mais causam impactos relacionados a perdas humanas e financeiras, sendo estes: (i) as inundações bruscas, as enxurradas e os alagamentos; e (ii) os que envolvem movimentos de massa (BRASIL, 2003, 2012).

3.1 Hierarquização das variáveis

Para definir um índice de vulnerabilidade aos desastres, é necessário estabelecer pesos (hierarquização) para cada uma das variáveis utilizadas na análise, com o intuito de se obter uma relação de significância entre cada uma delas, e o fenômeno/ameaça que se deseja avaliar (ex.: inundações). A técnica mais indicada para essa etapa seria a Regressão Linear Multivariada (RLM), na qual são feitas análises estatísticas para encontrar níveis desconhecidos de correlação das variáveis envolvidas, testando também uma hipótese de possível relação de causa e efeito entre elas. Se constatada tal relação, um modelo matemático poderia ser ajustado e permitiria descrever uma determinada variável em relação às demais conhecidas. Para avaliar a vulnerabilidade aos desastres, o ideal para essa etapa seria utilizar como base os mapas do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012), que possui a contabilização – por município brasileiro – das ocorrências de desastres entre o período de 1990–2010.

Mapas como estes apresentados no atlas do Ceped sintetizam todas as dimensões da vulnerabilidade aos desastres, pois a ocorrência de um desastre significa que a capacidade dos sistemas (socioambientais) em resistir a tal fenômeno foi

ultrapassada; ou seja, sabendo exatamente a quantidade de ocorrências de desastres em cada município na última década, esta seria a variável dependente na análise de RLM, e um modelo baseado nas demais variáveis poderia ser ajustado para representá-lo. Entretanto, a aplicação da RLM só seria possível se esses mapas fossem disponibilizados em algum formato digital no qual pudesse ser manuseado em ambiente SIG (*shapefile*, *raster* ou até mesmo tabular), o que não foi possível devido à indisponibilidade dos dados nesses formatos.

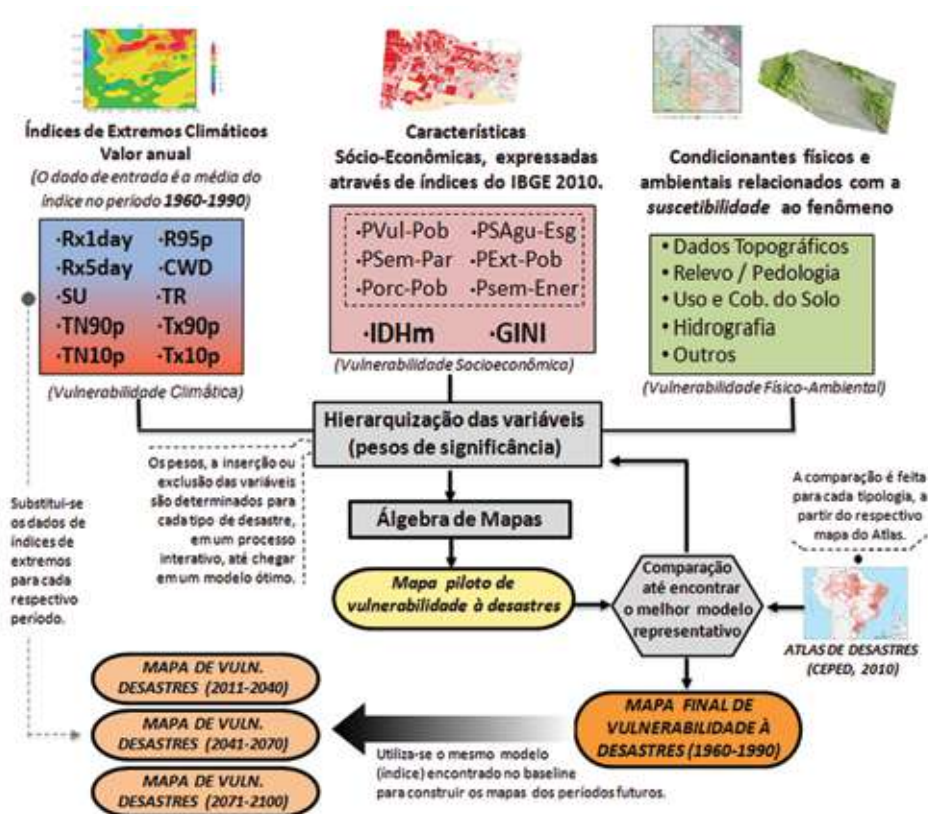
Sendo assim, uma nova estratégia foi traçada para que se pudesse criar o índice de vulnerabilidade. A lógica que norteou essa etapa é a mesma da RLM, mas que não pôde ser feita por meio de análises estatísticas, conforme brevemente explicado anteriormente. Dessa forma, o procedimento alternativo adotado consistiu em utilizar os mapas do atlas como referência visual do produto que seria gerado a partir do “cruzamento” das variáveis selecionadas (figura 1).

Para a realização desta tarefa, utilizou-se a técnica da Álgebra de Mapas, aplicada em ambiente SIG, a qual estabeleceu relações entre os mapas temáticos e as variáveis elencadas como importantes para cada tipologia de desastres. Com isso, foram testadas diferentes combinações de pesos de significância para cada uma das variáveis, até a obtenção de uma equação aplicável ao território nacional e, como resultado final, a obtenção de um mapa semelhante ao apresentado no atlas. Essa etapa foi executada com os dados climáticos do período presente (1960–1990) chamado de *baseline*, o qual tem como objetivo chegar a um resultado próximo aos mapas de desastres do atlas referente ao período de 1990–2010.

Uma vez encontrado um modelo ideal para o período presente (risco climático) ajustado ao resultado do atlas, este é aplicado para os períodos futuros 2011–2100 (projeções dos modelos). Porém, para os períodos futuros, foram mantidas constantes as variáveis das dimensões social e físico-ambiental, de forma que apenas os dados climáticos (índices de extremos) foram modificados. A premissa básica para tal extrapolação é baseada nos seguintes argumentos: (i) as condições físicas e ambientais permanecerão da mesma forma nos períodos futuros ou sofrerão pequenas modificações que podem ser consideradas irrelevantes perante todo o contexto; (ii) utilizar os dados sociais do presente na modelagem da vulnerabilidade

futura permite identificar regiões onde o clima irá intensificá-la e, desta forma, é possível fornecer informações para o desenvolvimento de políticas públicas que melhorem os aspectos sociais nestes locais e, assim, possam diminuir a vulnerabilidade como um todo, acelerar o processo adaptativo e(ou) abrandar possíveis impactos.

Figura 1 – Fluxograma referente às etapas metodológicas e dados utilizados para a construção do índice e dos mapas de vulnerabilidade aos desastres naturais



A estrutura do índice e sua elaboração foi fundamentada em propostas metodológicas de diferentes autores que atuam nesta mesma temática, sobretudo, os trabalhos de Peduzzi *et al.*, (2009), Almeida (2013) e Lindoso *et al.* (2014). As abordagens encontradas na literatura foram direcionadas para atender à demanda da Terceira Comunicação Nacional de Mudanças Climáticas e adaptadas para as limitações existentes, sobretudo, no que diz respeito à aquisição de dados espaciais necessários para sua elaboração. Nas próximas sessões são abordadas como as variáveis utilizadas foram escolhidas, separadas e hierarquizadas para cada dimensão, bem como a construção dos subíndices. Somente depois, todas essas variáveis e subíndices são agregados, por meio de um modelo que os relaciona para então, culminar no índice que representa a vulnerabilidade total dos municípios brasileiros aos dois tipos de desastres naturais. Para resgatar a estrutura metodológica do índice, vale recordar novamente a figura 1.

Ressalte-se que apenas a dimensão socioeconômica teve um subíndice previamente estruturado, e que servirá tanto para o caso das inundações, quanto para os movimentos de massa. Para as demais dimensões, são apresentadas somente as variáveis que as compõem, de forma que a relação entre elas e os pesos de significância serão determinados na etapa de comparação com os mapas do Atlas de Desastres Naturais (UFSC, 2012) em um processo interativo.

3.2 Dimensão climática da vulnerabilidade

A partir dos índices de precipitação calculados por Chou *et al.*, (2014) descritos no capítulo 2 deste livro, selecionaram-se alguns índices específicos para os extremos climáticos que representem a dinâmica climática dos extremos de precipitação para as diferentes regiões do Brasil. Os índices selecionados para as análises de inundações bruscas e movimentos de massa estão descritos na tabela 3. É importante salientar que as variáveis climáticas utilizadas para ambos os casos (inundações bruscas/enxurradas e movimentos de massa) foram as mesmas, entretanto, com pesos de significância diferentes para cada caso. A análise das variáveis climáticas mais representativa – feita para cada um dos fenômenos analisados – devem ser diferentes porque os eventos climáticos deflagradores dos processos também se dão de forma distinta (isto também vale para a dimensão físico ambiental explanada mais à frente).

Tabela 3 – Índices de extremos de precipitação selecionados para a análise

ID	Descrição	Definição	Unidade
Rx1day	Quantidade máxima de precipitação em um dia	Máximo de precipitação ocorrido em um dia	mm/dia
Rx5day	Quantidade máxima de precipitação em cinco dias	Máximo de precipitação acumulada em cinco dias consecutivos	mm/5dias
CWD	Nº. de dias úmidos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com chuva diária maior que 1 mm	dias
R95p	Dias muito úmidos	precipitação diária total em que chuva diária > percentil 95, considerando a estatística de um período (ex.: ano)	mm/dia

Todos os índices se referem a métricas de extremos climáticos de precipitação que podem ocorrer durante um período específico de análise (ex.: mês, estação ou ano), que pode variar conforme o interesse da pesquisa. Para as análises deste estudo, esses dois índices foram calculados anualmente e agrupados por período histórico (1961–1990, 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099). O resultado apresentado, portanto, será a média do índice para cada um desses períodos:

- a) o índice RX1day indica a máxima precipitação contabilizada na janela de um dia, para as ocorrências que ocorreram dentro de um determinado ano. O índice Rx5day é similar ao Rx1day, porém o RX5day indica o máximo de precipitação acumulada considerando uma janela de cinco dias;
- b) o índice R95p refere-se à fração total anual de precipitação devido a eventos de chuva acima do percentil 95, ou seja, é quantidade de chuva acumulada nos dias considerados muito úmidos. Para regiões tropicais, ele normalmente está associado a eventos extremos de chuva que

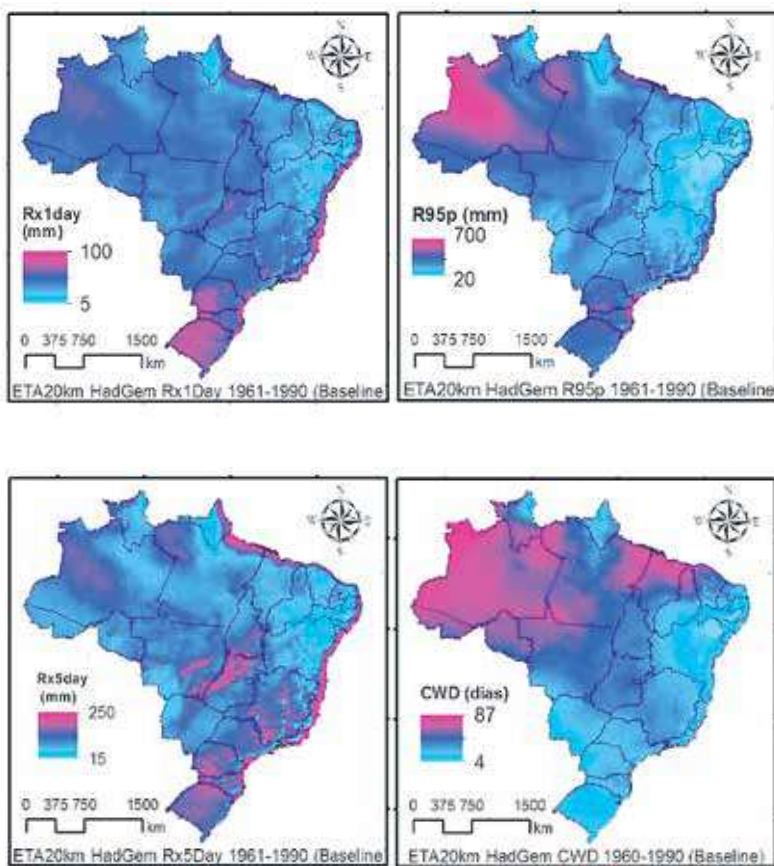
podem produzir inundações bruscas, enxurradas e também deslizamentos. Em análises do clima futuro, é de costume utilizar os dados do *baseline* (1961–1990) como referência para comparações. Nesses casos, o aumento desse índice para o clima futuro significa que as mesmas chuvas consideradas extremas no período histórico acontecerão com maior frequência e(ou) em maior magnitude;

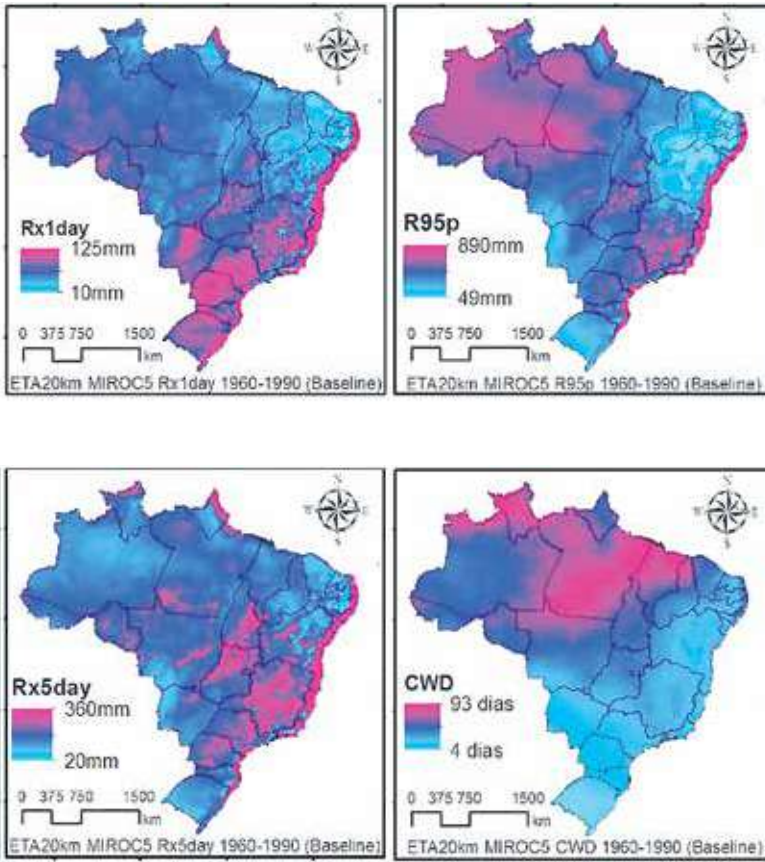
- c) já o índice CWD indica a maior sequência de dias consecutivos úmidos (chuvosos, com precipitação maior que 1mm) encontrada dentro do calendário anual. Esse índice, quando apresenta valores elevados, pode ser útil para identificar áreas sujeitas a inundações graduais. Quando esse índice é baixo (valores em torno de sete dias) e coincide com elevados índices extremos como o Rx5day, pode indicar que fenômenos extremos de precipitação se dão em uma escala curta de tempo, facilitando a deflagração de deslizamentos de terra (principalmente do tipo planar) e inundações bruscas.

Desse modo, pode-se dizer que o tipo de evento de precipitação mais relacionado à deflagração de inundações bruscas, enxurradas e alagamentos são tempestades severas formadas a partir de núcleos de precipitação intensos, zonas de baixa pressão, frentes estacionárias, ventos úmidos costeiros e efeito do relevo sobre as massas de ar. Já para os movimentos de massa, especificamente os deslizamentos de terra, cita-se os acumulados durante alguns dias, normalmente condicionados a passagem de frentes frias, frentes estacionárias, permanência da Zona de Convergência do Atlântico Sul, Zona de Convergência Intertropical e ventos alísios. É esperado que a utilização desses índices na análise possa representar essas características.

A representação desses índices para o período do *baseline* (1961–1990) para ambos modelos (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) são apresentados na figura 2.

Figura 2 – Espacialização dos índices de extremos climáticos de precipitação (RX1day, RX5day, R95p e CWD) para o período do *baseline* (1961–1990) para ambos modelos





Nota: os quatro primeiros painéis apresentam os resultados para o modelo EtaHadGEM2-ES e os quatro painéis posteriores os resultados para o modelo Eta-MIROC5.

Para que esses índices pudessem se relacionar entre si e, nas etapas futuras, com outras variáveis não climáticas, eles foram recalculados para uma escala padronizada entre valores de 0.00 a 1.00. No caso do índice que avalia as inundações bruscas, enxurradas e alagamentos, o método utilizado para esta transformação foi o de normalização linear. Por outro lado, devido às especificidades dos processos relacionados aos movimentos de massa, foi necessário categorizar os valores contínuos de cada índice e ponderá-los (atribuição de pesos). Sendo assim, os índices de extremos utilizados para definir a dimensão climática da vulnerabilidade foram ponderados conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Categorização e ponderação dos índices de extremos de precipitação sob o olhar da vulnerabilidade a desastres envolvendo movimentos de massa

Rx1day			Rx5day			R95p			CWD		
Classe		Peso	Classe		Peso	Classe		Peso	Classe		Peso
min	max		min	max		min	max		min	max	
0	20	0.10	0	30	0.05	0	100	0.10	0	7	1.00
20	35	0.20	30	60	0.10	100	175	0.25	7	10	0.95
35	50	0.40	60	90	0.20	175	250	0.40	10	13	0.90
50	60	0.60	90	110	0.50	250	300	0.60	13	17	0.80
60	70	0.70	110	130	0.70	300	400	0.80	17	20	0.50
70	80	0.8	130	160	0.85	400	500	0.90	20	30	0.4
80	400	1.0	160	200	1.00	500	750	1.00	30	40	0.3
									40	50	0.2
									>	50	0.15

Essa etapa foi necessária porque os movimentos de massa normalmente são deflagrados a partir de um certo limiar, de modo que valores baixos e medianos dos índices de extremos devem ter pesos bem menores que valores elevados (relação não deve ser linear).

3.3 Dimensão físico-ambiental da vulnerabilidade

Na dimensão físico-ambiental da vulnerabilidade aos desastres naturais de inundações bruscas/enxurradas e movimentos de massa (deslizamentos de terra), foi necessário utilizar dados espaciais distintos para cada tipo de desastre, pois as características físico-ambientais que deflagram cada uma dessas tipologias são de distinta origem, e refletem condições específicas do ambiente em seu entorno. A seguir serão explanadas as bases de dados físico-ambientais para cada tipologia de desastre.

3.3.1 Inundações bruscas, enxurradas e alagamentos

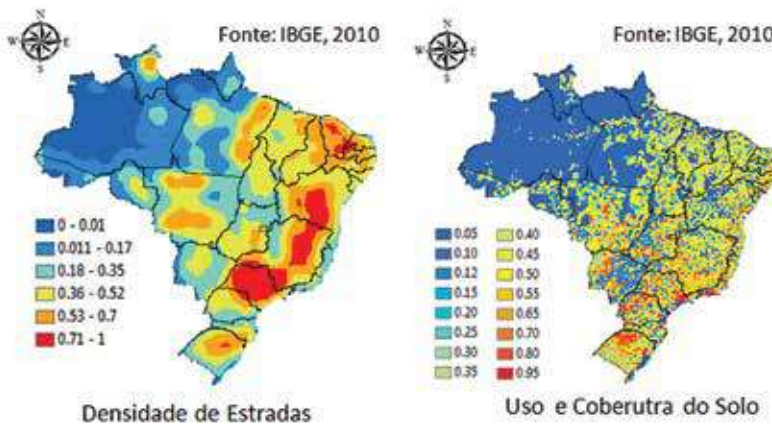
Na avaliação da dimensão físico-ambiental da vulnerabilidade aos desastres naturais envolvendo inundações bruscas, enxurradas e alagamentos, foi estabelecida uma base de dados espaciais que pudesse representar, em âmbito nacional, fatores que estivessem ligados direta e indiretamente a ocorrência desses fenômenos. Para tal, buscou-se mapas e dados de domínio público que relacionassem principalmente o coeficiente de escoamento superficial e a suscetibilidade natural das regiões perante sua rede de drenagem e que estivessem em boa qualidade, permitindo o manuseio dos dados. Os mapas e os dados são os seguintes:

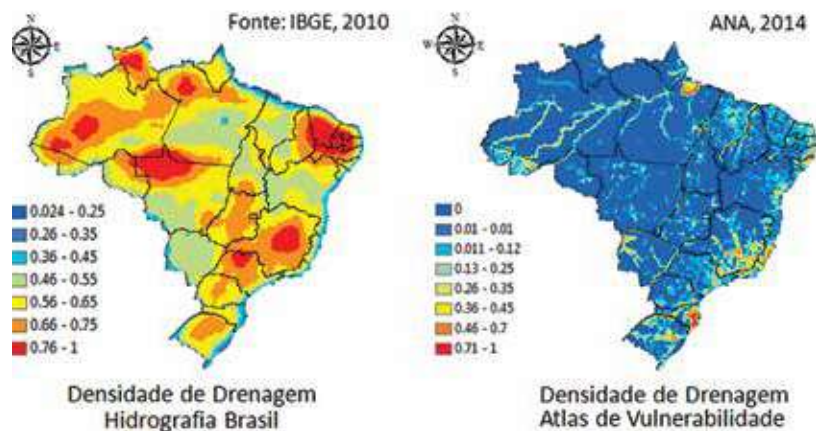
- a) **mapa de rodovias:** : parte integrante do Mapeamento Sistemático do IBGE, com base contínua ao milionésimo, escala original de 1:250.000. O *shapefile* obtido divide as rodovias em duas classes: pavimentadas e não pavimentadas. Essas classes foram separadas e gerou-se um novo produto para cada uma, no formato *raster*, em que se calculou a densidade de estradas (km/km^2). Em seguida, os dois mapas de densidade de estradas foram somados, de modo que as estradas pavimentadas tiveram peso 2, enquanto as não pavimentadas tiveram peso 1;
- b) **uso do solo:** : referente ao Mapeamento Sistemático do Uso da Terra elaborado pelo IBGE na escala 1:250.000. Todas as 30 classes encontradas receberam um peso (ponderação) na escala de 0.00 (menos vulneráveis) até 1.00 (mais vulneráveis), relacionando cada tipo de uso com o coeficiente de escoamento superficial e também com a sua fragilidade (quando o uso é econômico) em receber fenômenos de inundações;
- c) **hidrografia (cursos d'água) do Brasil, parte integrante do Mapeamento Sistemático do IBGE:** com base contínua ao milionésimo, com escala original de 1:250.000. Foi calculada diretamente a densidade (km/km^2) desses vetores lineares (cursos d'água), de forma que o produto gerado foi normalizado em uma escala de 0.00 até 1.00;

- d) **Atlas de vulnerabilidade a Inundações, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas – ANA (2014):** elaborado a partir da base cartográfica otto-codificada de hidrologia na escala ao milionésimo, em que existem os campos que definem o curso d'água, a frequência de ocorrência, o grau de impacto e a respectiva vulnerabilidade. Os corpos d'água com vulnerabilidade alta, média e baixa foram separados, e calculou-se a densidade de drenagem para cada grupo. Em seguida, somou-se as densidades de drenagem estabelecendo peso 3 para a classe alta, peso 2 para classe média e peso 1 para classe baixa. O resultado foi normalizado de 0.00 até 1.00.

Dessa forma, os mapas e variáveis utilizados nessa etapa são mostrados na figura 3.

Figura 3 – Mapas utilizados na dimensão físico-ambiental para os desastres de inundações bruscas/enxurradas





Nota: da esquerda para a direita o mapa de densidade de estradas, o mapa de uso e cobertura do solo e o mapa de densidade de drenagem e hidrografia do Brasil do IBGE (2010); e o mapa de densidade de drenagem do Atlas de Vulnerabilidade a Inundações da ANA (2014).

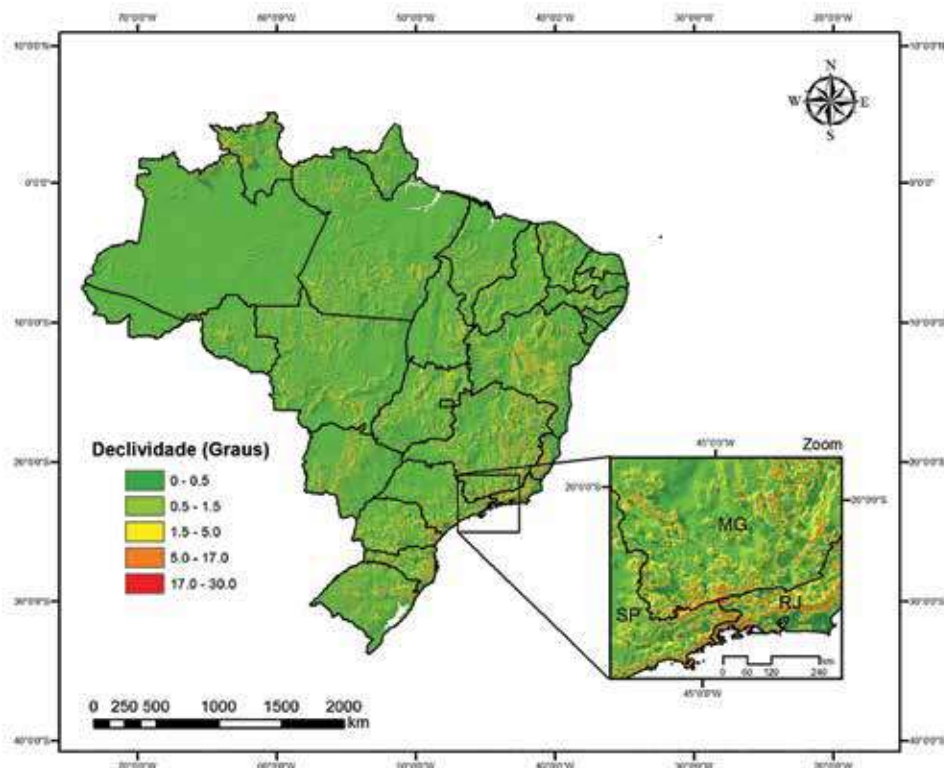
3.3.2 Movimentos de massa

Na avaliação da dimensão físico-ambiental da vulnerabilidade aos desastres naturais envolvendo movimentos de massa, foi estabelecida uma base de dados espaciais que pudesse representar, em âmbito nacional, fatores que estivessem ligados direta e indiretamente a ocorrência desses fenômenos. Para tal, buscou-se mapas e dados de domínio público que relacionassem principalmente os fatores condicionantes mais importantes na análise de movimentos de massa (sobretudo, deslizamentos de terra), que são aqueles relacionados à topografia e ao relevo.

3.3.2.1 Declividade

Foi calculada por meio dos dados de altimetria da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 90m, gerando-se um raster de mesma resolução espacial, com valores contínuos que variam de 0° até 30°. É preciso destacar que resultado do mapa de declividade com a resolução de 90 m não permite uma boa representação das características do relevo para que fosse possível fazer relações diretas com a suscetibilidade a deslizamentos sob critérios puramente

Figura 4 – Mapa de declividade gerado a partir dos dados de altimetria da SRTM, resolução de 90 m



Nota: no canto inferior direito, um *zoom* para representar a variabilidade espacial da declividade em locais com relevo acidentado.

geotécnicos que, normalmente, se baseariam em declividades calculadas diretamente nas encostas. Ao calcular a declividade utilizando a SRTM, os maiores valores encontrados se referem a declividades entre 25° e 30°, que correspondem a pequenas localizações, quase pontuais, e que não representam bem as regiões com relevo acidentado (figura 4).

Por outro lado, 90% do território nacional apresentam declividade menor que 5°, sendo que apenas uma parte do litoral do Sul e do Sudeste e o norte

de Roraima conseguem apresentar declividades superiores a esses valores; ou seja, nas regiões montanhosas – que é justamente onde os deslizamentos ocorrem com maior frequência –, a variação da declividade é muito abrupta e acontece em um espaço geográfico pequeno, que não consegue ser refletido no mapa gerado. Sendo assim, foi necessário que se fizesse a categorização da declividade levando em consideração estes aspectos, pois normalmente declividades superiores a 30° e 45° são aquelas consideradas mais críticas para a deflagração dos deslizamentos de terra, mas que não são detectadas pela resolução de 90 m. Portanto, realizou-se o fatiamento dos dados contínuos de declividade, para que, depois, fosse feito a ponderação (atribuição de pesos) em classes temáticas. O produto final de declividade foi uma malha com valores entre 0.00 e 1.00, que seguem os critérios apresentados na tabela 5.

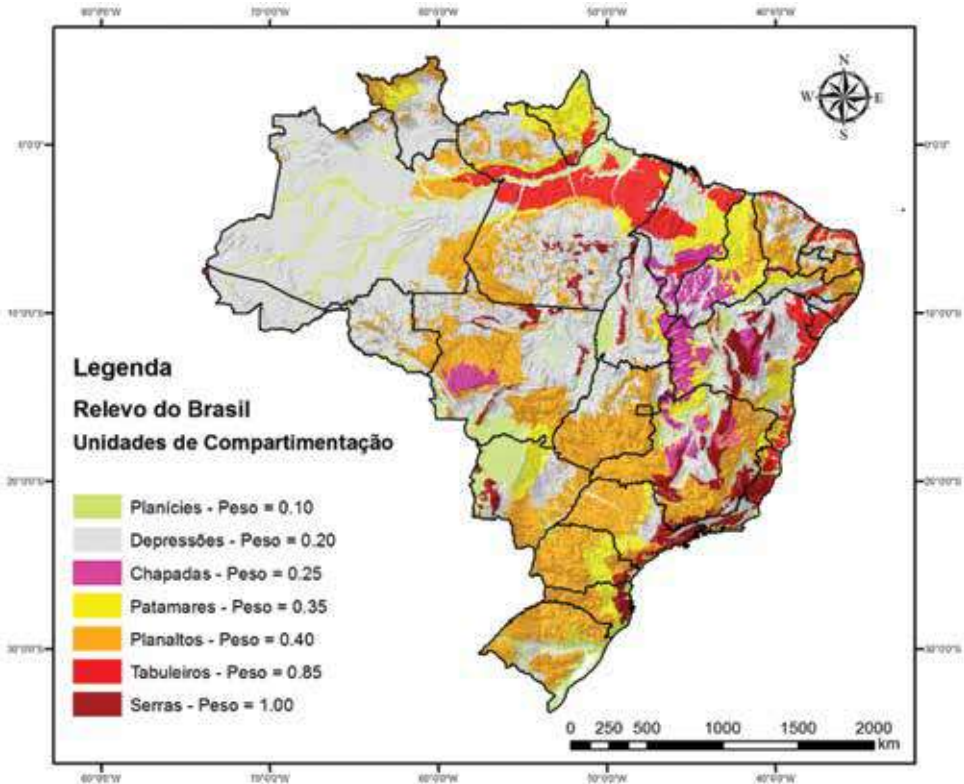
Tabela 5 – Ponderação das classes de declividade

Declividade (graus)	Classe	Peso
0.0° – 0.5°	Plano	0.00
0.5° – 1.5°	Levemente ondulado	0.10
1.5° – 5.0°	Ondulado	0.25
5.0° – 17.0°	Altamente ondulado	0.70
17.0° – 30.0°	Montanhoso	1.00

3.3.2.2 Mapa de relevo

Desenvolvido pela Diretoria de Geociências (DGC) do IBGE e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Solos, e adquirido no site do IBGE (2010). Nessa base de dados, existem cerca de 167 unidades de relevo que foram identificadas com a utilização de diferentes tipos de sensores (imagens de radar, imagens de satélite Landsat), tecnologias de sensoriamento remoto, processamento digital de imagens e geoprocessamento. Entretanto, para o cálculo do índice de vulnerabilidade aos deslizamentos de terra, utilizou-se apenas a classificação de sete compartimentos de relevo (figura 5).

Figura 5 – Mapa de relevo e suas classes ponderadas sob o critério de vulnerabilidade a desastres relacionados a movimentos de massa



A ponderação das classes temáticas do mapa de relevo foi feita tomando-se como base as principais características de cada unidade de compartimentação. Da mesma forma que todas as outras variáveis utilizadas no cálculo do índice de vulnerabilidade, foram atribuídos pesos entre 0.00 e 1.00 para essas classes, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Ponderação das classes de unidades de relevo

Unidades de relevo	Peso
Planícies	0.10
Depressões	0.20
Chapadas	0.25
Patamares	0.35
Planaltos	0.40
Tabuleiros	0.85
Serras	1.00

O critério para definir os pesos foi a relação do tipo de relevo com características topográficas que promovem a deflagração de deslizamentos de terra; ou seja, relevos mais acidentados e que podem apresentar grandes declividades e amplitudes em suas encostas recebem um peso maior do que aqueles que possuem características planas e de pouca variação altimétrica (declividade).

3.4 Dimensão socioeconômica da vulnerabilidade

A dimensão socioeconômica considerada para a avaliação das duas tipologias de desastre foi a mesma, pois os padrões da vulnerabilidade das populações mais atingidas pelos dois fenômenos são bem semelhantes, tais como: população marginalizada que ocupa áreas de risco (tanto em encostas quanto próximas aos rios), acesso limitado a diversos serviços e educação, entre muitos outros fatores explanados a seguir.

É importante destacar que esse mesmo subíndice será utilizado tanto para a construção do mapa de vulnerabilidade a desastres naturais envolvendo inundações bruscas, enxurradas e alagamentos quanto para aquele envolvendo movimentos de massa. Por meio da metodologia proposta, o subíndice de vulnerabilidade socioeconômica terá um fator de abrandamento dentro do índice total de vulnerabilidade que será calculado. Isso significa que os municípios com os piores índices (valores mais elevados) têm poucas condições de minimizar as vulnerabilidades que

naturalmente existem, tornando-se mais vulneráveis quando comparado com outros que possuem indicadores socioeconômicos melhores.

A construção do subíndice de vulnerabilidade socioeconômica exigiu a aquisição e a organização de uma base de dados que permitisse a aplicação do índice para todo o Brasil. Para tal, escolheu-se a base de dados disponibilizada pelo Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013, que é uma plataforma de consulta ao Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) – dos 5.565 municípios brasileiros –, além de mais de 180 indicadores de população, educação, habitação, saúde, trabalho, renda e vulnerabilidade, com dados extraídos dos censos demográficos de 1991, 2000 e 2010.

Dentre os 180 indicadores, selecionou-se aqueles que possuíam relação direta com a vulnerabilidade socioeconômica vinculada aos desastres naturais. O primeiro indicador utilizado é o próprio IDHM, que trata do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) adaptado para o nível municipal e que sintetiza vários indicadores de subáreas (educação, longevidade, saúde, renda etc.) de interesse para a análise. Essas variáveis apresentam, de alguma forma, uma relação direta com grupos sociais que são amplamente os mais atingidos pelos desastres de inundações e movimentos de massa no Brasil.

Seis indicadores foram escolhidos: PPOB (porcentagem de pessoas na classe de pobreza); PVULPOB (porcentagem de pessoas vulneráveis a entrar na classe de pobreza); PEXTPOB (porcentagem de pessoas extremamente pobres); PSAGUAESG (porcentagem de pessoas sem acesso a serviços de água e esgoto); PPAREDE (porcentagem de pessoas que vivem em domicílios com paredes impróprias); e PSENERG (porcentagem de pessoas sem acesso a energia elétrica).

Mesmo sabendo que em alguns desastres as classes sociais mais favorecidas também podem ser impactadas, como no caso da região Serrana no Rio de Janeiro em 2011, a grande maioria dos desastres está relacionada com a população de baixa de renda e marginalizada, que será o foco da análise que se segue.

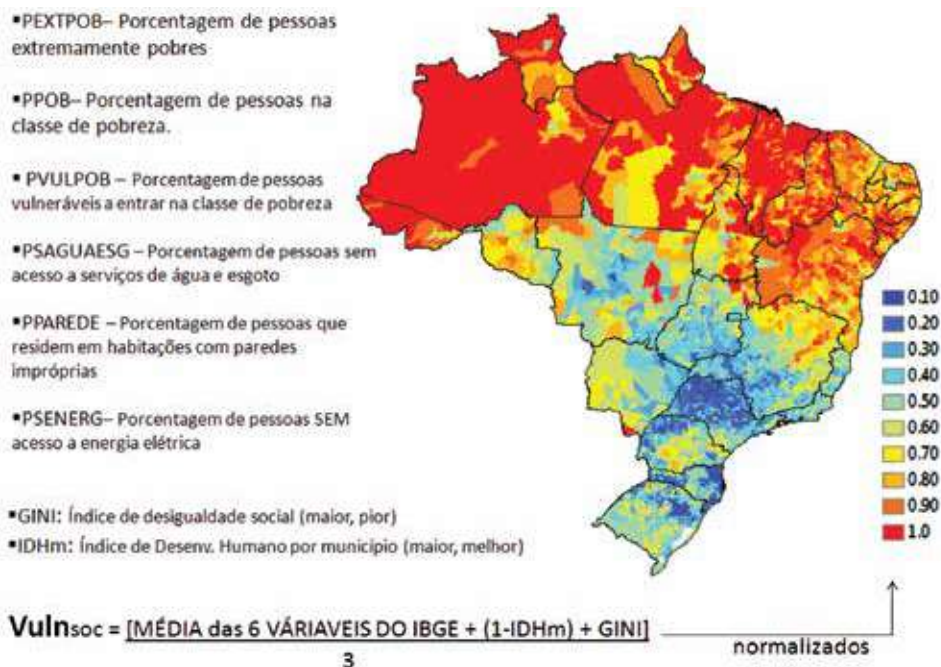
Além dessas seis variáveis e do IDHM, inseriu-se também o índice Gini como parte integrante da vulnerabilidade socioeconômica. Esse índice mede o grau de desigualdade social existente na distribuição de indivíduos segundo a renda

domiciliar *per capita*. Seu valor varia de zero, quando não há desigualdade, a um, quando a desigualdade é máxima. A importância desse índice está justificada em Van der Veen *et al.* (2009), que ressaltam a desigualdade social como um dos fatores propulsores da marginalização de certos grupos sociais, que podem facilmente vir a habitar locais inadequados onde o risco a inundações e movimentos de massa se faz presente, devido aos processos de segregação social. Segundo Valencio (2008), a desigualdade torna mais perceptível onde estão os grupos mais vulneráveis, mas essa percepção, dentro das atuais políticas implementadas, não resolve a problemática e ainda podem acentuar a desigualdade conforme os desastres acontecem.

Terminada essa etapa de definição dos indicadores, foi preciso manuseá-los antes de elaborar e espacializar o subíndice de vulnerabilidade socioeconômica. Nessa etapa, os dados disponibilizados pelo *síte* do Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil (PNUD, 2013) foram digitalizados. Feito isso, o subíndice de vulnerabilidade socioeconômica foi calculado e, em seguida, normalizado em uma escala de 0.00 até 1.00, para que pudesse se relacionar com os demais subíndices das outras dimensões da vulnerabilidade (climática e físico-ambiental).

As seis variáveis apresentadas na figura 6 do subíndice de vulnerabilidade socioeconômica refletem uma porcentagem vulnerável da população que, ao ser impactada por ameaças naturais de alta severidade, poderão entrar em colapso e ter grandes dificuldades para retomar à situação precedente.

Figura 6 – Mapa da espacialização do subíndice de vulnerabilidade socioeconômica



Nota: no mapa do subíndice de vulnerabilidade socioeconômica, está indicado, a partir da legenda as regiões, com maior ou menor vulnerabilidade. As regiões Norte e Nordeste são as mais vulneráveis, com valores entre 0.80 e 1.00. No outro extremo, temos as regiões Sudeste, Sul e parte da região Centro-Oeste com índices entre 0.40 e 0.10.

Em suma, as seis variáveis (PPOB, PVULPOB, PEXTPOB, PSAGUAESG, PPAREDE e PSENERG) escolhidas, o IDHM e o índice de Gini refletem a fragilidade ou potencialidade política-institucional das diversas regiões brasileiras no que tange sua capacidade de lidar (*cope*, do inglês) com os desastres naturais. Somadas a essas variáveis, outras questões não contabilizadas no índice socioeconômico também são importantes e deverão ser consideradas no futuro, como, por exemplo, os aspectos culturais locais e regionais das populações e as diversas redes sociais entre comunidades e grupos. Essas nuances locais de difícil mensuração devido a sua escala de avaliação

(microrregional), ainda que não representadas no mapa acima, poderão modificar os padrões espaciais, pois são justamente nos níveis locais que essas redes se fazem mais fortes, promovendo o processo de adaptação e gerenciamento de crise em todas as fases do desastre. O papel dessas redes se faz tão importante que uma das estratégias dentro da própria Política Nacional da Defesa Civil é a criação dos Nudecs (Núcleos de Defesa Civil) em escala municipal. Finalmente, o subíndice de vulnerabilidade socioeconômica tem como objetivo nortear e sinalizar em quais regiões há maior fragilidade social, corroborando no fomento e implementação de políticas públicas eficazes de adaptação em escala regional e local aos desastres naturais.

3.5 Validação e calibração do Índice de Vulnerabilidade aos Desastres de Inundações Bruscas, Enxurradas e Alagamentos (1961–1990)

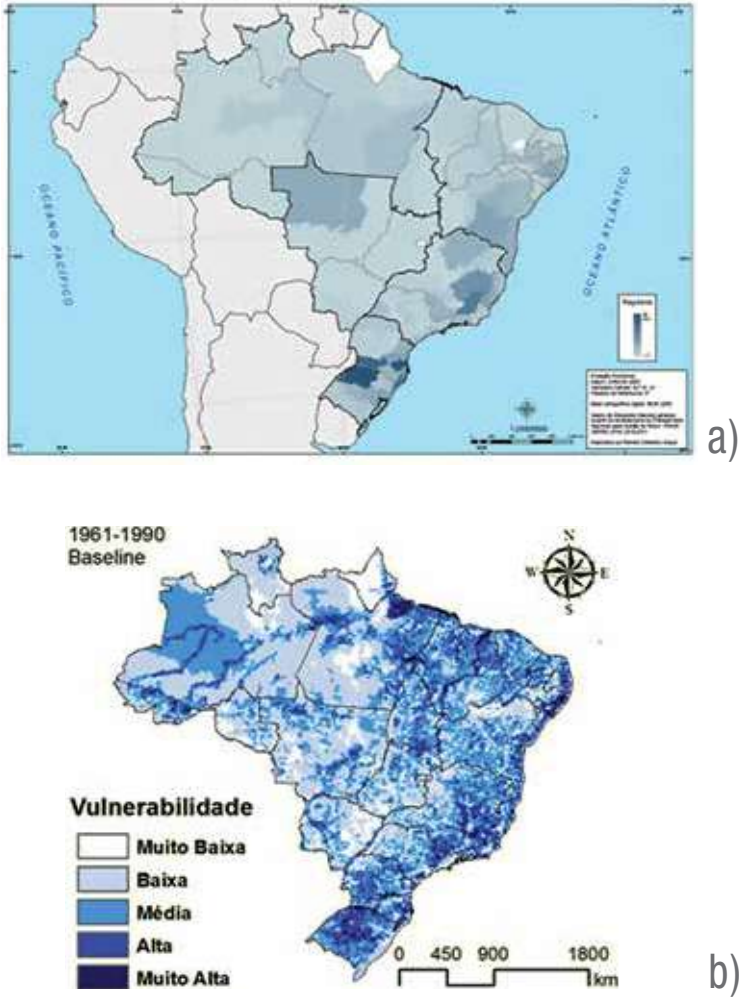
À esquerda da figura 7, encontra-se o mapa de desastres naturais causados por inundações bruscas, enxurradas e alagamentos no Brasil no período de 1991 a 2010, produto do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012). Esse mapa foi utilizado como referência visual para que um índice de vulnerabilidade aos desastres relacionados a inundações bruscas fosse elaborado. O índice objeto deste estudo utilizou os dados previamente apresentados, que foram: (i) clima: $Rx1day$, $Rx5day$, $R95p$ e CWD ; (ii) físico-ambiental: densidade de drenagem do atlas de vulnerabilidade a inundações ($DDren_{Atlas}$), densidade de drenagem da rede hidrográfica do Brasil ($DDren_{BR}$), densidade de estradas ($Dens_{Est}$), uso do solo; (iii) socioeconômica: seis indicadores do Censo 2010, do IDHM e do índice Gini. Após um processo interativo, o modelo encontrado que melhor ajustou os resultados ao atlas de desastres está representado nas equações 1, 2 e 3. O mapa gerado pela aplicação desse indicador está apresentado na parte direita da figura 7.

$$(1.75 * Rx1day + 0.50 * R95p + 0.50 * Rx5day + 0.25 CWD) / 3 = Vuln_{clim} \quad (1)$$

$$(1.50 * DDren_{Atlas} + 0.25 * DDren_{BR} + 0.50 * Dens_{Est} + 0.75 * Uso) / 3 = Vuln_{Fis.Amb} \quad (2)$$

$$(Vuln_{clim} + Vuln_{Fis.Amb}) * \left[0.5 + \frac{Vuln_{Soc}}{2} \right] = Vuln_{Inundações} \quad (3)$$

Figura 7 – (a) mapa de desastres naturais causados por inundações bruscas, enxurradas e alagamentos no Brasil entre 1991 a 2010 (UFSC, 2012); (b) mapa gerado pelo Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados a inundações bruscas utilizando dados climáticos do modelo Eta–HadGEM2-ES



Ressalte-se que, na equação 3, o subíndice de vulnerabilidade socioeconômica ($Vuln_{Soc}$) se apresenta como uma fator redutor do índice total de vulnerabilidade às inundações. Também é importante destacar que a dimensão socioeconômica, para

o caso de inundações, consegue abrandar em até 50% o valor das dimensões naturais (clima e físico-ambiental). Esse valor foi encontrado por meio do método interativo.

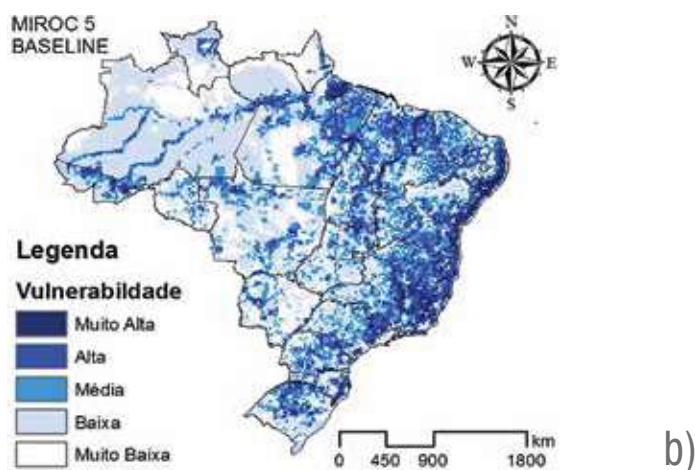
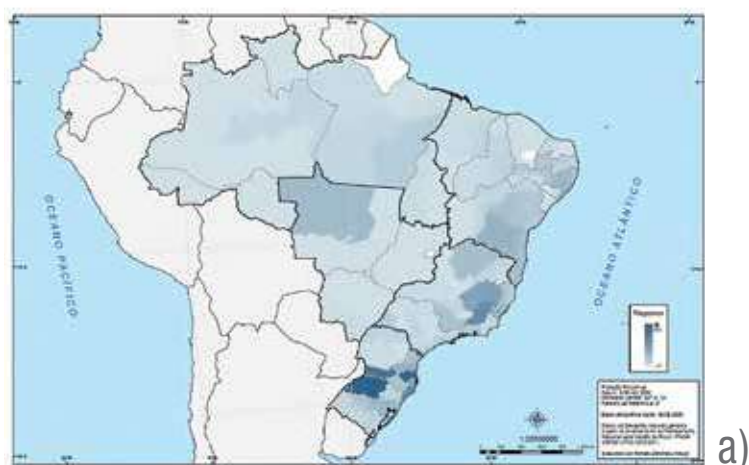
É possível observar que os padrões do mapa gerado por meio da aplicação do índice de vulnerabilidade correspondem, em grande parte, ao mapa do atlas de desastres do Ceped/UFSC. São observadas também algumas divergências entre eles, principalmente no estado de Mato Grosso e no Norte do Brasil. Basicamente, essas diferenças podem ser explicadas pela deficiência do mapa do atlas em apresentar os resultados pontuais, pois, nele, os resultados estão sintetizados por mesorregiões. Com isso, em muitos dos casos analisados, as informações que se referem a um único município, ou a um pequeno grupo deles, é extrapolado para uma extensa região geográfica correspondente à mesorregião que o município faz parte. Esse é o caso, por exemplo, dos municípios de Cotriguaçu, Alta Floresta, Nova Bandeirante e Cuiabá, que são aqueles que mais se destacam no estado de Mato Grosso por serem eventualmente atingidos por inundações, enxurradas e alagamentos. Pelo índice elaborado, a região ocupada por esses municípios aparece em destaque no noroeste de Mato Grosso, sendo que, no mapa do atlas, toda uma mesorregião Norte mato-grossense recebe o destaque, fato este que não condiz com a realidade dos demais municípios vizinhos.

Para validar o resultado, além da comparação com o mapa do atlas, foi feito uma busca por meio dos dados do Munic (IBGE 2013) e uma ampla pesquisa de notícias encontradas na web. Dentre todas as regiões que são destacadas como altamente vulneráveis no mapa elaborado por meio do índice, apenas a foz do rio Amazonas não condiz com a realidade (justamente por essa ser uma região naturalmente inundada), sendo que os resultados para o sudoeste de Mato Grosso do Sul estão superestimados, bem como a faixa centro-sul do Rio Grande do Sul, provavelmente por ser uma região em que o modelo Eta-HadGEM2-ES indicou índices extremos de alto valor. Quanto ao Noroeste da Amazônia, não existem muitos registros de desastres nesta região por se tratar de uma porção do território nacional pouco explorada e desenvolvida, onde as áreas urbanas são de pequenas proporções. Mesmo assim, pode-se considerar a região com alta vulnerabilidade, a qual merece atenção conforme houver o desenvolvimento e mudanças no uso e cobertura da terra nesta.

Para a geração do mapa de vulnerabilidade e para tornar possível a comparação entre os resultados com os dados provenientes do modelo

Eta-MIROC5, foi utilizado o mesmo índice encontrado a partir Eta-HadGEM2-ES. O índice é, portanto, obtido por meio das equações 1, 2 e 3 e apresentado no mapa à direita da figura 8.

Figura 8 – (a) mapa de desastres naturais causados por inundações bruscas, enxurradas e alagamentos no Brasil entre 1991 a 2010 (UFSC, 2012); (b) mapa gerado por meio do índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados a inundações bruscas utilizando dados climáticos do modelo Eta-MIROC5



Do mesmo modo que o mapa gerado a partir dos dados do Eta-HadGEM2-ES, o mapa apresentado à direita da figura 8 consegue representar, em geral, as regiões que são mais vulneráveis a inundações bruscas, enchentes e alagamentos do Brasil. A principal diferença entre aquele apresentado na figura 7 com o mapa gerado a partir Eta-MIROC5 (figura 8) é que este último representa melhor a distribuição da vulnerabilidade no Sul do país, essencialmente no sul do Rio Grande do Sul, antes superestimada. Há uma melhor destreza também em indicar a vulnerabilidade mais branda (classe baixa) no oeste da Amazônia, que normalmente é impactada por inundações graduais, mas superestimada quanto as inundações bruscas pelo Eta-HadGEM2-ES.

O mapa apresentado à direita da figura 8, de forma geral, apresenta um menor contraste das classes de vulnerabilidades nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, pois resultou em muitas localidades com vulnerabilidade alta e muito alta. Essa característica pode se dever ao fato de que os índices de extremos provenientes do Eta-MIROC5 alcançam limites superiores mais elevados, principalmente no índice de extremos climáticos Rx1day (máximo de 125mm a partir do MIROC5 contra 100mm do HadGEM2-ES). Entretanto, mesmo que visualmente algumas regiões não sejam condizentes na comparação com o atlas do Ceped/UFSC (à esquerda da figura 10), são regiões que recebem impactos vindouros de inundações bruscas, a partir de consultas dos dados do Munic e da *web*.

3.6 Validação do Índice de Vulnerabilidade para os Desastres de Movimentos de Massa (1961–1990)

Na primeira parte da figura 9, encontra-se o mapa de desastres naturais causados por movimentos de massa no Brasil no período de 1991 a 2010, produto do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012). Esse mapa foi utilizado como referência visual para que o índice de vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimentos de massa fosse definido. Esse índice utilizou os dados previamente apresentados para as diferentes dimensões da vulnerabilidade, que foram: (i) clima: Rx1day, Rx5day, R95p e CWD; (ii) físico-ambiental: declividade e unidades de relevo;

(iii) socioeconômica: seis indicadores do Censo 2010, do IDHm e do índice Gini. Após um processo iterativo, o modelo encontrado que melhor se ajustou aos resultados ao atlas está representado nas equações 4, 5 e 6.

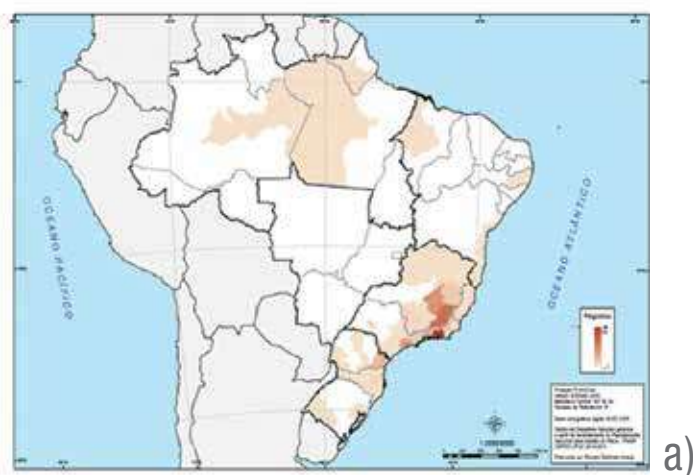
$$(1.30 * Rx5day + 1.30 * CWD + 1.0 * R95p + 0.40 * Rx1 Day)/4 = Vuln_{clim} \quad (4)$$

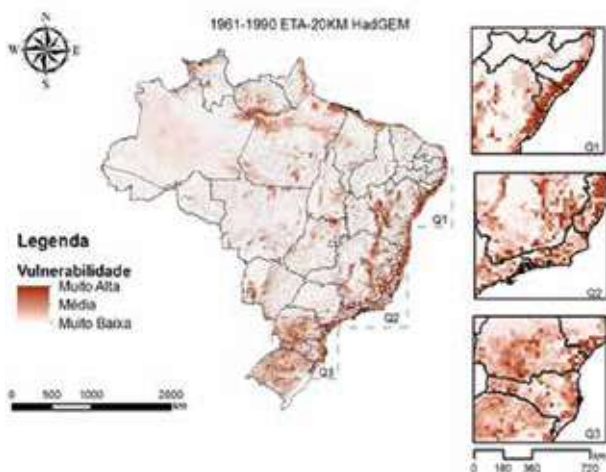
$$(2.0 * Declividade + 2.0 * Relevo)/4 = Vuln_{Fis.Amb} \quad (5)$$

$$(Vuln_{clim} + Vuln_{Fis.Amb}) * \left[0.67 + \frac{Vuln_{Soc}}{3} \right] = Vuln_{Mov.Massa} \quad (6)$$

O mapa gerado pela aplicação desse indicador está apresentado à direita da figura 9.

Figura 9 – (a) mapa de desastres naturais causados por movimentos de massa no Brasil no período de 1991 a 2010 (UFSC, 2012);
 (b) mapa gerado por meio do índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados a movimentos de massa utilizando dados climáticos provenientes do modelo Eta-HadGEM2-ES





Mapa de Vulnerabilidade e Desastres Naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos (Rx5Day, CWO, R95p e Rx1day) provenientes do modelo regional RTA-20Km HadGem. Autores: Pedro Ivo Camarinha e Nethan Debortoli.

b)

É importante destacar que a dimensão socioeconômica, para o caso dos movimentos de massa, consegue abrandar em até 33,3% o valor das dimensões naturais (climática e físico-ambiental). Esse valor também foi encontrado por meio do método interativo e representa uma parcela menor do que aquela encontrada para o caso de inundações (que foi de 50%).

Isso talvez seja explicado pelo fato de que os desastres que envolvem movimentos de massa, principalmente deslizamentos de terra, acontecem de forma mais rápida e súbita, fazendo com que seja mais difícil para a população atingida contornar os impactos causados. Além disso, outra hipótese é que essa natureza de desastres apresenta características que dificultam a percepção do risco, tornando a influência dos aspectos sociais elencados menos eficazes para diminuir a vulnerabilidade total.

O mapa de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados com movimentos de massa apresenta algumas peculiaridades que precisam ser ressaltadas. Diferente dos outros tipos de desastres, a representação de áreas altamente

vulneráveis se dá de forma pontual e concentrada, devido às características da suscetibilidade física aos movimentos de massa, sobretudo, os deslizamentos de terra. Para esse tipo de fenômeno, os desastres relacionados normalmente se caracterizam em locais sob ou próximo a encostas íngremes ou, ainda, em casos mais devastadores, de forma generalizada em subbacias que recebem eventos pluviométricos extremos, caracterizando o cenário de corrida de lama e(ou) de detritos. Embora sejam de magnitudes e impactos diferentes, em ambos os casos, a escala por onde se decorre o desastre, propriamente dito, é bem maior (requer maior detalhe) que a resolução do mapa gerado (20 km). Assim, os locais mais vulneráveis (classe “muito alta”) correspondem a pontos espaçados na malha geográfica e representam municípios isolados, ou um pequeno conjunto de municípios, onde há a sobreposição de fatores críticos nas dimensões física (suscetibilidade), climática (eventos pluviométricos extremos) e social da vulnerabilidade.

Destacam-se algumas regiões notórias e contínuas dentro da classe de vulnerabilidade “alta” e entremeadas pela classe “média”, tais como: o litoral que vai do Paraná até o Sul da Bahia; outra faixa litorânea que vai do Norte da Bahia até Pernambuco; a porção central de Minas Gerais em direção à Bahia, bem como o Sudoeste e o Sul do estado, onde faz divisa com o estado de São Paulo (serra da Mantiqueira); algumas localidades do Pará; e o norte do Amapá. De um modo geral, estas são exatamente as mesmas regiões apontadas pelo Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012) como as com maior número de ocorrências.

Para identificar os locais mais vulneráveis (classe “muito alta”), é preciso dar um *zoom* nessas regiões. Nota-se que existem alguns pontos espalhados pela porção geográfica em destaque e, ao cruzar estas localidades com a malha de municípios brasileiros, eles coincidem exatamente com os municípios que são frequentemente cenários de desastres envolvendo movimentos de massa, sobretudo, deslizamentos de terra, tais como: Região Metropolitana de São Paulo e Baixada Santista; litoral norte de São Paulo (Caraguatatuba, São Sebastião, Ubatuba e Ilhabela); divisa entre São Paulo e Rio de Janeiro (Cunha, São José do Barreiro e Angra dos Reis); Serra da Mantiqueira (Campos do Jordão e adjacências); Sul de Minas (Extrema, Cristina, Pedralva e adjacências); sudoeste de Minas (Delfinópolis); região Serrana

do Rio de Janeiro (onde se destaca Petrópolis, Sumidouro, Sapucaia e adjacências); e proximidades da serra do Caparaó (divisa do Espírito Santo com Minas Gerais), sendo que, nessa última, os impactos aos sistemas sociais não são comuns por ser uma região preservada pelo Parque Nacional do Caparaó.

Para elaborar o mapa de vulnerabilidade a desastres naturais envolvendo movimentos de massa a partir dos dados climáticos do Eta-MIROC5, utilizou-se a mesma base de dados espaciais que representa a dimensão social e físico-ambiental que foi necessária para a definição do índice estabelecido a partir dos dados do Eta-HadGEM2-ES. Para que se pudesse comparar os resultados dos diferentes modelos climáticos utilizados, a elaboração do mapa de vulnerabilidade a desastres relacionados a movimentos de massa a partir dos dados climáticos do Eta-MIROC5 utilizou o índice definido a partir das equações 4, 5 e 6. O resultado pode ser observado na figura 10.

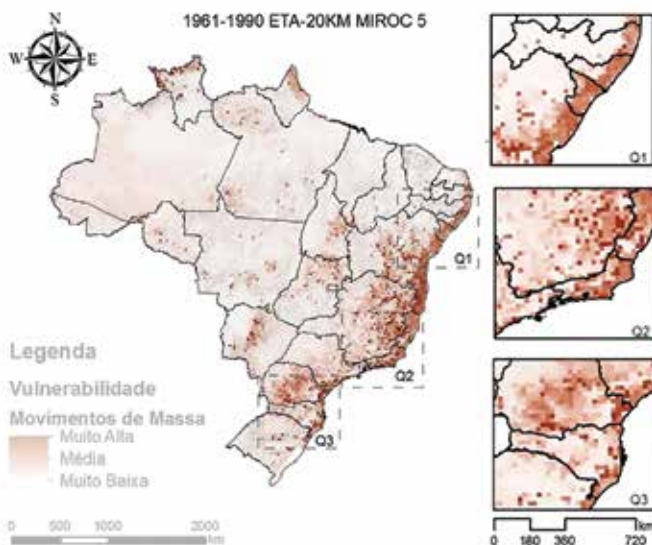
Nota-se que o mapa à direita da figura 10 representa uma aderência muito boa quando comparado com o mapa do Atlas do Ceped/UFSC (à esquerda), sobretudo, nas regiões mais críticas, tais como: áreas de serra na costa litorânea brasileira; região Serrana do Rio de Janeiro; parte montanhosa de Minas Gerais; além da boa definição do contraste existente no estado do Paraná. Comparando com o resultado proveniente dos dados do Eta-HadGEM2-ES (figura 9), o resultado a partir dos dados do Eta-MIROC5 apresenta, de um modo geral, melhor destreza para representar as regiões mais vulneráveis. Nesse tocante, ressalte-se a vantagem do MIROC5 por representar melhor o sul do Rio Grande do Sul, que não é uma região naturalmente atingida por desastres dessa natureza, mas que aparecia como de média/alta vulnerabilidade para o resultado utilizando o Eta-HadGEM2-ES. Talvez a única discrepância, em aspectos visuais de análise, é no estado do Pará e do Amazonas. Entretanto, é possível notar, no mapa da figura 10, que o estado do Pará apresenta algumas localidades com vulnerabilidade alta na sua porção oeste.

Com base nos resultados satisfatórios encontrados no modelo controle para o período de 1961–1990 (para ambas tipologias de desastres naturais), aplicou-se o índice para os períodos futuros (2011–2100).

Figura 10. (a) mapa de desastres naturais causados por movimentos de massa no Brasil no Período de 1991 a 2010 (UFSC, 2012); (b) embaixo, mapa gerado por meio do Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados a movimentos de massa utilizando dados climáticos do modelo Eta-MIROC5



a)



Mapa de Vulnerabilidade e Desastres Naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos (Rx5Day, CWO, R95p e Rx1day) provenientes do modelo regional ETA-20Km MIROC 5. Autores: Pedro Ivo Camarinha e Nethan Debortoli.

b)

4 Resultados dos índices de vulnerabilidade para o futuro

Após a validação dos índices apresentados anteriormente, foi possível alimentar os modelos encontrados (equações 3 e 6) com os dados climáticos gerados para os períodos futuros (2011–2040; 2041–2070 e 2071–2100), provenientes das rodadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, nos dois cenários RCP 4.5 e 8.5. Dessa forma, foi possível avaliar como a vulnerabilidade pode se alterar até o final do século XXI.

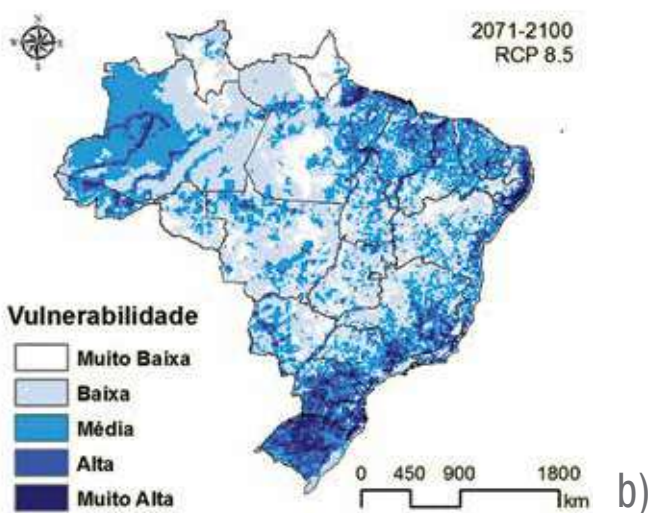
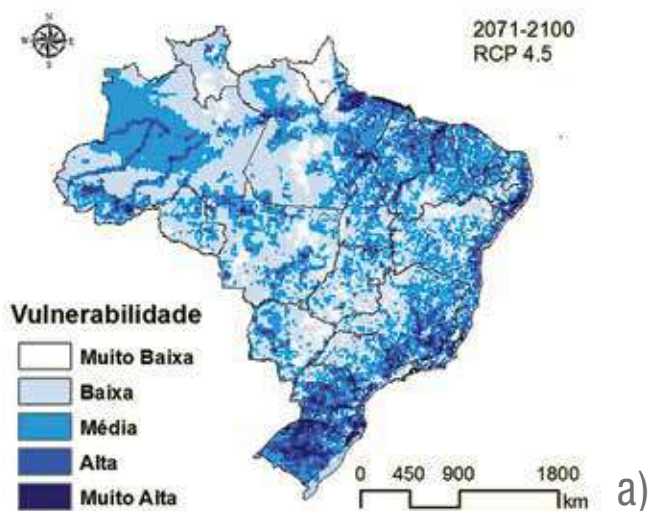
Entretanto, estão apresentados a seguir os resultados referentes apenas ao último período (2071–2100), pois os padrões de incremento do índice vulnerabilidade observados entre os períodos são os mesmos entre si, de modo que o último período consegue indicar mais claramente onde estão as regiões mais críticas. Dessa forma, a apresentação dos resultados fica sintetizada e é possível identificar com mais clareza os contrastes de vulnerabilidade que podem existir no Brasil, caso não se altere todo o cenário socioeconômico e ambiental observados nos dias atuais. Portanto, espera-se que os resultados apresentados a seguir possam trazer informações suficientes para nortear as estratégias futuras de adaptação às MC, bem como de redução do risco aos desastres.

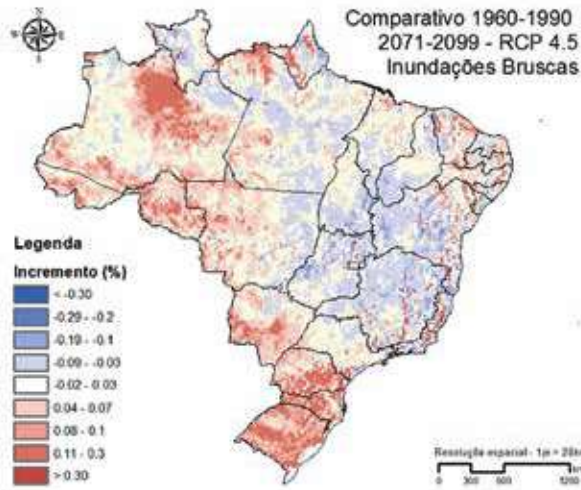
4.1 Índice de Vulnerabilidade para Inundações Bruscas, Enxurradas e Alagamentos

Na figura 11, estão apresentados os resultados referente à aplicação do índice estabelecido na equação 3, agora utilizando os dados climáticos do período de 2071–2100, provenientes do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Ao observar diretamente os mapas de vulnerabilidade gerados para os períodos futuros (parte superior da figura 11), quase não se identifica diferenças regionais notórias em relação ao mapa apresentado na figura 7. Isso porque os incrementos do índice de vulnerabilidade, em muitas localidades, não são suficientes para determinar mudança na classe de suscetibilidade; ou seja, se nos períodos futuros o mesmo ponto teve um incremento que não seja suficiente para que caracterizá-lo em outra

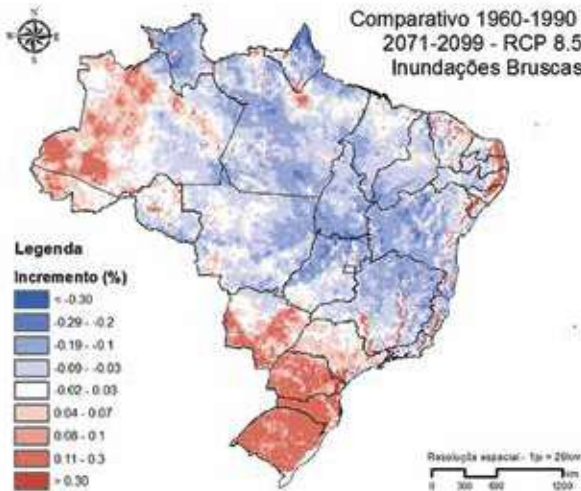
Figura 11 – (a) e (b) mapas de vulnerabilidade a desastres relacionados com inundações bruscas, enurradas e alagamento para o período futuro de 2071–2100 a partir do cenário RCP 4.5 e 8.5, utilizando o modelo Eta-HadGEM2-ES; (c) e (d) na página seguinte, encontram-se os mapas que representam os acréscimos ou decréscimos da vulnerabilidade (incrementos) quando comparados com a *baseline* (1961-1990), para o cenário RCP 4.5 e 8.5





Cálculo do incremento de Vulnerabilidade aos Desastres envolvendo Inundações. Diferença algébrica do índice para o período 2071–2099 e o *baseline* (1961–1990), dividido pelo *baseline*. Autores: Pedro Ivo Camarinha e Nethan Debortoli.

c)



Cálculo do incremento de Vulnerabilidade aos Desastres envolvendo Inundações. Diferença algébrica do índice para o período 2071–2099 e o *baseline* (1961–1990), dividido pelo *baseline*. Autores: Pedro Ivo Camarinha e Nethan Debortoli.

d)

classe, este permanecerá, visualmente, da mesma forma que no *baseline*. Além disso, se um determinado ponto pertence a alguma das classes extremas de vulnerabilidade (muito baixa ou muito alta), e este mesmo ponto possui um decréscimo/acrécimo de vulnerabilidade, respectivamente, visualmente ele permanecerá na mesma classe independente de quão alto é o incremento. Esse tipo de ocorrência é indesejável principalmente nas regiões extremamente vulneráveis no período presente, e que podem vir a se tornar ainda mais vulneráveis no futuro. Nesses casos, não seria possível identificar o quanto a vulnerabilidade foi intensificada. Para contornar essa limitação, optou-se por colocar os mapas de incremento apresentados na forma de porcentagem (inferior da figura 11). Dessa forma, a análise da evolução do índice de vulnerabilidade para o final do século XXI se torna mais nítida.

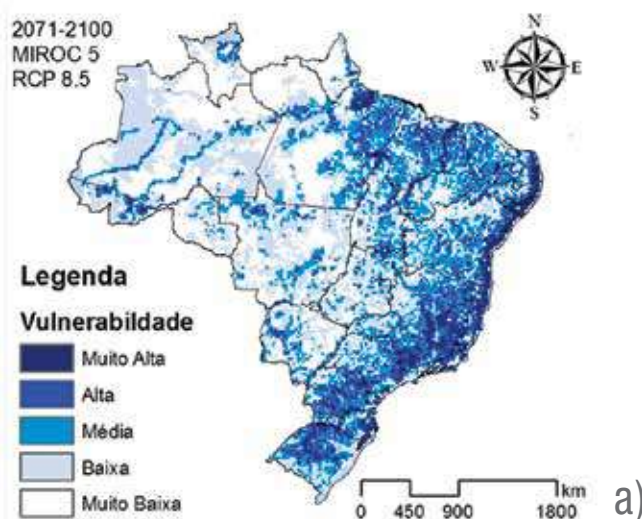
Analisando principalmente os mapas de incremento, existem convergências entre os resultados utilizando os cenários RCP 4.5 e 8.5. destaca-se nos dois cenários que a região central do Brasil, mais precisamente o sul do Piauí, o oeste da Bahia, o norte e oeste de Minas Gerais e Goiás, apresenta um decréscimo que varia de 15% até 25%, dependendo do cenário. Para o cenário RCP 8.5, praticamente toda a porção do território brasileiro que vai do Amapá a Mato Grosso, seguindo para o leste até a Bahia e o Rio de Janeiro, possuem um decréscimo médio de 20% do índice de vulnerabilidade. Por outro lado, nos dois cenários toda a região Sul do país sofre um aumento considerável, muitas vezes ultrapassando 30%. Nessas localidades, até mesmo no mapa de vulnerabilidade, é possível identificar a intensificação de áreas migrando para classes mais vulneráveis. Também merecem destaque: o sul e o leste de Mato Grosso do Sul; a região de Botucatu SP e as proximidades de Campinas SP; a divisa entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais; a faixa litorânea que vai de Sergipe até Natal RN; o norte do Ceará; uma porção do Pará que próximo a divisa com o Amapá; o Acre; e algumas faixas estreitas que cortam Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, quase sempre em áreas próximas às regiões de serra.

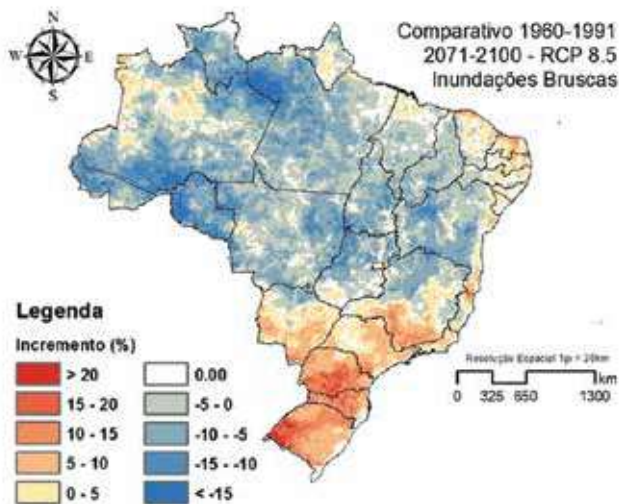
Todas essas localidades previamente citadas já se enquadram nas classes de vulnerabilidade alta ou muito alta no período presente, possuem históricos de recorrentes de inundações, enxurradas ou alagamentos altamente impactantes para sociedade e muito provavelmente se tornarão ainda mais vulneráveis no futuro. Para o estado do Amazonas, os dois cenários apresentam divergências em grande parte de seu

domínio. Apenas a região próxima a Manaus (AM) e na divisa com o Acre os dois cenários apontam um aumento do índice vulnerabilidade. Aumento este que pouco modifica as condições de vulnerabilidade em comparação com o período presente, avaliando-se as transições das classes. Essa é uma região de grande instabilidade climática, a qual também apresentou variações sem padrão dos índices extremos nos períodos entre 2011 e 2100, provavelmente com grande incerteza referente a esses aspectos.

Devido a problemas de inconsistência dos dados provenientes das rodadas do cenário RCP 4.5 pelo modelo Eta-MIROC5, o mapa de vulnerabilidade a inundações bruscas, enxurradas e alagamentos só foi efetuado para cenário RCP 8.5, que está apresentado à esquerda da figura 12. Do lado direito, está exposto o mapa de incrementos para melhor avaliar a evolução do índice vulnerabilidade quando comparada com a situação observada no *baseline* (figura 8).

Figura 12. (a) mapa de vulnerabilidade a desastres relacionados com inundações bruscas, enxurradas e alagamento para o período futuro de 2071–2100, utilizando os dados climáticos provenientes do Eta-MIROC5, cenário RCP 8.5; (b) mapa que representa os acréscimos ou decréscimos do índice de vulnerabilidade (incrementos) quando comparados com o *baseline* (1961–1990)





Cálculo do incremento de vulnerabilidade aos Desastres envolvendo Inundações. Diferença algébrica do índice para o período 2071–2100 e o *baseline* (1961–1990), dividido pelo *baseline*. Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli

b)

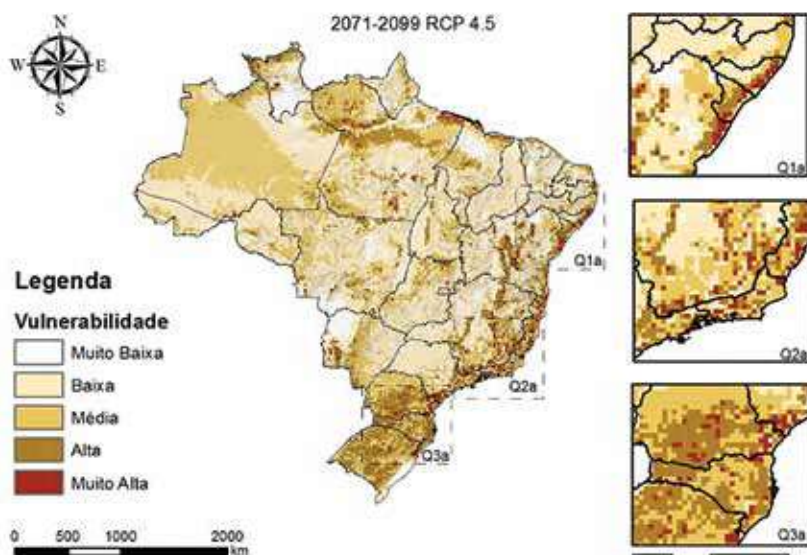
Por meio da figura 12, nota-se que as regiões que terão um maior acréscimo de vulnerabilidade estão no Sul, no Sudeste e em grande parte do litoral brasileiro, fato que converge com o resultado apresentado na figura 11 referente ao Eta-HadGEM2-ES. A diferença principal entre os mapas gerados a partir dos dois modelos é que os resultados provenientes dos dados do Eta-MIROC5 identificam um incremento positivo significativo em grande parte do interior e do Sul de Minas Gerais. Além disso, o incremento positivo no oeste da Amazônia é relativamente baixo no final do século XXI, condição esta bastante extrapolada pelos resultados do Eta-HadGEM2-ES. No que diz respeito ao Sul do Brasil, o resultado apresentado na figura 12 mostra com maiores contrastes o incremento positivo, destacando-se a porção central e sul do estado do Paraná, bem como o extremo sudoeste do Rio Grande do Sul. Destaca-se também a diferença relacionada ao Rio de Janeiro, o qual apresenta um abrandamento nos resultados do Eta-HadGEM2-ES, mas que claramente apresenta um incremento positivo (em torno de 10%) em todas as porções do estado. Para as demais regiões do Brasil, os dois modelos indicaram uma redução do índice de vulnerabilidade aos desastres

relacionados com inundações bruscas devido à queda dos índices de extremos de precipitação, fato este intimamente ligado com a queda brusca da pluviométrica média anual e aquecimento da temperatura média.

4.2 Índice de Vulnerabilidade – Movimentos de massa

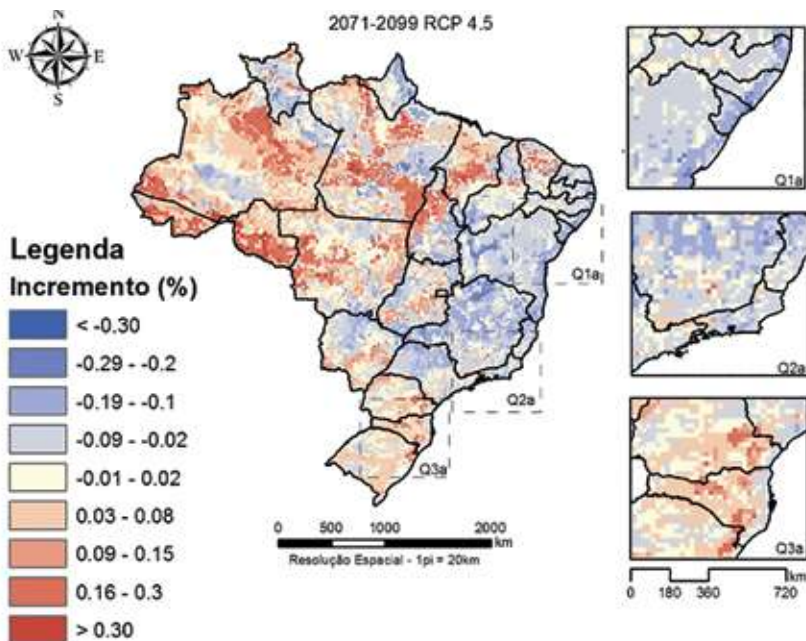
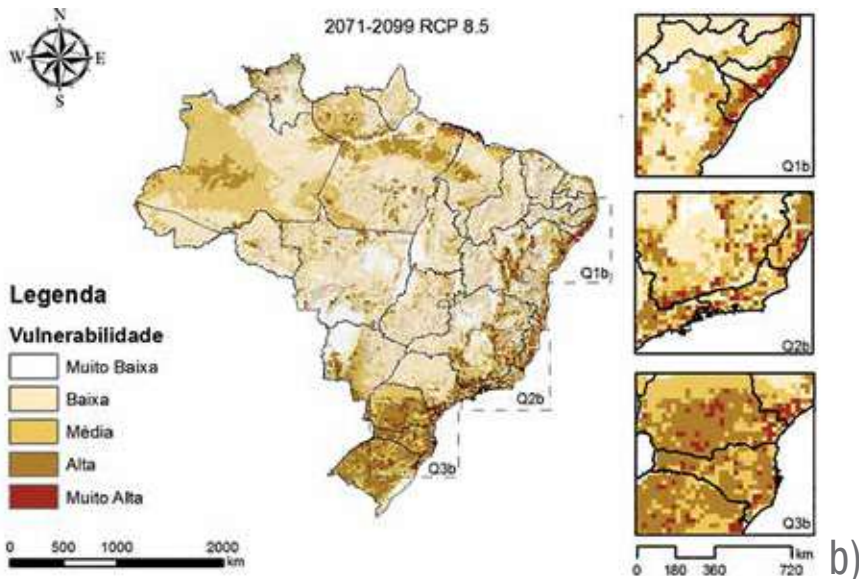
Primeiramente, são apresentados os resultados encontrados utilizando os dados climáticos provenientes do modelo Eta-HadGEM2-ES, no período de 2071–2099 (figura 13).

Figura 13. (a) e (b) mapas de vulnerabilidade a desastres relacionados movimentos de massa para o período futuro de 2071–2100 a partir do cenário RCP 4.5 e 8.5, utilizando dados climáticos provenientes do Eta-HadGEM2-ES; (c) e (d) encontram-se, mapas de incrementos de vulnerabilidade quando comparados com o *baseline* (1961–1990), para o cenário RCP 4.5 e 8.5

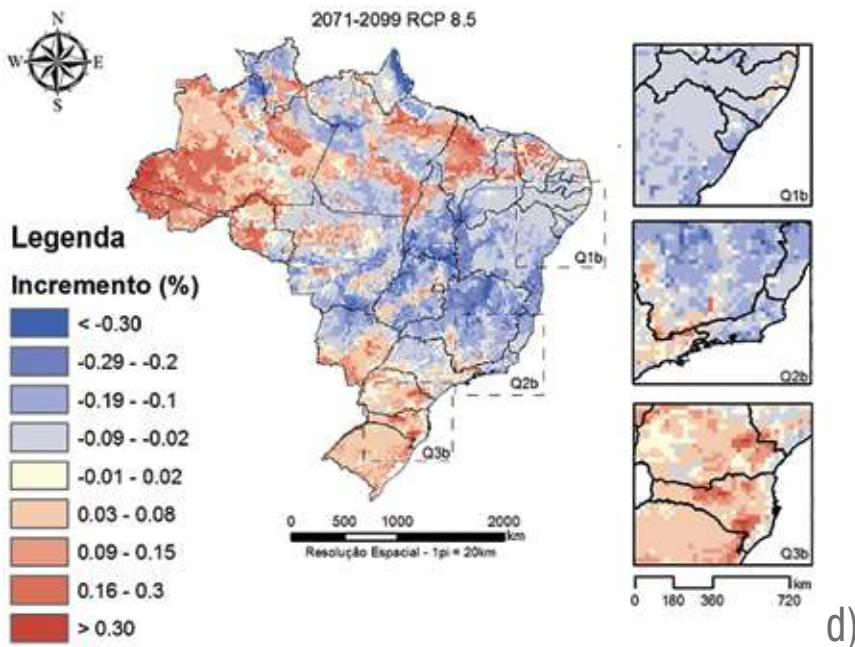


Mapa de Vulnerabilidade a Desastres Naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos (Rx5Day, CWD, R95p e Rx1day) provenientes do modelo regional ETA-20km HadGem. Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli.

a)



Mapa de Incremento (aumento ou diminuição) da vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimento de massa, comparando o período de 2071–2100 com o *baseline* (1961–1990). Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli.



Mapa de Incremento (aumento ou diminuição) da vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimento de massa, comparando o período de 2071–2100 com o *baseline* (1961–1990). Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli.

De uma maneira geral, os mapas apresentados na parte superior da figura 13 continuam com os mesmos padrões apresentados no *baseline*. Somente é possível observar mudanças de transição de uma classe de vulnerabilidade para outra ao olhar os quadros de detalhe e, mesmo assim, poucas são as alterações.

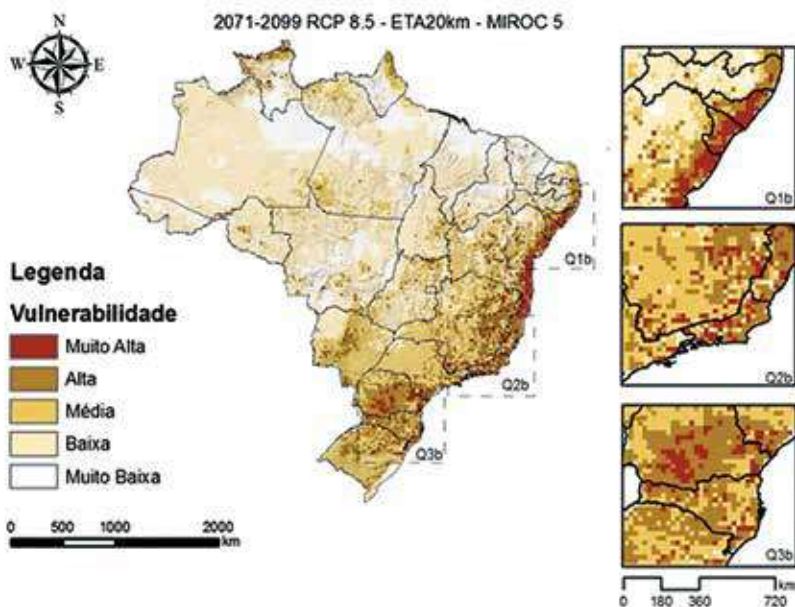
Entretanto, o mapa que avalia o incremento do índice de vulnerabilidade consegue distinguir melhor quais regiões poderão se tornar mais críticas no futuro. Nesse aspecto, as regiões que mais merecem destaque são: a porção central de Santa Catarina e o sudeste desse estado, na divisa com o Rio Grande Sul; o leste do Paraná; o litoral norte de São Paulo e a Serra da Mantiqueira, principalmente a divisa com Minas Gerais; e, ainda, um pequeno trecho que engloba a região Serрана do Rio de Janeiro e seu litoral adjacente. Esses locais são caracterizados como cenários de desastres envolvendo movimentos de massa e tem fortes indícios de que poderá haver a intensificação da ocorrência destes no futuro, uma vez que possuem um incremento positivo entre 5% e 15% segundo o modelo adotado. Uma

grande parcela do estado do Pará e o oeste do Maranhão também se enquadra nesse contexto; locais estes que recebem um incremento ainda maior de vulnerabilidade, chegando a 30% de acréscimo.

Destaca-se também a redução do índice de vulnerabilidade na região central do país devido às tendências de decréscimo dos eventos pluviométricos extremos, especificamente em grande parte de Goiás, no leste e no norte de Minas Gerais, no leste da Bahia e no sudeste do Piauí; regiões estas que também tiveram um decréscimo considerável no Mapa de vulnerabilidade a inundações. Já na faixa litorânea que vai do Rio de Janeiro até o Rio Grande do Norte, é preciso avaliar o incremento negativo com cuidado. Mesmo havendo indícios, por meio dos dois cenários, que, nessas regiões, há um decaimento do índice de vulnerabilidade a desastres relacionados a movimentos de massa, estas também eram das regiões que foram identificadas no período presente com uma das mais vulneráveis. Com isso, o indicativo da redução do índice de vulnerabilidade em torno de 5% a 10% não seria significativa para afirmar que essas localidades passariam a ser menos frequentemente atingidas por desastres relacionados, pois ainda se caracterizam, por todos os demais aspectos da vulnerabilidade, como regiões muito vulneráveis.

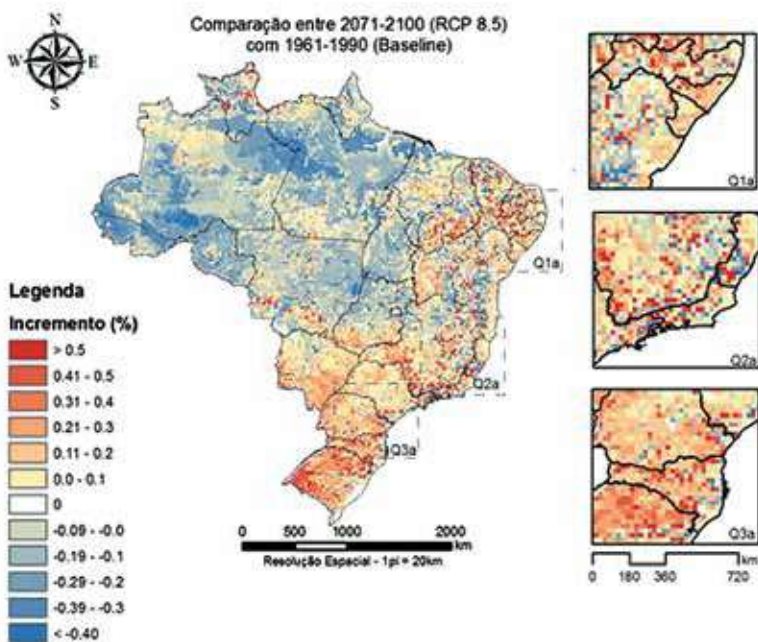
A seguir, estão apresentados os mesmos resultados do índice de vulnerabilidade para o caso que utilizou os dados climáticos provenientes do modelo Eta-MIROC5. Conforme explicado anteriormente, devido a algumas inconsistências, os dados do cenário RCP 8.5 não estavam disponíveis, de modo que, para o Eta-MIROC5, só estão apresentados os resultados para o cenário RCP 4.5 (figura 14).

Figura 14 – (a) mapa de vulnerabilidade a desastres relacionados com movimentos de massa para o período futuro de 2071–2100, utilizando os dados climáticos provenientes do Eta-MIROC5, cenário RCP 8.5; (b), mapa que representa os acréscimos ou decréscimos do índice de vulnerabilidade (incrementos) quando comparados com o *Baseline* (1961–1990)



Mapa de Vulnerabilidade a Desastres Naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos (Rx5Day, CWD, R95p e Rx1day) provenientes do modelo regional ETA-20km MIROC 5. Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli.

a)



Mapa de Incremento (aumento ou diminuição) da vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimento de massa, comparando o período de 2071–2100 com o *baseline* (1961–1990). Autores: Pedro Ivo Campanha e Nathan Debortoli. **b)**

Nota-se que existem incrementos do índice de vulnerabilidade da ordem de até 40% para o final do século, segundo as projeções do Eta-MIROC5. Nesse aspecto, destacam-se as regiões com alta vulnerabilidade no período presente e que se tornarão ainda mais vulneráveis, tais como a região Serrana do Rio de Janeiro, parte da serra da Mantiqueira, o interior e o Sul de Minas Gerais e localidades variadas no litoral. No Sul do país, encontram-se regiões com incrementos mais notórios (50%), passando da condição de “baixa” vulnerabilidade no período presente para “alta” no final do século.

Comparando com os resultados do Eta-HadGEM2-ES, os padrões espaciais do incremento proveniente dos dados do Eta-MIROC5 são mais homogêneos em escala nacional. Ressalte-se que praticamente toda a região Centro-Oeste e a região Norte são caracterizadas por decréscimos em torno de 25%, resultado este bem divergente daquele observado pelo Eta-HadGEM2-ES. Outra diferença notória é a região Nordeste, a qual sofreria um abrandamento segundo os dados do

Eta-HadGEM2-ES, mas que recebem um incremento positivo em torno de 30% no caso do Eta-MIROC5. Os dois modelos se convergem em poucas localidades, tendo como exemplo o aumento do índice de vulnerabilidade de praticamente toda a região Sul e parte do sul do estado de São Paulo. Entretanto, devido à melhor aderência do mapa para o período presente (figura 10), há indícios que a projeção mais confiável para o futuro seria o resultado apontado pelo mapa que utiliza os dados do MIROC5 (figura 14).

5 Considerações finais

Este estudo esteve limitado à utilização dos índices de extremos climáticos de precipitação já calculados pelo INPE, a partir do modelo regional Eta-20km rodados com os modelos globais HadGEM2 ES e MIROC 5. Entretanto, na literatura, é possível encontrar algumas sugestões de outros índices que podem ser implementados na análise em etapas futuras, tais como o índice R99p ou avaliações que englobem o SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). Além dessas limitações, é importante destacar que a construção de um índice único para todo o Brasil possa mascarar fatores condicionantes regionais importantes, bem como diferentes pesos de significância entre as variáveis utilizadas para representar cada fenômeno. Por esse motivo, recomenda-se o desenvolvimento de índices semelhantes ao apresentado neste trabalho, mas a partir de uma visão regional que considera suas especificidades. Os dados utilizados neste trabalho, sobretudo, os socioeconômicos, limitaram-se a bases de dados nacionais, que poderiam ser melhor exploradas a partir do refinamento das análises para os estados ou regiões brasileiras de maior interesse. Somente desse modo, seria possível considerar e aprofundar os aspectos político-institucionais, características ambientais e socioeconômicas não disponíveis em caráter nacional para todos os municípios brasileiros.

De qualquer modo, os resultados expostos até aqui evidenciam satisfatoriamente que o Brasil possui muitas localidades altamente vulneráveis aos desastres naturais de natureza hidrometeorológica que foram considerados neste estudo. Destacam-se as inundações bruscas por impactar um número vasto de municípios em todas as regiões do país. Ademais, a grande maioria das regiões

montanhosas com relevo acidentado, principalmente na faixa litorânea, apresentam-se como altamente vulneráveis às precipitações intensas deflagradoras de movimentos de massa, que são os processos mais devastadores. Esta vulnerabilidade é comumente exacerbada devido à dinâmica social e econômica da ocupação do solo que, por muitas vezes, caracterizam as áreas de risco. Por meio das análises feitas, pode-se dizer que esse cenário observado no tempo presente é ainda mais delicado para algumas localidades que já sofrem com os desastres, pois há fortes indícios de que eventos pluviométricos extremos de magnitude incomum poderão se tornar mais frequentes e ainda mais severos.

Mesmo não sendo objeto de estudo deste trabalho, é preciso ressaltar que as leis de ordenamento territorial, tais como o Código Florestal e os planos diretores das cidades (balizadores e ordenadores cruciais para a correta ocupação e uso da terra, objetivando os princípios de prevenção e precaução contra o risco), não são necessariamente seguidos à risca pelos sucessivos governos. Essa inação por parte dos entes públicos engloba não somente regiões naturalmente vulneráveis aos desastres, mas também outras que, devido a essas irregularidades, dão margem para se tornar suscetíveis e vulneráveis aos impactos causados pelos fenômenos estudados. Dessa forma, os municípios se deparam com desafios cada vez maiores de infraestrutura e fiscalização, e se veem menos eficazes no suprimento de demandas populacionais vinculadas ao planejamento territorial e ao uso e à ocupação do solo (MENDONÇA 2010, 2011; ROMERO, 2012). Mais especificamente, os pontos críticos nessa problemática relacionam-se ao adensamento urbano aliado ao desmatamento ilegal; à ocupação desordenada de áreas de risco com grande declividade; à ocupação de áreas de preservação permanente (APP) em beira de corpos d'água, topos de morro e declividades superiores a 45°; e à falta de poder de fiscalização (comando e controle), que estimulam a ocupação irregular de áreas protegidas, algumas vezes repercutindo na impermeabilização do solo, por meio de autorizações de alvarás em áreas consideradas impróprias para ocupação e urbanização.

Dessa forma, a gestão integrada de risco aos desastres naturais deve incluir o mapeamento e a análise de riscos e vulnerabilidades em nível municipal, aos quais determinadas comunidades e pessoas estão expostas, possibilitando a

elaboração de programas, planos e medidas com a finalidade de prevenir e diminuir os riscos relativos à exposição. Essas máximas se tornam necessárias para que haja a articulação entre os diferentes atores e protagonistas locais, no sentido de mobilizá-los para o enfrentamento e gerenciamento integrado do risco aos desastres. Portanto, a resiliência das comunidades e sua integração com o gerenciamento do risco devem acontecer por meio de pequenas mudanças que podem caracterizar avanços consideráveis. Nesse contexto, atividades educacionais são fundamentais e devem prover o entendimento/compreensão dos riscos existentes nas comunidades, apontando a interface que relaciona a interação homem-ambiente-risco, além da explanação de como os fatores climáticos propulsionam a questão dos desastres no Brasil.

Levando em consideração que as medidas mais efetivas e diretas para a diminuição do risco acontecem em nível local, as informações prestadas e resultantes deste trabalho, em âmbito nacional, permitem um melhor direcionamento de recursos humanos e financeiros para a preparação dos municípios e regiões consideradas críticas, visando minimizar e abrandar os impactos iminentes. Ressalte-se que as análises apresentadas atendem as demandas da Terceira Comunicação Nacional às Mudanças Climáticas, abrangendo todo o território nacional, mas que permitem sua aplicação de forma análoga para casos específicos em localidades de interesse. Se comparados os resultados de vulnerabilidade provenientes dos dados climáticos dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, verifica-se que eles convergem em vários aspectos e consolidam a importância de que políticas públicas devem ser implementadas brevemente, a fim de poupar prejuízos financeiros e humanos nas próximas décadas. Por esses processos envolverem dimensões políticas e burocráticas, normalmente, eles ocorrem de forma lenta e gradual (longo prazo), fazendo com que as ações de monitoramento e alerta ocupem uma posição importantíssima na gestão dos desastres desde agora. Essas ações se tornam a forma mais imediata (curto prazo) de alcançar resultados, mas que não devem ser as únicas implementadas para sanar a grande problemática dos desastres.

Referências

- ABMS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DO SOLO. 2011. **Região Serrana do Rio de Janeiro: Lições de nossa maior tragédia**. Disponível em: www.abms.com.br. Acessado em: 08 de maio de 2012.
- ALEXANDER, D. **Natural Disasters**. New York: Chapman & Hall, 1993. 633p.
- ALMEIDA, L. Q.; PASCOALINO, A. **Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no Brasil**. Um estudo de caso sobre os desastres naturais de Santa Catarina. Disponível em: www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos.../061.pdf. Acesso em: 11 nov. 2015.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas de vulnerabilidade a inundações**. Brasília: ANA, 2014. 13p.
- BLAIKIE, P. *et al.* **At Risk: natural hazards, peoples vulnerability, and disasters**. London: Routledge, 1994.
- BRASIL. **Manual de Planejamento em Defesa Civil – Volume II**. 1. ed. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil, 1999a. p. 73.
- _____. **Manual de Planejamento em Defesa Civil – Volume III**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil, 1999b. p. 82.
- _____. **Manual de Planejamento em Defesa Civil – Volume IV**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil, 1999c. p. 58.
- _____. **Manual de desastres Mistos (Vol. III)**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil. 2002.
- _____. **Manual de desastres – desastres naturais (Vol. I)**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil. 2003. p. 174.
- _____. Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Orgs.). Brasília: Ministério das Cidades; IPT, 2007. 176 p.
- _____. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Gestão de riscos e de desastres: contribuições da psicologia**. Curso a distância / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre desastres. Florianópolis: Ceped, 2010. 156 p.
- _____. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Deslizamentos de terra são a maior causa de mortes por desastres naturais**. 2011. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2011/03/deslizamentos-de-terra-sao-a-maior-caoa-de-mortes-por-desastres-naturais-diz-secretario>. Acesso em: 12 set. 2014.

_____. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais**: 2012. Brasília: Cenad, 2012. 84 p.

CHOU, S. *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014. DOI: <10.4236/ajcc.2014.35039>.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, L. W. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, p. 251-271, 1998.

DUNNING, M. C. Social Vulnerability Analysis Methods for Corps Planning. **Revised Draft Report**, Alexandria, VA, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, 2009.

FEARNSIDE, P. M. **A ocupação humana de Rondônia**: impactos, limites e planejamento. Brasília: Assessoria Editorial e Divulgação Científica, 1989. 76 p. (Relatório de Pesquisa, 5).

_____. Monitoring needs to transform Amazonian forest maintenance into a global warming mitigation option. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 2, n. 2-3, p. 285-302, 1997.

FRANKE B.; SEVEGNANI L. (Org.). **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí** : água, gente e política. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009.

GOLDEMBERG, J. Mudanças climáticas e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 14, n. 39, maio/ago. 2000.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2863-2880, 1998.

HANSEN, J. *et al.* Global surface temperature change. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010.

HECHT, S. B. The logic of livestock and deforestation in amazonia. **BioScience**, v. 43, n. 10, p. 687-695, 1993.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base cartográfica contínua do Brasil ao Milionésimo** – Versão 3. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/base_continua_ao_milionesimo/>. Acesso em: 24 set. 2014.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001**. IPCC third assessment report. Geneva: IPCC Secretariat, 2001.

_____. IPCC fourth assessment report climate change 2007. Geneva: IPCC, 2007.

_____. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [FIELD, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

_____. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2013. p. 1535.

KOSATSKY, T. The 2003 European heatwaves. **Euro Surveillance**, v. 10, n. 7, p. 148-149, 2005.

LACERDA, N. *et al.* Planos diretores municipais: aspectos legais e conceituais. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**. 2011. Disponível em: <<http://unuhospedagem.com.br/revista/rbeur/index.php/rbeur/article/view/135/119>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

LINDOSO, D; ROCHA, J.; DEBORTOLI, N. *et al.* Integrated assessment of smallholder farmings vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: a case study in Ceará. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 93-105, 2014.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade** – Caracterização do Clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do sul para o Século XXI derivados dos modelos Globais de Clima IPCC. São Paulo: CPTEC/INPE, 2007. p. 185.

MARENGO, J. A. *et al.* **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS. 2009a.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009b.

MARENGO, J. A. *et al.* The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.

MARENGO, J. A. *et al.* **Avaliação dos Impactos e Vulnerabilidades às Mudanças Climáticas no Brasil e Estratégias para a implementação de Opções de Adaptação**. 2015. (In press).

MCTAGGART-COWAN, R. *et al.* Analysis of Hurricane Catarina (2004). **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 134, p. 3029-3053, nov. 2006.

MENDONÇA, M. A Vulnerabilidade da urbanização do Centro Sul do Brasil frente à variabilidade climática. **Investigaciones Geográficas**, Universidade do Chile, 2010, v. 42, p. 54-87.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Facing Hazards and Disasters: Understanding Human Dimensions**. Committee on Disaster Reduction in the Social Sciences: Future Challenges and Opportunities. Washington, D. C.: National Academy Press, 2006.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. 24 p.

PEDUZZI, P.; DAO, H.; HEROLD, C.; MOUTON, F. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. **Natural Hazards Earth System Sciences**, v. 9, n. 4, p. 1149-1159, 2009.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro**. Brasília: Pnud; Ipea; FJP, 2013. 96 p.

REIS, E. J.; MARGULIS, S. Perspectivas Econômicas do Desflorestamento da Amazônia. **Textos para Discussão**, Brasília, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), n. 215, 47 p., 1991.

ROBERTS, P. **O fim dos alimentos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

RODRIGUES, R. R., MCPHADEN, M. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 3, p. 1012-1018, 2014.

ROMERO, H.; MENDONÇA, M. Amenazas naturales y Evaluación Subjetiva em La Construcción de La Vulnerabilidad Social ante desastres naturales en Chile y Brasil. **INTERthesis**, Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 127-180, 2012.

SCHWARZE, R; WAGNER, G. G. The political economy of natural disaster insurance: lessons from the failure of a proposed compulsory insurance scheme in Germany. **European Environment**, v. 17, n. 6, p. 403-415, 2007.

SPAROVEK, G. *et al.* A revisão do Código Florestal brasileiro. **Novos estudos – Cebrap**, São Paulo, n. 89, p.111-135, 2011.

TOMINAGA, L.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TONBIN, G. A. **Natural Hazards: explanation and integration**. Nova Iorque: The Guilford Press, 2004, 388p.

UFSC – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010**. Florianópolis: Ceped/UFSC, 2012.

_____. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: Ceped/UFSC, 2013a.

_____. Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres. **Capacitação básica em Defesa Civil**. 3. ed. [Textos: FURTADO J.; DE OLIVEIRA M.; DANTAS M. C.; SOUZA P. P.; PANCERI R.]. Florianópolis: CAD UFSC, 2013b. 122 p.

VALENCIO, N.F.L.S.; MARCHEZINI, V.; SIENA, M. **Após o desastre: abrigos temporários como loci de reafirmação da vulnerabilidade dos afetados pelas chuvas**. In: Reunião Brasileira de Antropologia, 26., 2008, Porto Seguro. Disponível em: <http://201.48.149.88/abant/arquivos/6_5_2008_10_8_47.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2015.

VAN DER VEEN, A. *et al.* **State-of-art on vulnerability of socio-economic systems**. Del. 1.1.3 of the ENSURE EC FP7 Project: Methodologies to assess vulnerability of structural, territorial and economic systems. Brussels: EC, 2009.

VEYRET, I. **Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. 2. ed. São Paulo: Contexto, 2013. 315p.

WHITE, P. *et al.* **Disaster Risk Reduction: A Development Concern**. A Scoping Study on Links between Disaster Risk Reduction, Poverty and Development. London, UK: Department for International Development, 2004.

WWF – WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Planeta Vivo Relatório 2010**: Biodiversidade, biocapacidade e desenvolvimento. London, England: WWF, 2010.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte e apoio da Sub-Rede de desastres naturais da Rede CLIMA, o PNUD, o INPE e o MCTI no desenvolvimento deste trabalho.



Vulnerabilidade, riscos e impactos das mudanças climáticas sobre a saúde no Brasil

Sandra de Souza Hacon

Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP)/Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Duarte Costa

Exeter Climate Systems/Earth System Science/Universidade de Exeter

Alexandre S.P. Siqueira

Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP)/Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Samya de L. Pinheiro

Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP)/Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Karen S. Gonçalves

Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP)/Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Andreia Oliveira

Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP)/Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Christovam Barcellos

Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde (ICT)/
Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Resumo

As mudanças climáticas podem gerar impactos negativos significativos sobre a saúde pública, mesmo considerando um cenário otimista para o desenvolvimento socioeconômico futuro e com medidas de adaptação em implementação. Contudo, os impactos na saúde resultantes das alterações climáticas dependerão do estado geral de saúde das populações expostas que, por sua vez, dependem de futuras condições socioeconômicas e outros fatores importantes, como a cobertura de saúde universal e a governança socioambiental.

Os resultados do presente estudo corroboram com os achados da literatura internacional para os cenários analisados, embora a carência de estudos nacionais, abordando a diversidade e a heterogeneidade das regiões brasileiras represente uma lacuna sobre os impactos das alterações climáticas para a saúde dos brasileiros.

O Brasil é um país com grande heterogeneidade, complexidade, diversidade social, ecológica e climática. Encontrar um limiar térmico no Brasil e nas suas várias regiões, a partir do qual poderá haver alterações drásticas e irreversíveis na ocorrência de algumas doenças, será um desafio para estimar não só os impactos diretos na saúde de um clima mais quente, mas também os efeitos indiretos. Entre esses efeitos está, por exemplo, o surgimento de novas doenças e cepas de agentes patogênicos associadas a alterações nos nichos ecológicos de vetores e ajustes de sobrevivência da fauna e da flora a um novo padrão climático.

A relação entre clima e saúde não é linear, nem simétrica, nem livre da influência de outros fatores de risco. Essa interação é mediada por fatores ambientais, sociais, espaciais, temporais e econômicos que se inter-relacionam de forma complexa e dinâmica. Devido a essa complexidade, nem sempre se dispõe de análises sobre o impacto do clima na saúde, uma vez que avaliações quantitativas, seja em termos de risco, carga de doença ou econômicos, exigem um grande esforço de modelagem e cenários que fielmente representem a heterogeneidade e a conectividade entre os vários componentes de um sistema de interações complexas.

Considerando a importância dos determinantes sociais para proposição de ações interseoriais que busquem diminuir as iniquidades em saúde, em especial para os cenários das mudanças climáticas, neste capítulo é apresentada uma análise de alguns indicadores socioeconômicos, sanitários e de acesso aos serviços de saúde que foram selecionados em função da sua relação com a morbidade e a mortalidade estudadas neste. Este capítulo está estruturado com o objetivo de analisar e discutir: (1) a exposição ao clima futuro no Brasil; (2) a vulnerabilidade socioeconômica atual; (3) o risco climático inerente ao produto dessa exposição futura e vulnerabilidade atual; e (4) o impacto para a mortalidade geral e as doenças diarreicas

associadas ao aumento de extremos de calor e de temperatura, respectivamente. Espera-se que estas avaliações da relação entre clima e saúde possam contribuir com as discussões sobre os efeitos das mudanças do clima no âmbito da saúde no Brasil.

Palavras-chave: Municipalização das projeções climáticas. Risco climático. Ondas de calor. Mortalidade geral. Saúde humana.

1 Introdução

As mudanças socioambientais globais têm influenciado os padrões climáticos com impactos diretos e indiretos na saúde humana, refletindo as inter-relações de pressão, estresse e tensões decorrentes do crescimento populacional, das atividades econômicas, da urbanização, da expansão do consumo e, principalmente, das desigualdades sociais.

Nas últimas décadas, a conectividade internacional aumentou em muitas frentes, incluindo o fluxo de informação, a circulação de pessoas, os padrões de negociação, o fluxo de capitais e os sistemas de regulação e de difusão cultural. Além disso, os incrementos exponenciais na demografia, na exploração dos recursos naturais e nas atividades econômicas e comerciais têm resultado em grandes alterações dos sistemas globais naturais da Terra para além das fronteiras consideradas seguras com impactos diretos no clima. Essas mudanças representam ameaças fundamentais para o bem-estar humano e para a saúde coletiva do planeta (MCMICHAEL, 2013).

Essas ameaças ocorrem diretamente devido às mudanças de temperatura e precipitação e à ocorrência de extremos climáticos como as ondas de calor, inundações, secas e incêndios florestais. Indiretamente, a saúde pode ser impactada por perturbações ecológicas provocadas por alterações climáticas (quebras de safra, mudança nos padrões de vetores de doenças, escassez de alimentos, contaminação

das águas, do ar, dos alimentos) ou respostas sociais para as alterações climáticas, como deslocamento de populações devido à seca prolongada.

A expressão das transformações ambientais na saúde humana, mais especificamente aquelas induzidas pelas mudanças climáticas, como o aumento da temperatura média global do planeta, conduz a diferentes aumentos regionais de temperatura que por consequência criam diversos cenários de exposição humana, ecológica e ambiental (IPCC WG1, 2013) com impactos diretos e indiretos para a saúde pública. Esses impactos poderão ser potencializados ou minimizados em função das características dos determinantes individuais e coletivos inerentes a uma determinada organização social e de suas inter-relações. Nessa perspectiva, os riscos à saúde advindos das mudanças climáticas globais devem ser analisados em conjunto com os determinantes sociais, propiciando a identificação de pontos de atuação de políticas públicas intersetoriais objetivando o aumento da capacidade de previsão, resposta e adaptação de grupos populacionais aos problemas de saúde.

Segundo o mais recente relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, na sigla em inglês), o Brasil é a região tropical do mundo que mais notoriamente aqueceu durante o período de 1901–2012, segundo os registros observacionais publicados no relatório (IPCC WG1, 2013). De acordo com Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), as projeções climáticas apontam um aumento de temperatura em todos os biomas brasileiros com alterações nos regimes pluviométricos. Na Amazônia, no Pantanal, no Cerrado, na Caatinga e porção norte e nordeste da Mata Atlântica foi detectada redução de chuvas, enquanto que as projeções apontam aumento de precipitação no Pampa e porção sul e sudeste da Mata Atlântica (PBMC, 2013). Essas projeções de alterações climáticas globais podem refletir em alterações em padrões climáticos locais. Além de aumento da temperatura e das mudanças nos regimes de precipitação, eventos extremos podem se tornar mais intensos e frequentes com impactos diretos e indiretos para a saúde humana.

No que concerne ao setor de saúde, existe o desafio de estimar um limiar crítico de aquecimento a partir do qual se possa prever mudanças significativas no modo como as várias doenças sensíveis ao clima (DSC) ocorrem, bem como

a interação da temperatura com outros fatores ambientais. Ultrapassar esse limiar implicaria alterações na carga de doença associada às mudanças climáticas e às transformações das condições ambientais e socioeconômicas com efeitos nos padrões epidemiológicos dessas mesmas doenças (MCMICHAEL *et al.*, 2004).

No contexto das mudanças climáticas, as alterações do padrão climático o aumento da temperatura, a baixa umidade relativa do ar, os extremos de seca e chuva, entre outros fatores, poderão acelerar as alterações na situação de saúde relacionadas a problemas agudos como o incremento de hospitalizações, a indução de morte prematura por doenças do aparelho circulatório e do aparelho respiratório, o aumento das doenças mentais. Globalmente, as doenças diarreicas lideram as causas de mortalidade infantil nos países em desenvolvimento (CHECKLEY *et al.*, 2000). No Brasil, esse cenário não é diferente com o agravamento da situação de saúde devido não só ao sistema precário de saneamento (BUHLER *et al.*, 2014) e à contaminação das águas, como também à elevação da temperatura média, à ocorrência de ondas de calor mais frequente e aos episódios das enchentes e secas. As gastroenterites, a leptospirose e as hepatites também se destacam em relação às doenças veiculadas pela água e sensíveis ao clima (BARCELLOS *et al.*, 2009). Extremos de temperatura apontam sérios problemas para a saúde pública nas últimas décadas em diversas nações do mundo, causando incrementos na mortalidade (PATZ *et al.*, 2000), principalmente para os grupos mais vulneráveis. Em países tropicais, como o Brasil, com grandes desigualdades sociais, o impacto desse aumento de temperatura e da frequência de ondas de calor na mortalidade poderá ser mais severo.

Nesse contexto, o setor de saúde se configura como um dos mais estratégicos e complexos, pois absorve os efeitos das mudanças climáticas que se inter-relacionam com vários fatores que podem alterar a distribuição espacial e temporal das doenças infecciosas, assim como das não transmissíveis. As atividades humanas e comportamentais também são determinantes críticos dos agravos e das doenças, assim como os fatores sociodemográficos. Todos esses fatores podem influenciar os fatores climáticos exacerbando a ocorrência de agravos e doenças. As mudanças climáticas implicam em riscos prementes, e as dificuldades em mensurar seus efeitos são inegáveis. Assumir o desafio de transformar tais dificuldades em oportunidades e de levar a debate a relação entre clima e saúde no Brasil é tarefa inadiável.

Os resultados desse processo de avaliação, ainda que sujeito a limitações e incertezas, podem subsidiar a análise crítica da efetividade das políticas de saúde frente ao risco climático. Esses resultados poderão também servir como parâmetros no processo de decisão sobre onde e como atuar para incrementar a capacidade de resposta do setor saúde e para reduzir a vulnerabilidade das populações.

Por isso, a avaliação dos diversos desfechos em saúde associados às mudanças no clima, a identificação dos grupos mais vulneráveis e da capacidade de resposta do próprio setor de saúde a tais efeitos são fundamentais para o planejamento e a aplicação de estratégias de adaptação.

Desse modo, considerando a importância dos determinantes sociais para proposição de ações intersetoriais que busquem diminuir as iniquidades em saúde, em especial para os eventos relacionados às mudanças climáticas globais, neste capítulo, é apresentada uma análise de alguns indicadores socioeconômicos, sanitários e de acesso aos serviços de saúde que foram selecionados em função da sua relação com a morbidade e mortalidade estudados neste. Este capítulo está estruturado com o objetivo de analisar e discutir: (1) a exposição ao clima futuro no Brasil; (2) a vulnerabilidade socioeconômica atual; (3) o risco climático inerente ao produto dessa exposição futura e vulnerabilidade atual; e (4) o impacto para a mortalidade geral e as doenças diarreicas associadas ao aumento de extremos de calor e de temperatura, respectivamente. Espera-se que estas avaliações da relação entre clima e saúde possam constituir um primeiro passo para estruturar discussões sobre os efeitos das mudanças do clima no âmbito da saúde no Brasil segundo as mais recentes projeções regionalizadas de aquecimento.

Essas informações também podem contribuir para o processo de adaptação, podendo servir de base para a capacitação de vários atores sociais, incluindo os profissionais de saúde, da comunicação e da gestão pública, promovendo assim a disseminação do conhecimento sobre clima e saúde e incentivando o debate sobre o direcionamento das políticas, serviços e programas de saúde no Brasil.

Este capítulo está estruturado em quatro objetivos, sendo o primeiro a municipalização dos dados climáticos sobre as projeções de aumento de temperatura média anual e de ondas de calor futuras, considerando os cenários de expo-

sição (RCP 4.5 e 8.5) a partir da regionalização pelo modelo Eta do modelo global HadGEM2-ES para o Brasil até o final do século XXI. Outro objetivo refere-se à distribuição espacial dos indicadores de vulnerabilidade sociodemográfica e socioeconômica, incluindo o acesso aos serviços de saúde para a população brasileira. O terceiro objetivo contempla a análise de risco climático considerando uma matriz de exposição climática em cada município brasileiros em diferentes cenários de aquecimento e diferentes tipos de vulnerabilidade. O quarto objetivo inclui a estimativa do impacto das ondas de calor para a mortalidade geral e o impacto do aumento da temperatura média anual na ocorrência das doenças diarreicas, entre menores de cinco anos, até o final do século XXI para o Brasil.

2 Metodologia

A metodologia deste capítulo é apresentada de forma a atender os objetivos dos componentes do estudo, a saber: (i) síntese da municipalização das projeções climáticas; (ii) mapeamento de índices de vulnerabilidade socioeconômica e de acessos aos serviços de saúde; (iii) projeções de risco climático; e (iv) a estimativa do impacto das ondas de calor para a mortalidade geral e o impacto do aumento da temperatura média anual na ocorrência das doenças diarreicas, entre menores de cinco anos, até o final do século XXI para o Brasil.

Em estudos sobre mudanças climáticas no século XXI, a modelagem do sistema climático tem assumido um papel fundamental como base de conhecimento e projeção dos potenciais cenários e situações climáticas nos quais o planeta poderá alcançar, como resultado das opções de desenvolvimento do mundo atual. Considerando que, nos próximos anos ou décadas, o mundo poderá seguir diferentes rumos em termos de opções de desenvolvimento e, conseqüentemente, de cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE), foram, por isso, considerados, para a Terceira Comunicação Nacional (TCN), dois cenários de aquecimento global do experimento CMIP5¹ (RCP 4.5 e o 8.5) reconhecidos e utilizados pelo IPCC para as

¹ *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*. Disponível em: <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>>.

estimativas de impacto e risco associados a dois tipos diferentes de desenvolvimento global no século XXI. A construção desses cenários é complexa e essencialmente desenha um quadro de perspectivas de emissões a partir de cenários de crescimento econômico, opções tecnológicas e de uso da terra.

2.1 Municipalização das projeções climáticas

A municipalização das estimativas de exposição climática no Brasil foi baseada em um método de conversão de saídas do modelo Eta-Hadgem2-ES (RCM) (CHOU *et al.*, 2014) para a grade municipal brasileira, o qual permitiu descrever previsões climáticas para cada município brasileiro. A conversão foi feita usando uma combinação de técnicas de interpolação e *buffering* usando o software no ArcGIS para dois cenários de emissão (RCP 4.5 e 8.5) e três períodos de tempo (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100) e um período presente (1961–1990) que constitui o período de referência (*baseline*) do estudo. A análise abordou o aumento da temperatura média e número de dias de ondas de calor, com temperaturas extremas (WSDI) (COSTA *et al.*, 2015).

A escala municipal permite detectar diferenças regionais para cada unidade da Federação (UF). Essa informação climática municipalizada propicia uma maior semelhança entre as saídas originais do modelo e os resultados para cada município do Brasil. Com o objetivo de estimar o nível de variação de temperatura para cada município do Brasil nos dois cenários de emissões globais, foi calculada a diferença entre a temperatura média em cada cenário nos três períodos futuros (tf) e a temperatura de referência (*baseline*) (tb).

Esses limiares globais foram usados nas análises regionais das projeções climáticas, na ausência de outros limiares regionalizados ou setorializados para o Brasil a partir dos quais se estimou alguns impactos para a saúde e transformações nas condições bioclimáticas, afetando a saúde, as populações e as atividades econômicas das diversas regiões brasileiras. O levantamento dessas variáveis e indicadores permitiu a construção de um banco de dados climáticos que apresenta uma diversidade de possibilidades para estudos futuros de clima e saúde.

2.2 Mapeamento de índices de vulnerabilidades socioeconômicas e da saúde da população brasileira

O objetivo desta análise foi evidenciar a variabilidade espacial da vulnerabilidade socioeconômica da população de acesso aos serviços de saúde ao nível municipal.

O mapeamento de vulnerabilidade da saúde foi construído a partir da composição de índice baseada em análise de componentes principais (ACP), proposto por Cutter (2003). Esse método foi aplicado a 28 indicadores socioeconômicos e 11 indicadores de acesso a serviços de saúde. Essa abordagem metodológica reduz o número de indicadores selecionados, por meio da formulação de componentes que captam as colinearidades e correlações entre as variáveis (PINHEIRO *et al.*, 2016a). A ACP garante uma construção menos subjetiva de indicadores e melhor avaliação da distribuição espacial e a contribuição de cada dimensão de vulnerabilidade considerada. Para a dimensão socioeconômica as informações utilizadas (tabela 1) foram obtidas do Censo Demográfico 2010, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e do Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil 2013 (PNUD, 2013). Para a dimensão infraestrutura e acesso a serviços de saúde (tabela 2), os dados foram provenientes do sistema de informação do Datasus-Siops (Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde/Sistema de Informações sobre Orçamentos Públicos em Saúde) e o Siab (Sistema de Informação da Atenção Básica) (<siops.datasus.gov.br>), referentes a levantamentos realizados em 2010. A escassez de dados municipais consolidados sobre a dimensão ambiental, como poluição do ar, desmatamento, áreas de risco de deslizamento, uso do solo, foi limitante inviabilizando a construção de um índice de vulnerabilidade ambiental para este estudo.

As análises estatísticas foram realizadas no *software* R (TEAM, 2010), função *prcomp* com dados normalizados. Após a execução da ACP, o critério de Kaiser (1958) foi utilizado para determinar os componentes que seriam considerados. A rotação Varimax foi utilizada buscando maximizar a carga (*loadings*) de cada indicador em apenas um componente. Uma vez determinados os pesos (*loadings*), foram calculados os scores de cada município para cada componente. A definição dos pesos dos componentes baseou-se na variância explicada por cada um

na ACP. Foram construídos índices para a dimensão socioeconômica e demográfica (IVse) e de acesso a serviços de saúde (IVss) utilizando a equação 2, em que IV é o índice de vulnerabilidade, $Var_{P_{Ci}}$ é a variância explicada por cada componente e $Score_{P_{Ci}}$ é a carga (*loadings*) de cada componente com sinal ajustado para concordar com o sinal de vulnerabilidade: quando os valores reduzidos do componente equivalassem a um aumento na vulnerabilidade foi necessário aplicar um fator de correção, multiplicando por -1. O mapeamento desses índices foi elaborado com a utilização do *software* ArcGIS®, classificando a vulnerabilidade em quatro quartis, de baixa a muito alta.

Tabela 1 – Indicadores socioeconômicos e demográficos para o Brasil

Desenvolvimento Humano	
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal	Média geométrica dos índices das dimensões Renda, Educação e Longevidade, com pesos iguais.
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – Dimensão Educação	Índice sintético da dimensão Educação. É obtido por meio da média geométrica do subíndice de frequência de crianças e jovens à escola e do subíndice de escolaridade da população adulta.
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – Dimensão Renda	Índice da dimensão Renda. É obtido a partir do indicador Renda <i>Per Capita</i> .
Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – Dimensão Longevidade	Índice da dimensão Longevidade obtido a partir do indicador Esperança de Vida ao Nascer.
Renda	
Índice de Gini	Grau de desigualdade existente na distribuição de indivíduos segundo a renda domiciliar <i>per capita</i> . Seu valor varia de zero, quando não há desigualdade, a um, quando a desigualdade é máxima.
Razão 10% mais ricos/40% mais pobres	Comparação da renda per capita média dos indivíduos pertencentes ao decil mais rico dessa distribuição com a renda <i>per capita</i> média dos indivíduos pertencentes aos dois quintos mais pobres.
Proporção de indivíduos extremamente pobres	Proporção dos indivíduos com renda domiciliar <i>per capita</i> igual ou inferior a R\$ 70,00 mensais, em reais de agosto de 2010.

(continua)

Renda	
Proporção de indivíduos vulneráveis à pobreza	Proporção dos indivíduos com renda domiciliar <i>per capita</i> igual ou inferior a R\$ 255,00 mensais, em reais de agosto de 2010.
Percentual de pessoas de 15 a 24 anos que não estudam nem trabalham e são vulneráveis à pobreza	Razão entre as pessoas de 15 a 24 anos que não estudam nem trabalham e são vulneráveis à pobreza e a população total nesta faixa etária. Define-se como vulneráveis à pobreza as pessoas que moram em domicílios com renda <i>per capita</i> inferior a 1/2 salário mínimo de agosto de 2010.
Demografia e Saúde	
Densidade populacional por km ²	Número de habitantes por km ² .
Esperança de vida ao nascer	Número médio de anos que as pessoas deverão viver a partir do nascimento se permanecerem constantes ao longo da vida o nível e o padrão de mortalidade por idade prevalentes no ano do censo.
Mortalidade infantil	Óbitos de menores de um ano de idade, por mil nascidos vivos, na população residente em determinado espaço geográfico, no ano considerado.
Mortalidade até os cinco anos de idade	Óbitos de menores de cinco anos de idade, por mil nascidos vivos, na população residente em determinado espaço geográfico, no ano considerado.
Educação	
Frequência líquida ao ensino fundamental	Razão entre o número de pessoas na faixa etária de seis a 14 anos frequentando o ensino fundamental regular seriado e a população total dessa mesma faixa etária multiplicado por 100.
Frequência líquida ao ensino médio	Razão entre o número de pessoas na faixa etária de 15 a 17 anos frequentando o ensino médio regular seriado e a população total dessa mesma faixa etária multiplicado por 100.
Frequência líquida ao ensino superior	Razão entre o número de pessoas na faixa etária de 18 a 24 anos frequentando o ensino superior (graduação, especialização, mestrado ou doutorado) e a população total dessa mesma faixa etária multiplicado por 100.
Condições de Habitação	
Percentual da população que vive em domicílios com densidade superior a duas pessoas por dormitório	Razão entre a população que vive em domicílios particulares permanentes com densidade superior a dois e a população total residente em domicílios particulares permanentes multiplicado por 100. A densidade do domicílio é dada pela razão entre o total de moradores do domicílio e o número total de cômodos usados como dormitório.

(continua)

Condições de Habitação	
Domicílios com esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial e fossa séptica	Percentual de domicílios particulares permanentes com esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial e fossa séptica.
Domicílios com abastecimento de água via rede geral	Percentual de domicílios particulares com abastecimento de água via rede geral.
Domicílios particulares com esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial	Percentual de domicílios particulares com esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial.
Características do entorno do domicílio	
Domicílios particulares em área urbana com ordenamento e sem iluminação pública no entorno	Percentual de domicílios particulares em área urbana com ordenamento e sem iluminação pública no entorno.
Domicílios particulares em área urbana com ordenamento e sem iluminação pública no entorno	Percentual de domicílios particulares em área urbana com ordenamento e sem iluminação pública no entorno.
Domicílios particulares em área urbana com ordenamento e com esgoto a céu aberto	Percentual de domicílios particulares em área urbana com ordenamento e com esgoto a céu aberto.
Domicílios particulares em área urbana com ordenamento e com lixo acumulado no entorno	Percentual de domicílios particulares em área urbana com ordenamento e com lixo acumulado no entorno.

A equação 1, a seguir, define o índice composto de vulnerabilidade aplicado nesta análise.

$$IV = \sum_i Var_{PCi} \times Score_{PCi} \quad IV = \sum_i Var_{PCi} \times Score_{PCi} \quad (1),$$

em que IV é o índice de vulnerabilidade, Var_{PCi} é a variância explicada por cada componente e $Score_{PCi}$ é a carga (*loadings*) de cada componente com sinal ajustado para concordar com o sinal de vulnerabilidade (PINHEIRO *et al.*, 2016a).

Utilizando a metodologia descrita anteriormente, três componentes principais foram selecionados para representar a vulnerabilidade associada ao acesso aos serviços de saúde a partir de 11 variáveis originais.

Tabela 2 – Indicadores de financiamento dos serviços de saúde segundo regiões brasileiras (Brasil no ano de 2010)

Indicadores de Financiamento da Saúde	Regiões Brasileiras					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Nº de leitos SUS	26.453	106.329	27.889	141.574	57.723	359.968
Nº de leitos não SUS	7.388	24.158	12.316	80.140	23.842	147.844
Nº de estabelecimentos de atenção básica	5.909	27.359	11.211	47.874	23.352	115.705
Nº de estabelecimentos de média complexidade	6682	32547	14.228	78.828	34.828	167.113
Nº de estabelecimentos de alta complexidade	464	1.694	877	4.563	1.807	9.405
Despesa total média (USD) com saúde/habitante	99.01	98.69	112.86	148.41	135.97	118.98
Valor médio (USD) gasto com hospitalização	179.71	228.47	247.39	293.94	322.48	254.41

* Dólar americano

Fonte: Siops/MS (2010)

2.3 Impactos das mudanças climáticas na saúde humana

Eventos climáticos extremos são de particular relevância para a sociedade e os ecossistemas devido à gravidade dos impactos (IPCC, 2012). A literatura tem mostrado uma considerável demanda na última década por projeções detalhadas de eventos climáticos extremos. Essas projeções são importantes para avaliar a magnitude dos impactos da temperatura e das ondas de calor na saúde, assim como para analisar a dinâmica de efeitos e interações, identificando os grupos mais vulneráveis e as áreas prioritárias para a implementação de políticas públicas de adaptação (REID *et al.*, 2009).

2.3.1 Risco climático associado a ondas de calor

O risco ao qual uma população está exposta não depende apenas do nível de exposição. Os indicadores de risco integram medidas de vulnerabilidade e exposição e são uma ferramenta eficiente na comunicação do risco de maneira simples e eficiente, assim como são ferramentas poderosas no processo de tomada de decisão e gestão de risco.

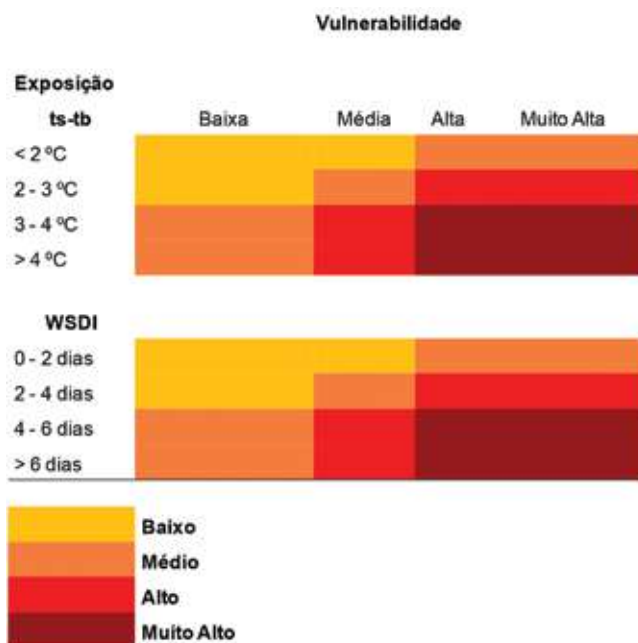
Índice de risco de stress térmico utilizando a metodologia de Aubrecht e Özceylan (2013) é definido como o produto entre um indicador de vulnerabilidade e um indicador de exposição ao aumento de temperatura e(ou) às ondas de calor. No presente estudo, a medida de exposição climática a ondas de calor foi pautada no *Warm Spell Duration Index* (WSDI) (MEEHL; TEBALDI, 2004; ALEXANDER; ARBLATER, 2009; Costa *et al.*, 2015), utilizando a diferença entre o número médio de ondas de calor para as janelas de tempo futuro e a temperatura do período *baseline* para o século XX (*ts-tb*), ou seja, para o período de 1961 a 1990, considerando as saídas do modelo ETA-HadGEM2-ES para os dois cenários (RCP 4.5 e 8.5).

Com base nessa metodologia, foi proposto um índice de risco climático associado a ondas de calor, em nível municipal para todo o território brasileiro, determinado pela sobreposição de níveis de vulnerabilidade socioeconômica e de acesso a serviços de saúde elaborados por análise de componentes principais (PINHEIRO *et al.*, 2016a), ao aumento na temperatura média, bem como a aumento no número anual médio de dias em ondas de calor por município, conforme descrito em Costa *et al.* (2015).

Para quatro categorias de risco, foi estabelecida uma matriz de sobreposição das condições de exposição e vulnerabilidade, como ilustra a figura 1.

Após o mapeamento do risco climático, foram selecionados os municípios com mais de 250 mil habitantes classificados como alto ou muito alto risco de ondas de calor (aquecimento acima de três graus). Esta abordagem busca agregar o fator população para orientar o delineamento de políticas de adaptação climática e redução de riscos em áreas vulneráveis e que exponha um maior número de pessoas às mudanças do clima mais severas.

Figura 1 – Esquema de construção do índice de risco climático



2.3.2 Ondas de calor e mortalidade geral

No presente estudo, o excesso de mortes por todas as causas, associadas às projeções no futuro de aumento da intensidade e número de ondas de calor, foi estimado a partir de medidas de risco construídas com base na metodologia abordada por Aubrecht *et al.* (2013) com sobreposição de áreas vulneráveis e com alta exposição aos fatores de risco criando o índice de risco climático e avaliando o nível de exposição e de impacto nas diferentes regiões do Brasil.

A equação 2 foi utilizada para estimar o excedente no número de mortes anuais por causas não acidentais no Brasil adaptado de Peng *et al.* (2011). O risco relativo da literatura foi adotado na falta de um estudo epidemiológico sistematizado para o Brasil.

A equação 2 é para o cálculo do número excedente de mortes associado à ocorrência do número de dias com onda de calor. *EM* é excesso de mortes

anual em cada janela de tempo, $WSDI_{dif}$ é a diferença de número médio de dias em onda de calor projetado em relação ao período *baseline* (1961–1990). Para cada dia em onda de calor a mais, haverá um aumento de 4,24% na mortalidade diária. A taxa de mortalidade foi considerada taxa média para cada período de 30 anos.

$$EM = 4,24\% \times WSDI - dif \times taxa\ de\ mortalidade \quad (2)$$
$$EM = 4,24\% \times WSDI - dif \times taxa\ de\ mortalidade$$

Para a primeira janela, calculou-se o excesso de mortes baseado na taxa de mortalidade representativa da população de 2010 para todos os municípios, posteriormente agregado por estado e região. Para a segunda e terceira janelas, as taxas de mortalidade foram corrigidas com base nas tendências de projeções populacionais disponíveis apenas para cada estado (IBGE, 2013). Como essa projeção reflete principalmente a tendência das capitais das unidades federativas, optou-se por avaliar o impacto nas duas últimas janelas considerando apenas as capitais e suas taxas de mortalidade, devidamente corrigidas de acordo com a projeção estadual. Municípios em que foi detectada a diminuição de dias em ondas de calor apresentaram uma redução no número de mortes associadas a estes dias atípicos.

2.3.3 Impacto das projeções de temperatura na diarreia infantil no Brasil

Outro aspecto da saúde considerado no presente estudo foi o impacto do aumento da temperatura em relação à diarreia infantil, em menores de cinco anos, um dos grupos mais vulneráveis ao aumento de temperatura das mudanças climáticas.

As doenças diarreicas são principalmente atribuíveis a fatores ambientais, especificamente devido à contaminação da água e dos alimentos (WHO, 2008), e são afetadas por mudanças de temperatura e eventos de precipitação (CAMPBELL-LENDRUMAND; WOODRUFF, 2007), que podem causar a contaminação de mananciais ou a interrupção do abastecimento. Este trabalho avalia as estimativas da carga de doença atribuível à diarreia infantil com projeções climáticas baseadas nos cenários de exposição

(RCP 4.5 e 8.5) com aumento de temperatura para os períodos projetados e um período *baseline* (1961–1990) no Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A mesma metodologia proposta para estimar as projeções de temperatura média anual para cada município no Brasil foi utilizada para a estimativa da fração atribuível à diarreia infantil (COSTA *et al.*, 2015).

A variável climática considerada neste estudo para as três janelas de tempo é apresentada na equação 3, na qual δT é calculada com base na diferença de temperatura entre a temperatura média anual futura e a temperatura no tempo presente: $\delta T = T_f - t_b$ (COSTA *et al.*, 2015). A dinâmica demográfica também foi projetada neste estudo. Para isso, considerou-se para o primeiro período de tempo de 2011–2040 a população demográfica estadual que, neste caso, foi obtida do IBGE, aplicando-se uma taxa de progressão geométrica da respectiva UF à variação da respectiva capital estadual. Os dados são apresentados para as cinco grandes regiões brasileiras e para o Brasil.

Devido à ausência de estudos epidemiológicos no contexto brasileiro que quantificassem o risco relativo (RR) do impacto de aumento de temperatura na diarreia infantil, utilizou-se o valor médio de 5%, para cada aumento de 1°C de temperatura para a ocorrência de casos de diarreia no Brasil. Essa estimativa foi igualmente empregada no cálculo da carga associada à mudança climática e à diarreia nos países em desenvolvimento e na Austrália (KOLSTAD; JOHANSSON, 2011).

O risco relativo resultante do impacto de aumento de temperatura na diarreia infantil (5%) foi multiplicado pelas projeções das mudanças na temperatura futura ($\delta T = T_f - t_b$ in COSTA *et al.*, 2015) para os cenários selecionados e os períodos de tempo definidos até 2100, obtendo, com isso, os riscos estimados para a distribuição da diarreia da população infantil (< de cinco anos). O somatório da população menor de cinco anos sob risco, calculada em cada UF ou capital, dividida pela população total menor de cinco anos da região correspondente, gerou a estimativa do risco das projeções de aumento de temperatura na região.

$$EM = 5\% \times \delta T = T_f - t_b \times \text{taxa de hospitalização corrigida para as projeções temporais} \quad (3)$$

3 Resultados dos impactos das projeções climáticas para a saúde do Brasil

O Brasil carece de estudos de impacto das mudanças climáticas à saúde atuais e com base em projeções futuras de aumento de temperatura, incluindo as ondas de calor. A municipalização das projeções climáticas desenvolvidas para o relatório da TCN sobre as mudanças climáticas permitiu a estruturação de um rico banco de dados que facilitará estudos futuros sobre as projeções climáticas e seus impactos para a saúde humana, considerando as várias regiões do país.

A preocupação com os efeitos do clima na saúde humana não é recente. O primeiro informe científico sobre o tema foi publicado pela Organização Mundial de Saúde. Desde então diversas evidências e estudos alertam sobre os impactos diretos e indiretos à saúde. Entretanto, na maioria das vezes, os impactos são indiretos, mediados por mudanças ambientais globais, com alterações dos ecossistemas, da biodiversidade e dos ciclos biogeoquímicos (BARCELLOS *et. al.*, 2008).

A multicausalidade e a complexidade dos efeitos climáticos configuram-se em um grande e importante desafio para o setor saúde. As mudanças ambientais ameaçam as conquistas e os esforços empreendidos para a redução das doenças transmissíveis e não transmissíveis no Brasil. É de extrema importância considerar a infraestrutura de saúde, os determinantes sociais e a descrição da morbimortalidade das principais doenças sensíveis ao clima para subsidiar informações para o estabelecimento de estratégias de controle e adaptação de enfrentamento aos impactos produzidos pelas alterações climáticas à saúde da população brasileira.

3.1 Municipalização das projeções climáticas

Estimar o impacto das projeções de aumento de temperatura para o século XXI na saúde no Brasil é um desafio, considerando sua grande heterogeneidade, complexidade, diversidade ecológica e climática e desigualdades sociais e econômicas.

Os resultados das análises realizadas para as projeções climáticas para os cenários de emissões (RCP 4.5, cenário realista, e 8.5, cenário otimista) e seus efeitos para os períodos de 2011 a 2100 para os municípios brasileiros mostram um aumento de temperatura progressivo para o século XXI.

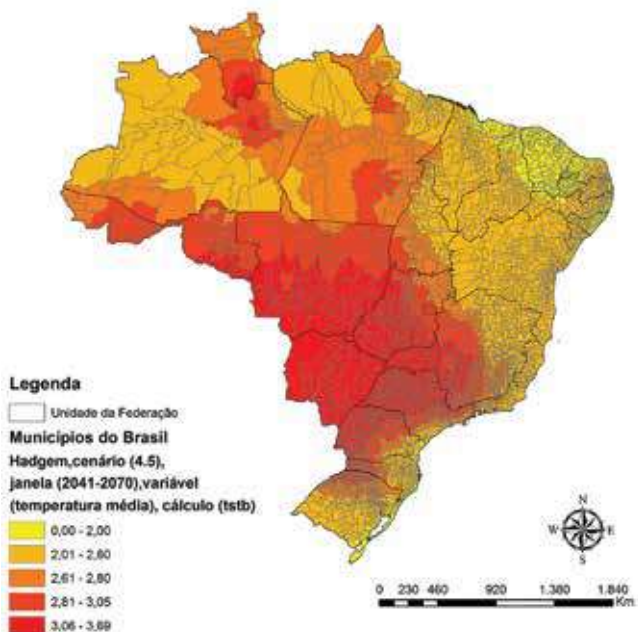
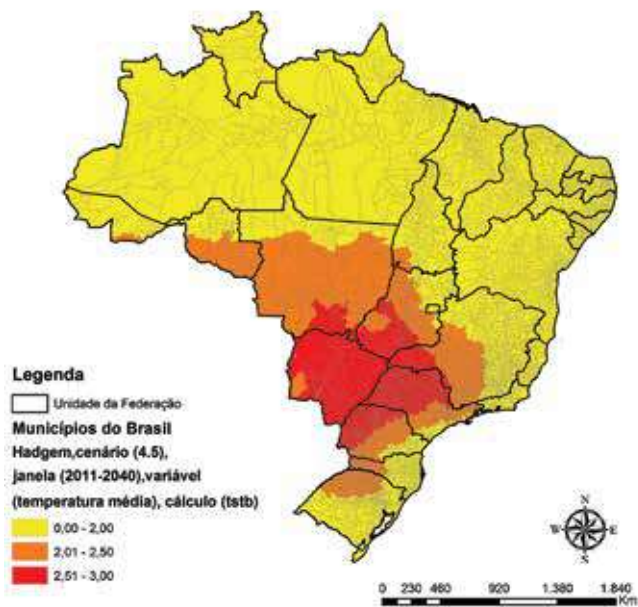
3.1.1 Resultados descritivos da síntese dos cenários climáticos

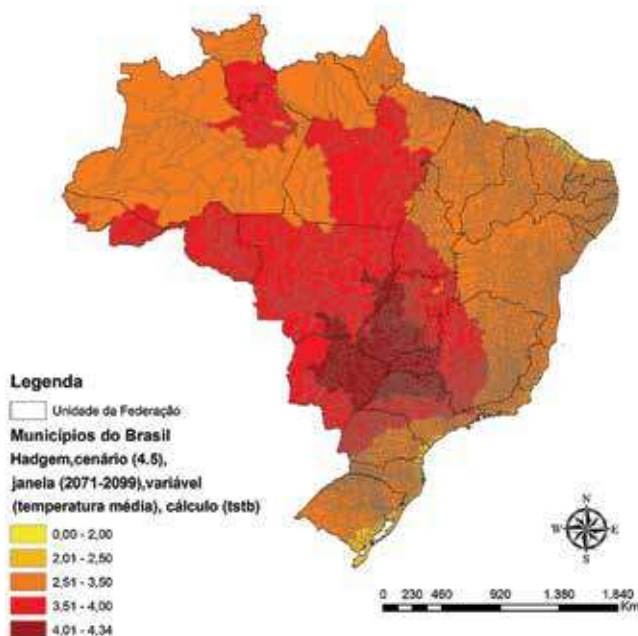
O cenário RCP 4.5 apresenta a tendência de aquecimento no contexto de um desenvolvimento global sustentável pautado no controle das emissões de GEE e com estabilização do aumento de temperatura média global no final do século pouco acima dos 2°C.

A análise da situação climática para as regiões brasileiras para o mesmo cenário verifica um aumento significativo de temperatura média na maioria das regiões do Brasil, sobretudo, as regiões Centro-Oeste, Sudeste, Sul e Norte. Esse aumento de temperatura atinge um valor médio no país de 3,18°C para o século XXI chegando a um valor máximo de 4,3°C no interior de São Paulo no final do século (figura 2).

O Centro-Oeste é a região com projeções de maiores aumentos de temperatura, seja em magnitude, seja em extensão. A região Nordeste destaca-se ao longo do século XXI por ser a que menos deverá aquecer, com registro de menor variabilidade de temperatura. As projeções apontam, para as regiões Sul e Sudeste, um padrão de aquecimento e de variabilidade semelhante entre si. Ambas as regiões têm uma projeção de forte gradiente térmico de aquecimento em que os aumentos de temperatura são mais elevados no interior das regiões e menor nos municípios litorâneos.

Figura 2 – Aumento de temperatura nas regiões ao longo do século XX (RCP 4.5)





A região Norte tem um perfil de aumento de temperatura significativo, apesar de, no início do século, praticamente estar abaixo do limiar de 2°C na sua totalidade. Na metade do século, todavia, toda a região já ultrapassará esse limiar. As projeções de aquecimento permitem observar três eixos de calor visíveis no mapa (figura 2) partindo do sul da região Centro-Oeste em direção a diferentes eixos ao longo do arco do desmatamento² com os seguintes perfis: um a leste ao longo da sub-bacia dos rios Xingu partindo de Mato Grosso, ao norte do Amazonas até a divisa com a Guiana Francesa; outro que ramifica a partir do sul do Pará em direção a Manaus/AM formando uma bolha de aquecimento na sub-bacia do rio Negro, partindo desde as junções dos rios Branco e Juaperi, passando por Manaus até cerca de 130 km a jusante desta cidade; e, por fim, outro eixo a oeste seguindo as rodovias

² O arco do desmatamento é a região onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta e também onde se encontram os maiores índices de desmatamento da Amazônia. São 500 mil km² de terras que vão do leste e sul do Pará em direção oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia – IPAM. Disponível em: <<http://www.ipam.org.br/saiba-mais/glossariotermino/Arco-do-desmatamento/92>>).

BR-364 e BR-317, através dos estados de Rondônia e Acre. O estado de Rondônia apresenta aquecimento mais elevado e extensivo, enquanto que a região em torno de Manaus deverá registrar uma bolha de aquecimento. As projeções para Manaus, a capital do estado do Amazonas, poderão registrar um aquecimento de 3,07°C.

As regiões Sudeste e Sul também ultrapassarão o limiar de risco de 4°C, principalmente, as regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, onde os aumentos térmicos serão amplificados pelo efeito de ilha de calor urbano. Esse cenário para o Brasil já dá indicações da extensão e da magnitude dos impactos para a saúde pública.

3.1.1.1 Cenário futuro RCP 8.5 – Cenário pessimista

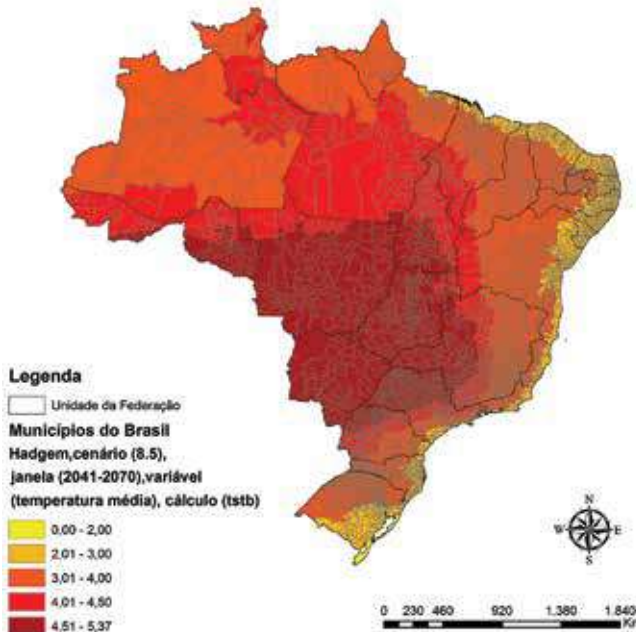
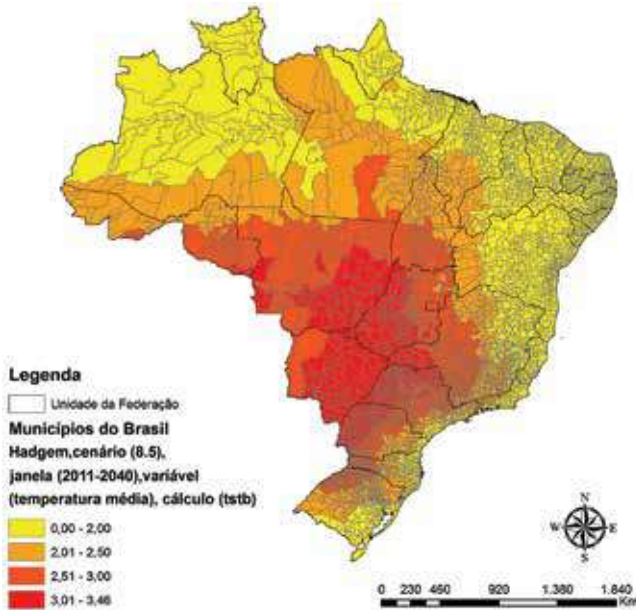
O cenário RCP 8.5 segue uma trajetória global de desenvolvimento *business as usual*, no qual a principal fonte de energia provém do uso de combustíveis fósseis. Para esse cenário, no final do século XXI, as concentrações de CO² na atmosfera serão três a quatro vezes maiores comparadas ao período da Revolução Industrial (SYMON *et al.*, 2013), resultando em um aquecimento global médio estimado entre 2,6–4,8°C (IPCC WG1, 2013).

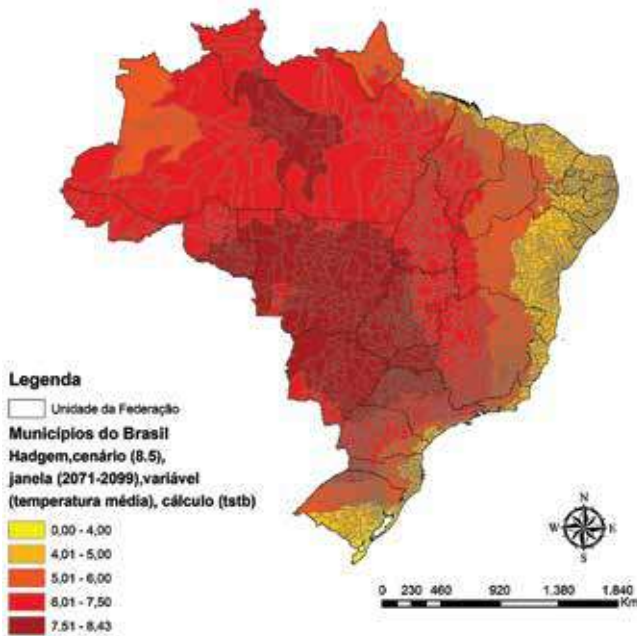
Para esse cenário, o modelo Eta/HadGEM2-ES projeta para o Brasil um aquecimento médio de 4,8°C (superior à média global) variando entre o mínimo de 3,15°C (no município de São José do Norte/RS) no início do século e 8,4°C (Parintins/AM) no final do período (figura 3).

Considerando as projeções do cenário 8,5, no final do século XXI, todo o país ultrapassará o limiar de risco de 4°C, à exceção de 105 municípios na sua maioria na costa Sul do país e alguns na costa norte e nordeste da região Nordeste do país.

A região Centro-Oeste praticamente na sua totalidade ultrapassará a temperatura de 7,5°C de aquecimento estendendo para a região Norte, que passará a ser a segunda mais quente, registrando as temperaturas máximas no país, com a maioria dos seus municípios acima dos 6°C (figura 3). As projeções apontam uma bolha de aquecimento entre as cidades amazônicas de Manaus/AM e Santarém/PA estendendo também para o Norte da região no estado de Roraima/RR com incrementos de temperatura mais significativos do país, chegando até 8,4°C (Parintins/AM) (figura 3).

Figura 3 – Aumento de temperatura ao longo do século XXI (RCP 8.5)





3.2 Mapeamento de índices de vulnerabilidades socioeconômica e da saúde da população brasileira

3.2.1 Indicadores socioeconômicos e de acesso a serviços de saúde

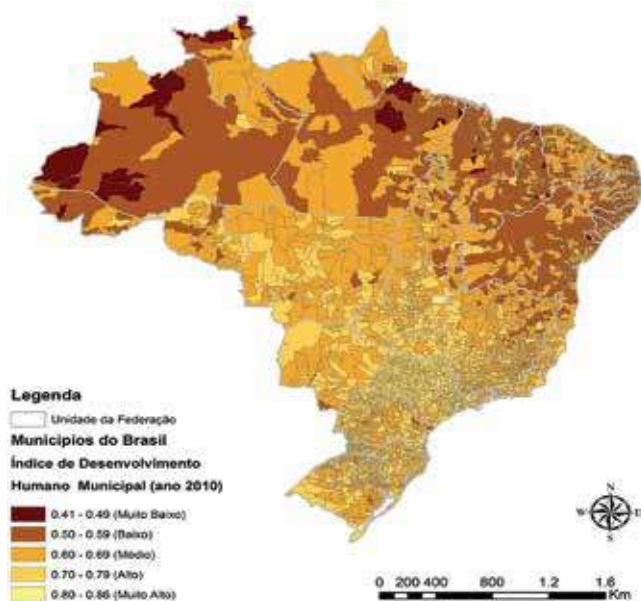
A análise de vulnerabilidade às mudanças climáticas, em geral, baseia-se na construção e mapeamento de índices de vulnerabilidade que evidenciem diferenças espaciais nas diversas dimensões (CUTTER *et al.*, 2003; CONFALONIERI *et al.*, 2009; AUBRECHT *et al.*, 2013).

A análise geral dos indicadores evidenciou uma condição de desenvolvimento humano precária nos municípios das regiões Norte e Nordeste. Os baixos valores dos indicadores de educação, renda e de maior percentual de indivíduos classificáveis como extremamente pobres e vulneráveis à pobreza, principalmente nessas regiões, indica menor capacidade de enfrentamento de problemas de saúde frente ao desafio da mudança do clima. As maiores taxas de mortalidade infantil refletiram a carência nas condições gerais de infraestrutura de saneamento básico e acesso e qualidade na atenção

da saúde materna e infantil. As regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste apresentaram a maior concentração de municípios com melhores condições socioeconômicas, indicando uma maior resiliência a problemas de saúde associados com as mudanças climáticas.

A figura 4 apresenta, para 2010, a distribuição do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) segundo os municípios brasileiros com índices classificáveis como muito baixo (0 a 0,49) e baixo (0,50 a 0,59) nas regiões Norte e Nordeste. Nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste houve o predomínio de municípios com IDH médio (0,60 a 0,69) e alto (0,70 a 0,79).

Figura 4 – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, ano 2010 (Pnud, 2013)



O mapeamento de vulnerabilidade aqui apresentado foi construído a partir da composição de índice baseada em análise de componentes principais (ACP), conforme proposto por Cutter (2003). A ACP permite uma melhor distribuição espacial e contribuição de cada indicador na dimensão de vulnerabilidade considerada.

Os resultados da análise dos indicadores de acesso a serviços de saúde evidenciam uma preocupante situação sanitária em todas as UF, em especial para aquelas situadas nas regiões Norte e Nordeste. A análise dos dados do Siops para o ano de 2010 (tabela 3) mostra que a despesa total média por habitante aponta disparidades significativas entre as regiões do país. Os recursos financeiros destinados ao Sudeste e ao Sul são 34% maiores quando comparados aos das regiões Norte e Nordeste. Essas diferenças são ainda mais evidentes ao se observar o valor médio em reais gastos com hospitalização. Para a região Sul, observam-se valores acima de mil reais, enquanto que, para a região Norte, este valor cai para a metade. Em relação à oferta de leitos, SUS e não SUS, destacam-se as regiões Sudeste e Nordeste, com número total de leitos. O mesmo pode ser observado para o número de estabelecimentos de saúde segundo os níveis de atenção básica, média e de alta complexidade. Apesar de a região Nordeste ter se destacado em relação à oferta, a demanda da população pelos serviços de saúde na região ainda é superior ao que a infraestrutura de saúde possibilita. Esses indicadores apontam a vulnerabilidade dos serviços de saúde em relação à atenção básica, média e de alta complexidade no enfrentamento das alterações climáticas nas regiões brasileiras.

3.2.2 Análise de componentes principais

De acordo com a análise de componentes principais, os cinco componentes extraídos de 28 indicadores explicaram 71% da real variabilidade espacial. A tabela 3 apresenta a composição desses componentes, com a carga de cada indicador. O primeiro componente principal (CP1) apresentou uma carga composta de muitas variáveis, evidenciando uma alta correlação entre elas. Esse componente descreve essencialmente os indicadores de renda e saúde da população.

O segundo componente principal (CP2) descreveu componentes de urbanização, infraestrutura e saneamento. As variáveis de infraestrutura também apresentaram cargas expressivas no terceiro componente principal (CP3), juntamente com variáveis de migração. Esse componente está associado à falta de saneamento e infraestrutura urbana para populações em geral, incluindo migrantes que acabam por se estabelecer em áreas sem cobertura para estes serviços. A escolaridade esteve mais associada aos componentes 4 e 5, contudo, no quarto componente, este indicador relaciona-se com outros como de desigualdade e densidade populacional.

Tabela 3 – Carga (*loadings*) dos indicadores de vulnerabilidade socioeconômica nos componentes principais selecionados

Indicador	Componentes principais (CP)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Esperança de vida ao nascer	0.30				
Mortalidade infantil	-0.33				
Taxa de frequência líquida ao fundamental					-0.71
Taxa de frequência líquida ao médio					-0.34
Taxa de frequência líquida ao superior				-0.32	
Índice Gini	-0.22			-0.37	0.23
% extremamente pobres	-0.28				
% pobres	-0.29				
% vulneráveis à pobreza	-0.28				
% população em domicílios com banheiro e água encanada	0.27				
% população rural		-0.52			
% população urbana		0.52			
IDHM – Educação				-0.21	-0.23
IDHM – Renda	0.25				
% pessoas maiores de cinco anos que não residiam nos municípios em 31/7/2005	0.21		0.46	0.25	
% pessoas maiores de 15 anos sem instrução e fundamental incompleto				0.30	
% pessoas maiores de 15 anos ou mais de idade e fundamental completo e médio incompleto			0.34		
% pessoas maiores de 15 anos ou mais de idade superior completo				-0.41	
% domicílios com microcomputador com acesso a internet				-0.29	
% domicílios com automóvel de uso particular	0.29				
% domicílios com motocicleta de uso particular		-0.34	0.24		-0.32
% domicílios com esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial e fossa séptica		0.24	-0.23		
% domicílios em área urbana com ordenamento e sem iluminação pública no entrono		0.24	-0.36		
% domicílios em área urbana com ordenamento e com esgoto a céu aberto	-0.30				

(continua)

Indicador	Componentes principais (CP)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
% domicílios em área urbana com ordenamento e com lixo acumulado no entorno			0.25		
Densidade populacional por km ²				-0.35	
% domicílios em área urbana com ordenamento e com pavimentação			-0.52		
Variância explicada	49%	8%	6%	4%	4%

A carga de muitos indicadores é alta no primeiro componente (CP1) (tabela 4), refletindo alta correlação entre as variáveis. Em geral, as piores condições dos diferentes indicadores de serviço de saúde ocorrem nas mesmas áreas, levando a uma alta correlação entre eles. Os outros dois componentes apresentam uma variância explicada semelhante. O segundo componente (CP2) descreve a distribuição das taxas de leitos, enquanto o terceiro componente (CP3) está associado a indicadores de gastos em saúde. No caso dos dados de acesso a serviços de saúde, três componentes principais foram selecionados para representar a vulnerabilidade associada ao acesso aos serviços de saúde a partir de 11 variáveis originais. Esse modelo explicou 81% da variância da base de dados original.

A escolaridade esteve mais associada aos componentes CP4 e CP5, contudo, no quarto componente esse indicador relaciona-se com outros indicadores como desigualdade e densidade populacional. Esses resultados, bem como o peso de cada componente aplicado para a construção do índice, estão apresentados nas tabelas 3 e 4 (PINHEIRO *et al.*, 2016a).

Tabela 4 – Carga (*loadings*) dos indicadores de vulnerabilidade – serviços de saúde nos componentes principais selecionados*

Indicador	Componentes principais (CP)		
	CP1	CP2	CP3
Leitos SUS	0.38		
Leitos não SUS	0.38		
Leitos SUS por 1.000 hab.		-0.71	
Leitos não SUS por 1.000 hab.		-0.70	
Estabelecimentos de saúde – Atenção básica	0.33		
Estabelecimentos de saúde – Média complexidade	0.38		
Estabelecimentos de saúde – Alta complexidade	0.38		
Despesa total com saúde por hab.			-0.68
Valor (R\$) da Autorização de Internação Hospitalar (AIH)	0.39		
Número de AIHs pagas	0.39		
Valor médio (R\$) gasto com hospitalização			-0.71
Variância explicada	58%	12%	11%

* *Loadings* entre -0.20 e 0.20 foram suprimidos da tabela.

3.2.3 Mapas de vulnerabilidade

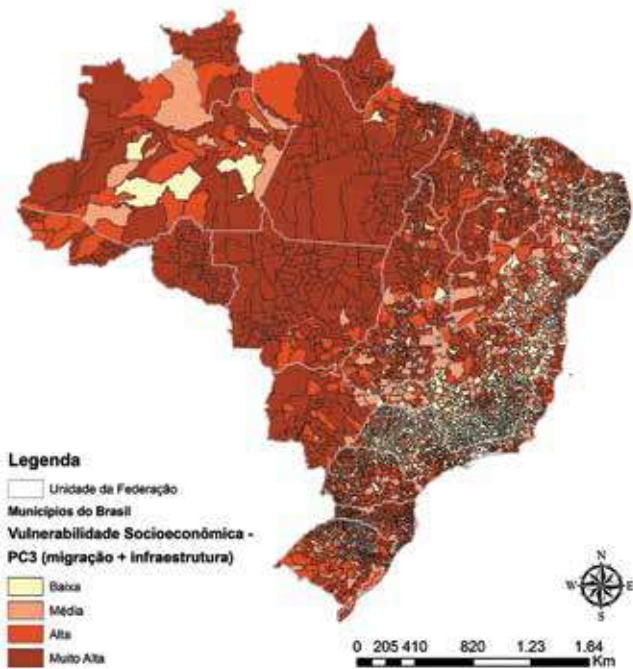
Nas tabelas 3 e 4, mencionadas anteriormente estão explicitados as variâncias de cada componente principal. Essa variância foi utilizada como peso de cada componente no cálculo do índice de vulnerabilidade IV. A análise da distribuição espacial tanto dos índices compostos quanto dos seus componentes, observando os padrões de diferentes fatores de vulnerabilidade, garante uma melhor descrição desse complexo cenário e auxilia na definição de mitigação e adaptação.

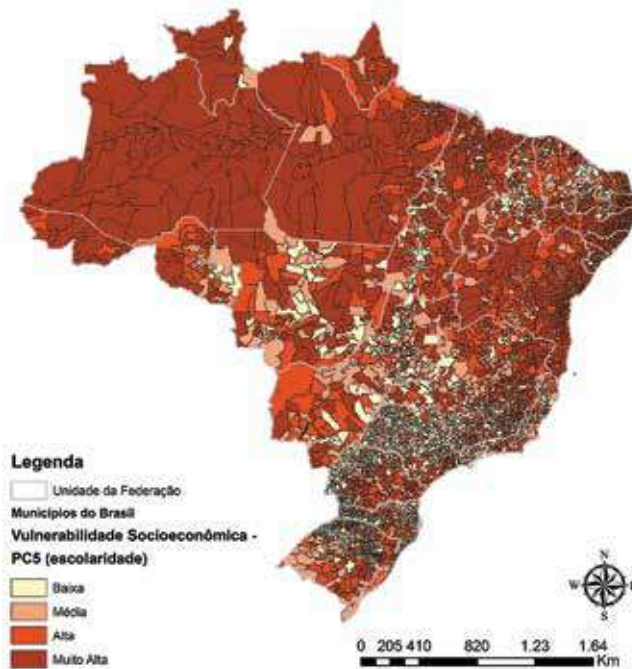
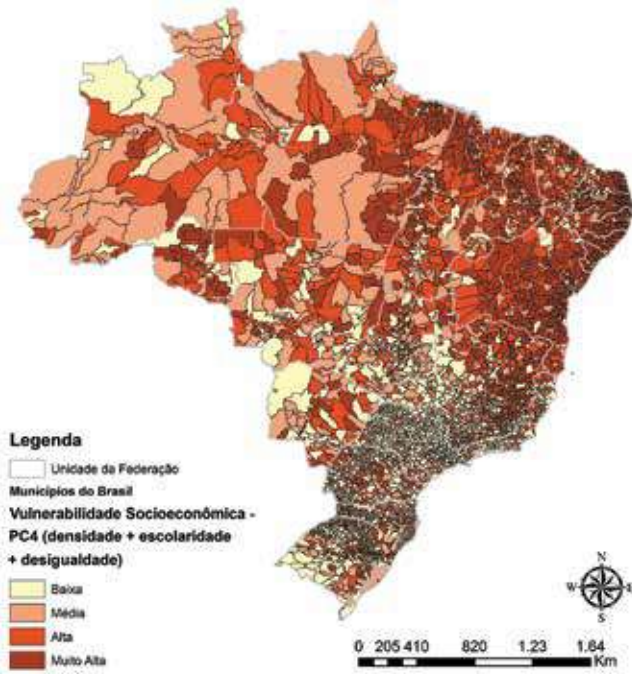
De acordo com a análise dos componentes principais dos indicadores socioeconômicos, são identificadas áreas de maior vulnerabilidade nas regiões Norte e Nordeste do Brasil (figura 5). Os mapas de vulnerabilidade correspondem aos resultados das análises de componentes principais (ACP) e índices de vulnerabilidade socioeconômica (figura 5).

Na região Sudeste, o nordeste do estado de Minas Gerais destacou-se pela concentração de muitos municípios considerados mais vulneráveis principalmente nos componentes de maior peso (PC1 e PC2), que representam renda, infraestrutura, saúde, saneamento e urbanização. O estado de São Paulo apresenta baixa vulnerabilidade no geral para todos os componentes principais.

Figura 5 – Mapeamento do índice de vulnerabilidade socioeconômica nos municípios brasileiros – IVse







O mapeamento referente ao acesso a serviços de saúde demonstra uma distribuição mais heterogênea, com maior variabilidade da vulnerabilidade entre municípios, o que caracteriza a existência de microrregiões homogêneas dentro da mesma unidade da Federação. As regiões Sul e Sudeste apresentam as melhores condições de infraestrutura em saúde. É possível identificar agrupamento de municípios vizinhos (*clusters*), que estão sob as mesmas condições de oferta de leitos, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país.

O oeste da região Norte e o interior do Nordeste apresentam condições socioeconômicas e de infraestrutura de serviços de saúde precárias refletidas no mapeamento de vulnerabilidade. Os índices compostos *IVse* e *IVss* apresentados espacialmente na figura 6 resumam as informações dos indicadores de vulnerabilidade da infraestrutura dos serviços de saúde em que a população brasileira é dependente. A carga de muitos indicadores é alta no primeiro componente (tabela 4), refletindo alta correlação entre as variáveis. Em geral, as piores condições dos diferentes indicadores de serviço de saúde ocorrem nas mesmas áreas. Os outros dois componentes apresentam variância explicada semelhante. O CP2 descreve a distribuição das taxas de leitos, enquanto o CP3 está associado os indicadores de gastos em saúde.

Figura 6 – Distribuição espacial da vulnerabilidade de serviços de saúde





3.3 Impactos das mudanças climáticas na saúde humana

Com as alterações climáticas, é esperado que se tornem mais frequentes os eventos extremos com consequências diretas e indiretas para a saúde humana. Com base nas projeções climáticas até 2050, a mortalidade geral devido ao aumento de temperatura deverá ser expressiva e associada a um cenário de baixo crescimento econômico, principalmente nos países com baixa renda *per capita*, onde a vulnerabilidade social e ambiental tende a ser mais crítica. A principal limitação para avaliar impactos das mudanças climáticas no futuro é a incapacidade dos modelos epidemiológicos atuais integrarem as principais vias de potencial impacto na saúde. Os dados de séries temporais disponíveis ainda não permitem quantificar, mesmo com simulações as várias relações causais envolvidas nos impactos das mudanças climáticas. Atualmente, somente poucas vias causais podem ser modeladas usando os métodos disponíveis para a previsão dos impactos globais da mudança climática sobre a saúde.

3.3.1 Mapeamento do risco climático associado a ondas de calor

Os cenários climáticos retratam as exposições projetadas para temperatura média e número de dias em ondas de calor e sua distribuição espacial. As medidas de risco contribuem para as evidências de áreas críticas e, consequentemente, para o desenvolvimento de novos estudos, implementação e investimentos em medidas de adaptação.

No presente estudo, foi consolidado um índice de risco climático para a saúde da população brasileira associado ao aumento da temperatura média e seu mapeamento para todos os municípios brasileiros, considerando cenários climáticos até 2100, integrando a vulnerabilidade e a exposição. Além do mapeamento do risco, o excesso de mortes associadas a ondas de calor no futuro foi estimado, permitindo uma avaliação do grau de exposição da população brasileira às ondas de calor e a seu impacto na saúde.

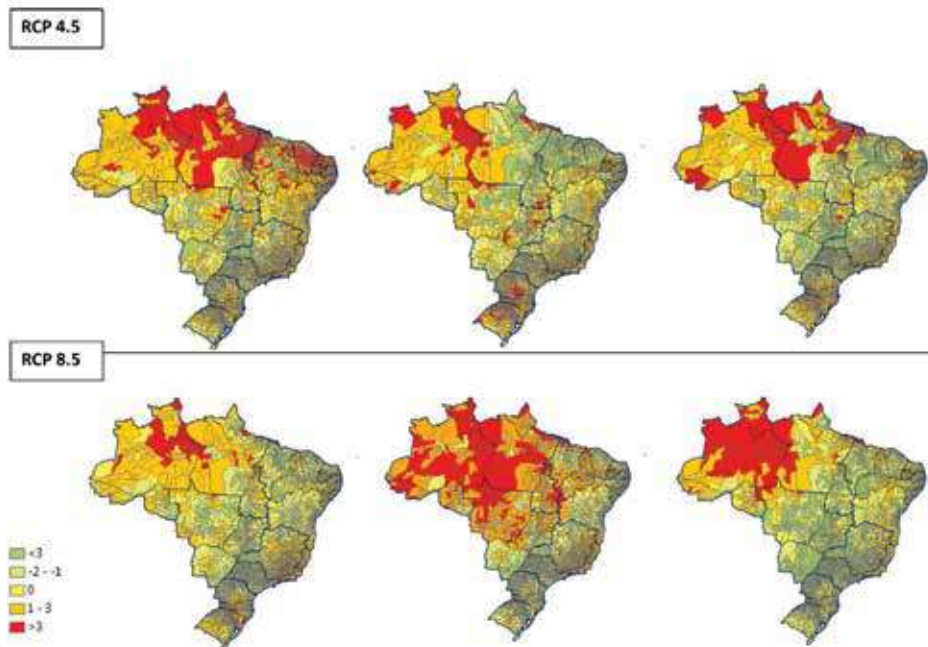
Os mapas das figuras 7 (*a*, *b* e *c*) mostram os resultados municipalizados do cálculo da diferença em relação ao presente no número médio de dias de onda de calor (WSDI) para os dois cenários (RCP 4.5, cenário realista, e 8.5, cenário otimista) e três janelas de tempo consideradas.

Os resultados apontam para um aumento progressivo e constante nos dois cenários, em relação ao número de dias de ondas de calor na região Norte, com destaque para a Amazônia Ocidental. Tanto no cenário RCP 4.5 como no RCP 8.5, é possível destacar a formação ao longo do século XXI de um eixo de maior aumento do índice de WSDI ao longo da divisa entre os estados do Amazonas e do Pará, sendo mais extenso na última janela de tempo (2071–2100).

Nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste tende a haver um decréscimo no número de dias de onda de calor, apesar do aumento das temperaturas médias ser exponencial nestas regiões. Esse aparente paradoxo requer uma análise climática e de uso da terra aprofundada.

O mosaico da figura 8 ilustra o mapeamento do risco climático associado a aumentos de temperatura média considerando a vulnerabilidade socioeconômica. As diferenças evidenciadas entre períodos de tempo e cenários apresentam apenas a dinâmica do fator de exposição, considerando que a vulnerabilidade da população não se altera no tempo.

Figura 7 – Mapas municipalizados da diferença em relação ao presente do número de dias de onda de calor (WSDI) segundo os cenários RCP 4.5 (acima) e RCP 8.5 (abaixo)

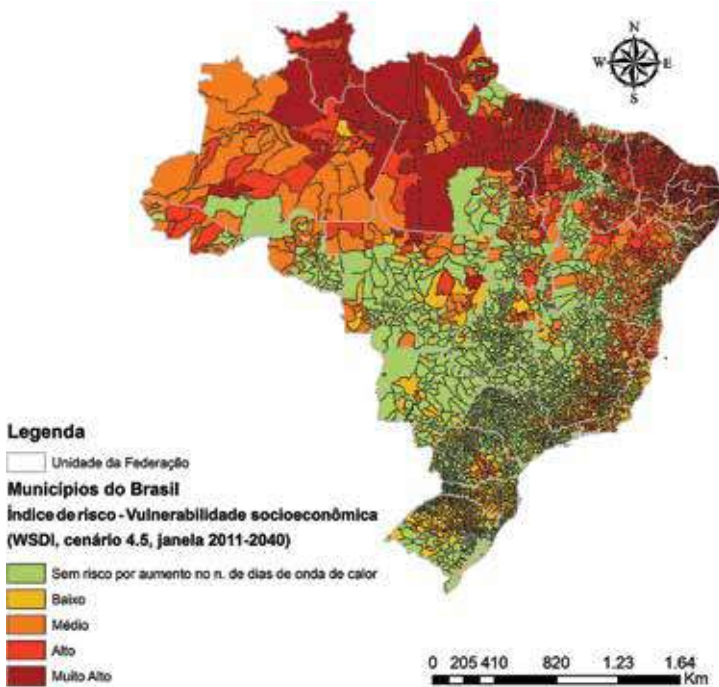


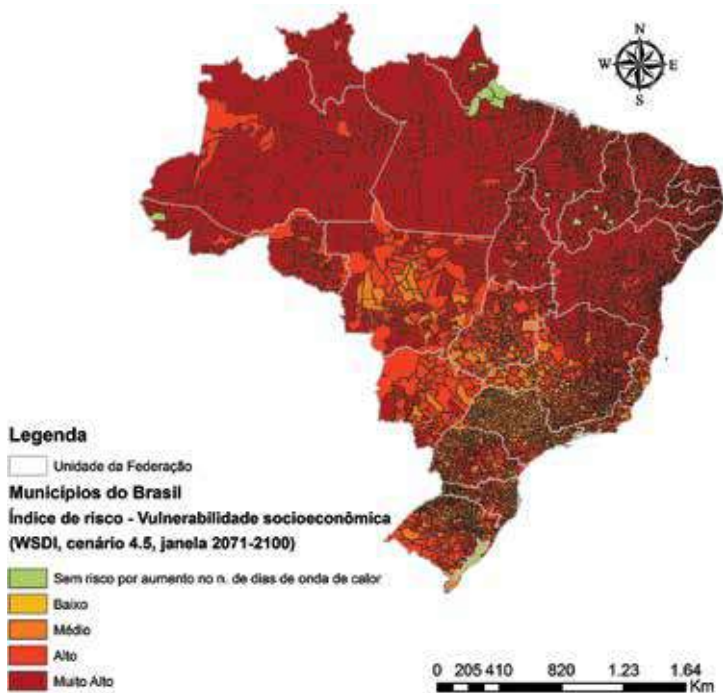
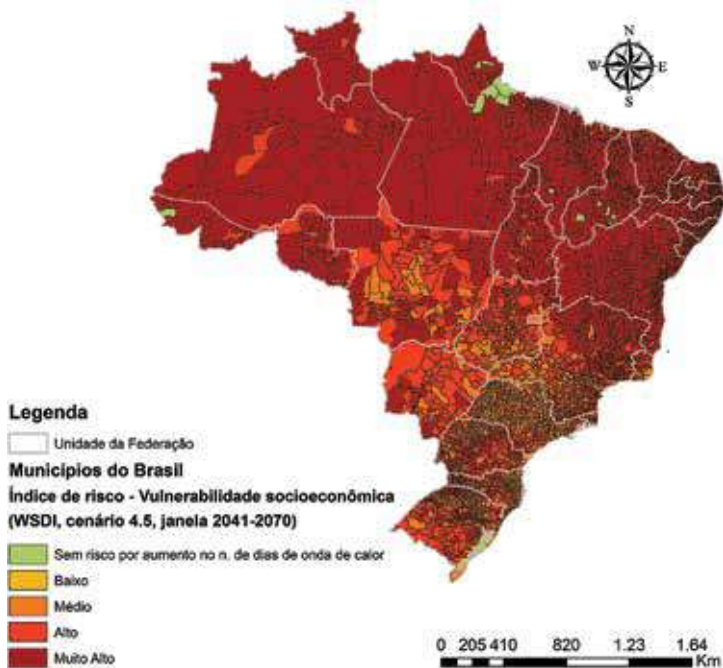
Nota: figura 7a, à esquerda a primeira janela de tempo (2011–2040); figura 7b, ao centro a segunda janela de tempo (2041–2070); e figura 7c, à direita a última janela de tempo (2071–2099).

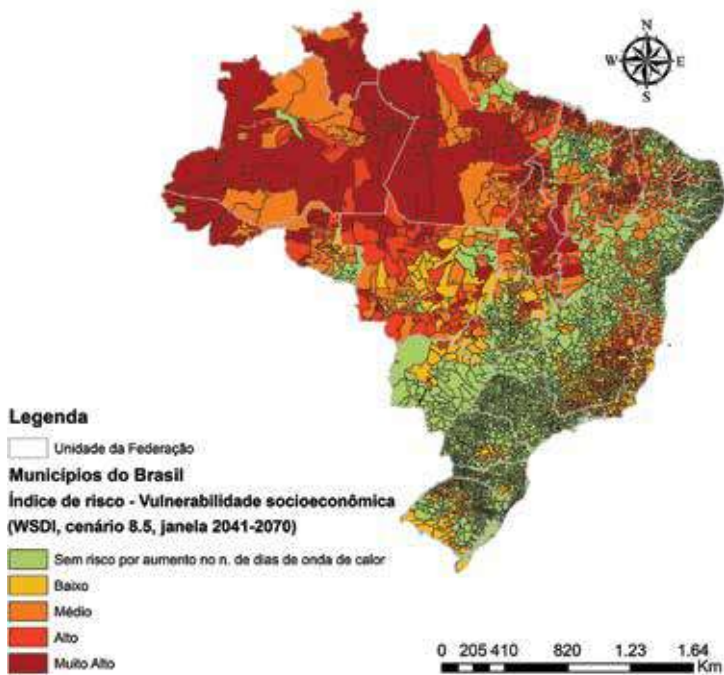
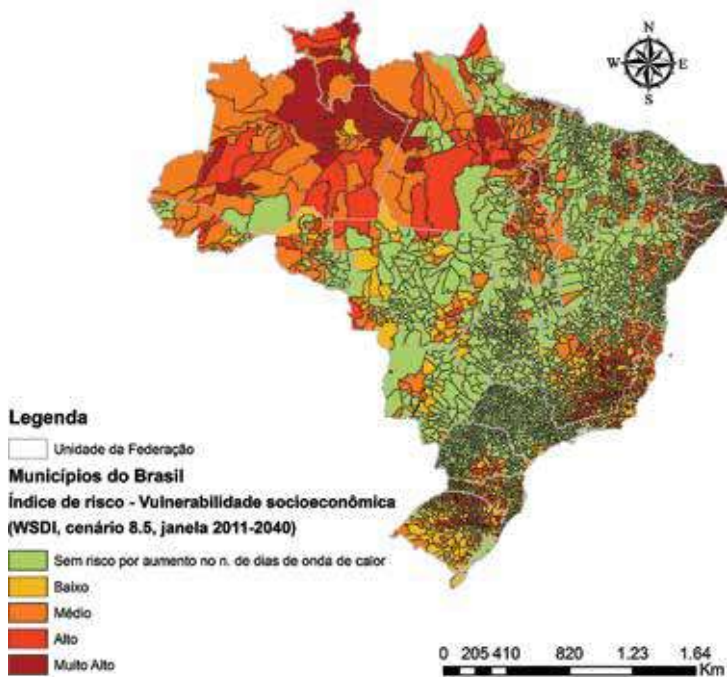
Fonte: Costa *et al.* (2015)

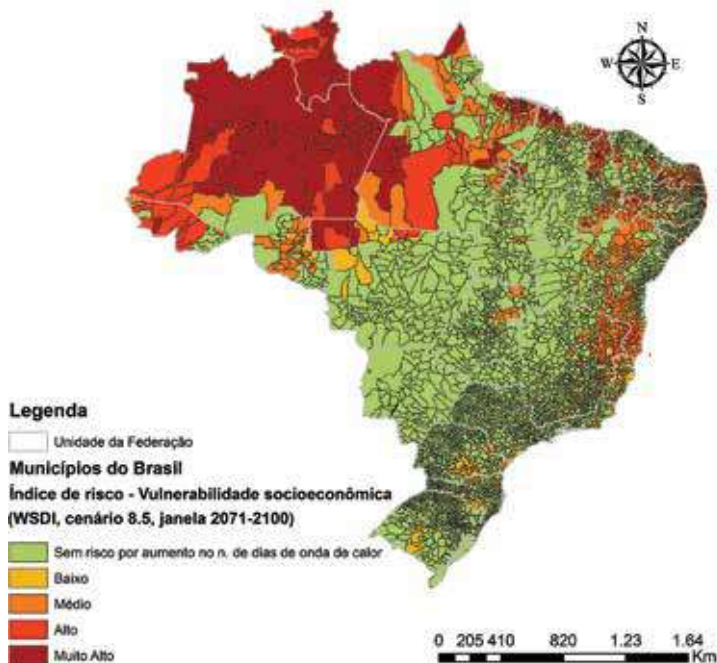
As regiões Norte e Nordeste apresentam alto risco de exposição às mudanças climáticas, a partir do primeiro período de tempo (2011–2040), mesmo no cenário otimista (RCP 4.5), uma vez que, com o menor aquecimento, sobretudo, na região Nordeste, os altos níveis de vulnerabilidade conduzem aos riscos climáticos mais elevados no país. No Centro-Oeste, destacamos áreas no segundo período de tempo do cenário pessimista (RCP 8.5) que enfrentarão um número elevado de ondas de calor se comparado com outros períodos avaliados, resultando em índices de risco alto e muito alto (figura 8).

Figura 8 – Mosaico de mapas de risco climático segundo aumento médio de temperatura e vulnerabilidade socioeconômica em 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5









No cenário RCP 4.5, para o risco composto com o *IV_{se}*, ao final do século XXI, foram identificados alguns municípios no Sul do país com baixo risco climático associado a ondas de calor e cidades no extremo oeste da Amazônia e norte da região Nordeste que apresentaram um risco inferior ao período anterior.

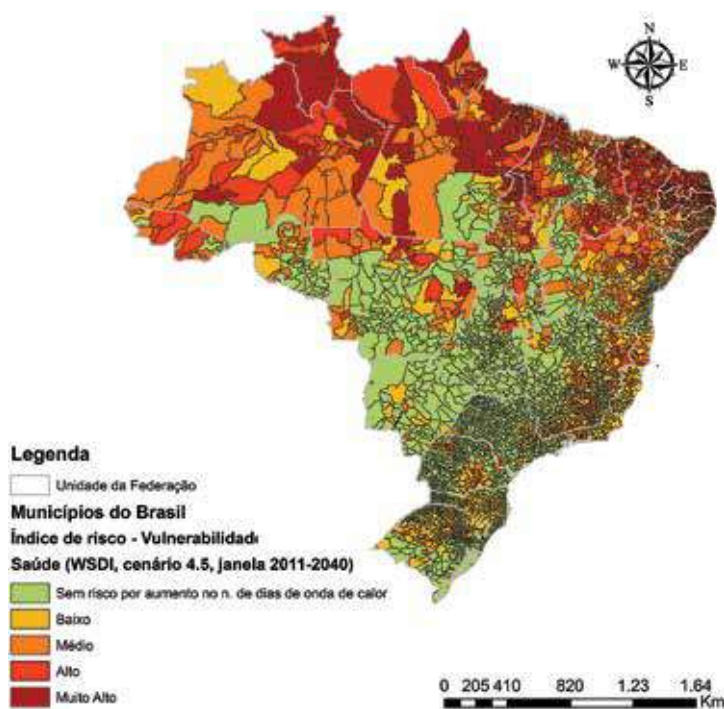
Nesse cenário, há um padrão de risco alto a partir da segunda janela de tempo em todas as regiões do país, enquanto no cenário RCP 8.5, observa-se um risco evidente nas regiões Norte e Centro-Oeste. Porém, a influência do padrão espacial da vulnerabilidade de acesso a serviços de saúde é destacada na maior heterogeneidade de classes de risco nessas regiões.

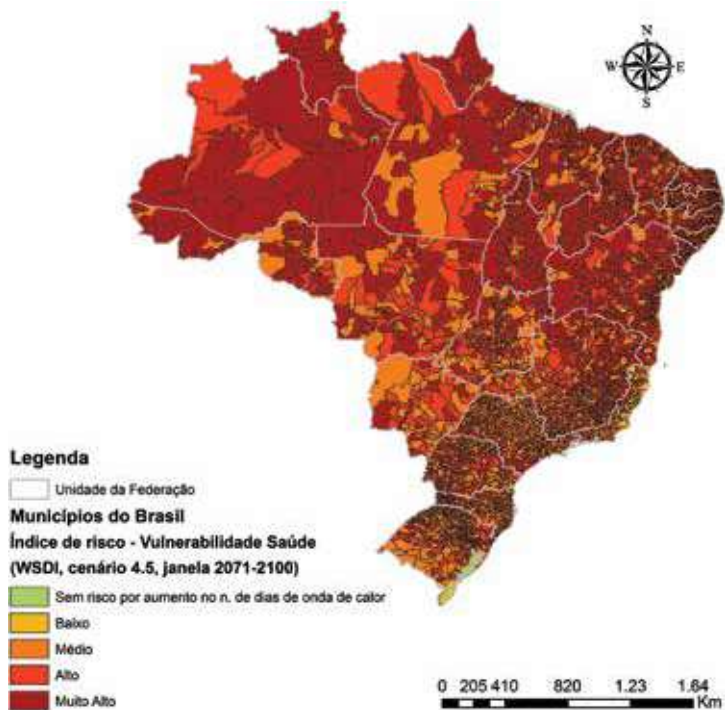
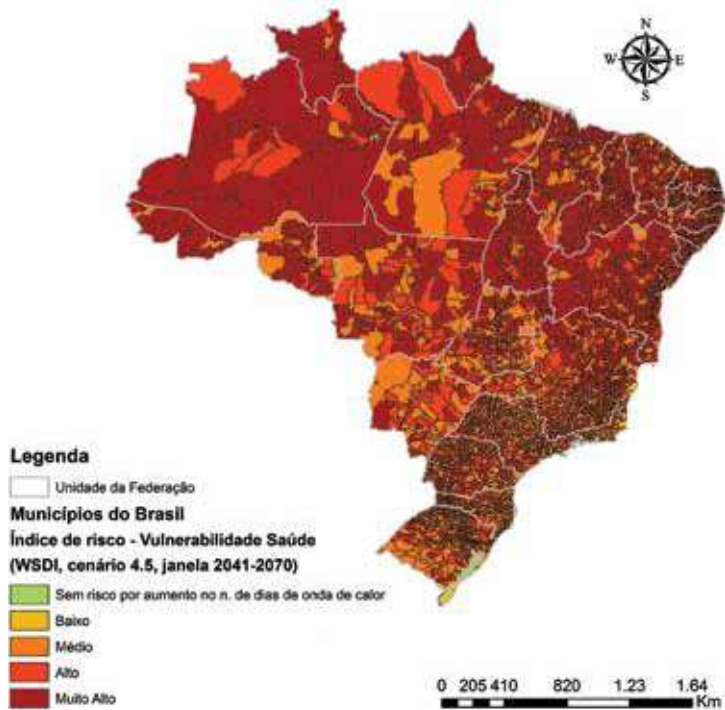
Em relação ao cenário RCP 8.5, considerado pessimista, observa-se um padrão de risco associado a ondas de calor mais localizado na região Norte para todos os períodos de projeção, principalmente na Amazônia Ocidental. Na primeira janela desse cenário, destaca-se também a região Sul do país, classificada, em geral, como em alto risco, mesmo com sua vulnerabilidade menor.

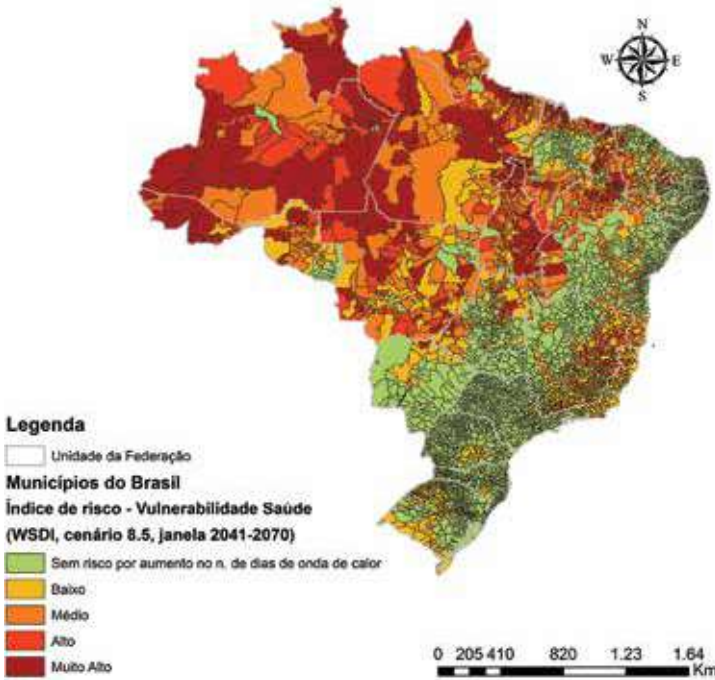
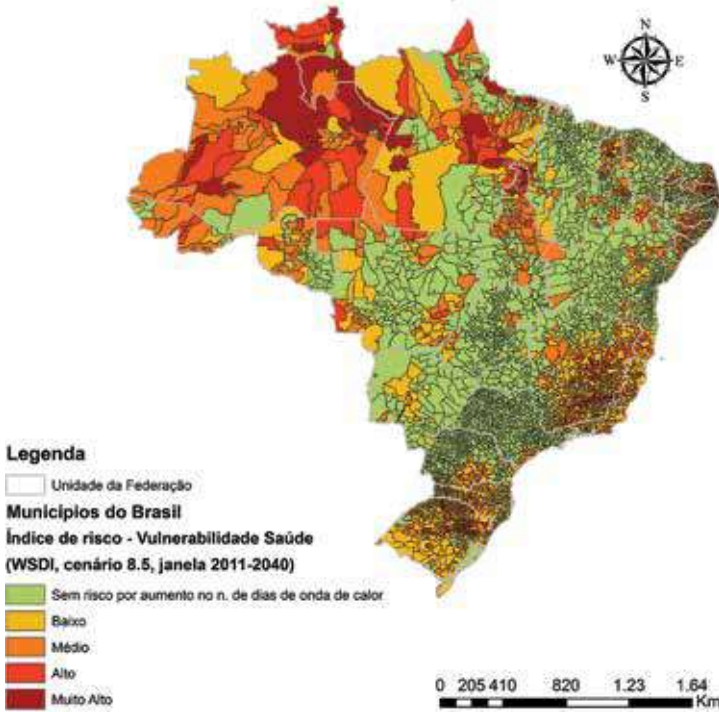
O semiárido nordestino apresenta um cenário agravado na sua condição de risco na última janela temporal do RCP 8.5.

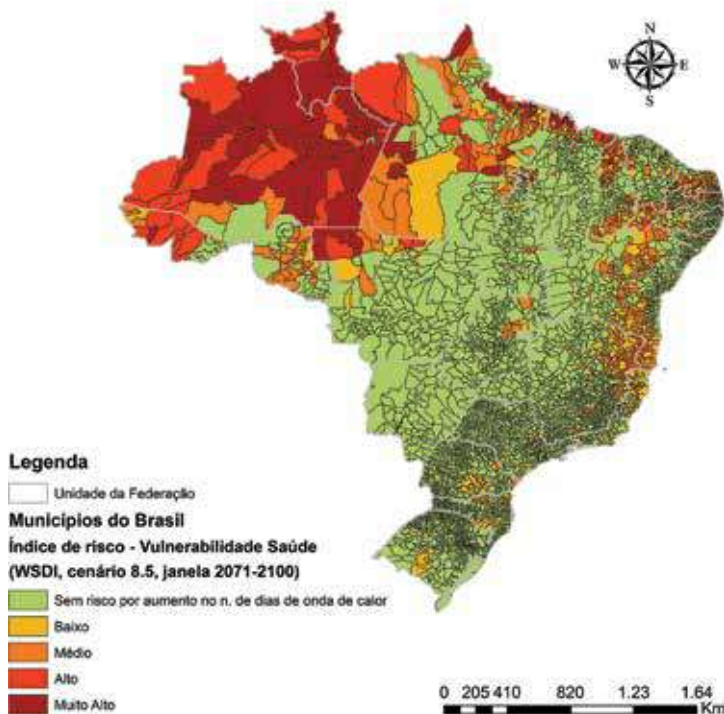
Uma vez que o indicador de exposição não foi alterado, quando analisado o risco associado à onda de calor considerando a vulnerabilidade de acesso a serviços de saúde, são observadas as mesmas diferenças entre cenários e períodos das projeções. Como apresentado na figura 9, que mostra um mosaico de mapas de risco climático segundo aumento médio de temperatura e vulnerabilidade de acesso a serviços de saúde em 2011–2040 (esquerda), 2041–2070 (meio) e 2071–2099 (direita) nos cenários RCP 4.5 (acima) e RCP 8.5 (abaixo).

Figura 9 – Mosaico de mapas de risco climático segundo aumento médio de temperatura e vulnerabilidade de acesso a serviços de saúde em 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5









Avaliando os municípios que apresentaram índice de risco climático associado a ondas de calor alto ou muito alto com mais de 250 mil habitantes em 2010, foi observado que a população das capitais das regiões Norte e Nordeste estarão expostas ao alto risco quando se considera a vulnerabilidade socioeconômica. No Sudeste, ressaltam-se os grandes municípios das mesorregiões metropolitanas das capitais que apresentaram risco elevado, como municípios da Baixada Fluminense/RJ e Governador Valadares/MG, em ambos os cenários, e Carapicuíba/SP, Diadema/SP e Itaquaquecetuba/SP, apenas no cenário otimista (RCP 4.5).

3.3.2 Ondas de calor e mortalidade geral

Os eventos extremos, incluindo as ondas de calor, são ameaças à saúde humana que produzem o incremento da mortalidade geral de uma população em nível global.

Vários estudos mostraram que as ondas de calor comprometem a saúde, principalmente, dos grupos mais vulneráveis de uma população, agravando o risco para doenças cardiovasculares, respiratórias, surtos de doenças mentais, dentre outras (IPCC WG2, 2014), sobretudo, nas áreas densamente urbanizadas, agravados pelo efeito de ilha de calor (MCMICHAEL *et al.*, 2004; AUBRECT, 2013a).

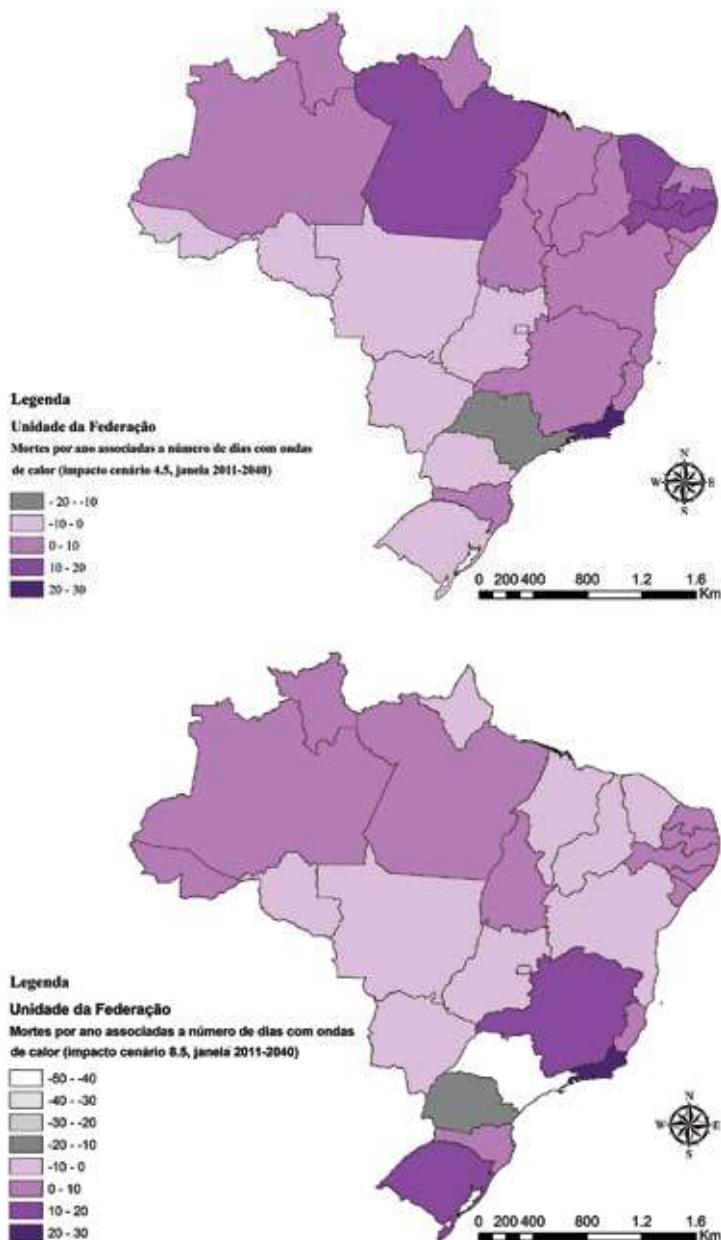
Para o cenário RCP 4.5 considerando a primeira janela (2011–2040), a região Nordeste apresentou o maior excesso de morte por ano, 70,04 mortes/ano (tabela 5). Contudo, foi no estado do Rio de Janeiro que o impacto das ondas de calor na mortalidade geral mostrou-se maior, conforme ilustra a figura 6. Para a referida projeção, o estado de São Paulo apresenta uma redução global no número de dias de ondas de calor, refletindo uma estimativa de impacto negativa (figura 9).

A tabela 6 apresenta a estimativa de impacto para o cenário RCP 8.5 no aumento do número de ondas de calor na mortalidade geral. O estado do Rio de Janeiro também foi identificado como o mais impactado nesse cenário (figura 9). São Paulo e Paraná também apresentaram estimativas negligenciáveis.

Nas janelas seguintes, foram avaliadas apenas as capitais e cada UF, não foram produzidos mapas para tais períodos. Avaliando a tabela 5, é possível afirmar que as capitais da região Sudeste contribuíram com mais de 35% para os excessos de mortes atribuídos ao aumento no número de dias de ondas de calor.

Os resultados para o cenário RCP 8.5 (tabela 6) refletem o inexpressivo aumento ou a redução no número de dias de onda de calor generalizado no território brasileiro. Porém, na região Norte, nas duas janelas finais, foi projetado um impacto significativo, com destaque para o excedente anual de morte estimado para Manaus, de 13,3 mortes/ano até 2100.

Figura 10 – Mapeamento do acumulado estadual de excesso de mortes/ano associado ao aumento no número de dias de onda de calor na janela entre 2011–2040 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



Nota: todos os municípios foram avaliados. A população base considerada foi do ano de 2010.

Tabela 5 – Número de mortes excedentes por ano (municipal, agregado por estado), 2041–2070 (capitais,

Janela 2011–2040				CENÁRIO		
UF	População	WSDif	Mortes/ano	Capital	UF	População
DF	2.570.160	-0.40	-0.45	Campo Grande	MS	1.117.278
GO	6.003.788	-1.66	-5.21	Cuiabá	MT	843.887
MT	3.035.122	-0.31	-1.37	Goiânia	GO	2.032.518
MS	2.449.024	-1.20	-1.63	Brasília	DF	5.006.230
Centro-Oeste	14.058.094	-3.57	-8.66	Centro-Oeste		8.999.913
AL	3.120.494	1.61	3.83	São Luís	MA	1.194.762
BA	14.016.906	0.61	4.89	Teresina	PI	797.004
CE	8.452.381	3.74	16.81	Fortaleza	CE	2.956.280
MA	6.574.789	1.89	4.54	Natal	RN	1.119.017
PB	3.766.528	3.77	10.88	João Pessoa	PB	808.605
PE	8.796.448	2.13	17.12	Recife	PE	1.968.627
PI	3.110.292	1.82	3.44	Maceió	AL	1.027.695
RN	3.168.027	3.97	6.59	Aracaju	SE	755.079
SE	2.068.017	1.03	1.94	Salvador	BA	3.003.424
Nordeste	53.073.882	20.58	70.04	Nordeste		13.630.493
AC	733.559	0.46	-0.10	Porto Velho	RO	558.429
AP	669.526	3.81	0.76	Rio Branco	AC	531.494
AM	3.483.985	2.28	1.89	Manaus	AM	2.901.557
PA	7.581.051	4.79	17.13	Boa Vista	RR	473.626
RO	1.562.409	-0.35	-0.32	Belém	PA	2.208.004
RR	450.479	4.72	0.82	Macapá	AP	758.603
TO	1.383.445	1.72	0.88	Palmas	TO	240.156
Norte	15.864.454	17.43	21.07	Norte		7.671.869
ES	3.514.952	1.05	2.71	Belo Horizonte	MG	2.946.323
MG	19.597.330	0.14	2.63	Vitória	ES	487.434
RJ	15.989.929	1.67	29.14	Rio de Janeiro	RJ	7.354.310
SP	41.262.199	-1.37	-18.55	São Paulo	SP	14.934.150
Sudeste	80.364.410	1.49	15.93	Sudeste		25.722.217
PR	10.444.526	-0.51	-4.39	Curitiba	PR	217.4907
RS	10.693.929	0.13	-3.54	Florianópolis	SC	625.605
SC	6.248.436	-0.01	0.17	Porto Alegre	RS	1.561.164
Sul	27.386.891	-0.39	-7.76	Sul		4.361.676
BRASIL	190.747.731	35.54	90.62	BRASIL		60.386.168

projetado para as janelas de tempo 2011–2040
agregado por estado) e 2071–2100 no cenário RCP 4.5

RCP 4.5		Janela 2071–2100				
2041–2070		Capital	UF	População	WSDIdif	Mortes/ano
WSDIdif	Mortes/ano					
11.50	7.45	Campo Grande	MS	1.318.000	9.61	7.34
8.33	4.12	Cuiabá	MT	1.002.734	6.00	3.52
12.40	14.53	Goiânia	GO	2.467.625	9.14	13.01
12.17	26.40	Brasília	DF	6.571.542	10.54	30.01
44.40	52.50	Centro-Oeste		11.359.901	35.29	53.89
4.23	2.59	São Luís	MA	1.296.164	7.57	5.03
9.07	3.88	Teresina	PI	788.306	6.07	2.57
2.50	4.29	Fortaleza	CE	3.260.585	2.57	4.86
2.27	1.44	Natal	RN	1.298.040	4.64	3.43
6.60	3.21	João Pessoa	PB	893.140	6.89	3.71
8.80	13.27	Recife	PE	2.197.722	7.43	12.50
7.77	5.16	Maceió	AL	1.097.594	8.46	6.00
6.70	2.87	Aracaju	SE	888.305	6.00	3.02
7.43	13.32	Salvador	BA	3.160.465	6.36	11.99
55.37	50.03	Nordeste		14.880.321	56.00	53.12
4.73	1.45	Porto Velho	RO	653.512	4.43	1.59
4.73	1.30	Rio Branco	AC	663.256	6.00	2.06
8.30	11.35	Manaus	AM	3.589.043	6.46	10.94
8.83	1.61	Boa Vista	RR	597.404	11.75	2.70
9.33	12.39	Belém	PA	2.603.921	13.96	21.86
6.43	1.86	Macapá	AP	994.290	11.50	4.36
7.47	0.48	Palmas	TO	285.908	7.71	0.59
49.83	30.44	Norte		9.387.334	61.82	44.09
8.53	16.69	Belo Horizonte	MG	3.193.127	6.82	14.46
3.53	1.13	Vitória	ES	577.830	4.00	1.51
3.67	25.19	Rio de Janeiro	RJ	7.876.904	5.29	38.90
3.73	38.81	São Paulo	SP	1.6751.979	3.39	39.57
19.47	81.82	Sudeste		28.399.840	19.50	94.44
6.60	9.18	Curitiba	PR	2.403.288	5.25	8.07
3.10	0.99	Florianópolis	SC	767.137	3.93	1.54
3.70	5.00	Porto Alegre	RS	1.595.961	4.29	5.92
13.40	15.17	Sul		4.766.386	13.46	15.53
182.47	229.97	BRASIL		68.793.782	186.07	261.06

Tabela 6 – Riscos relativos para o desenvolvimento da diarreia segundo UF e capitais janelas de tempo, modelos climáticos

	2011–2040		Capitais
	Eta-HadGEM2-ES		
UF	4.5	8.5	
	RR	RR	
NORTE			
AC	1,1	1,12	Rio Branco
AM	1,08	1,09	Manaus
AP	1,07	1,09	Macapá
PA	1,07	1,09	Belém
TO	1,08	1,12	Palmas
RR	1,07	1,09	Boa Vista
RO	1,11	1,13	Porto Velho
NORDESTE			
BA	1,05	1,07	Salvador
AL	1,05	1,06	Maceió
CE	1,05	1,06	Fortaleza
MA	1,06	1,08	São Luiz
PB	1,05	1,06	João Pessoa
PE	1,05	1,06	Recife
PI	1,05	1,09	Teresina
RN	1,05	1,06	Natal
SE	1,05	1,06	Aracajú
CENTRO-OESTE			
DF	1,1	1,13	Distrito Federal
GO	1,12	1,15	Goiânia
MS	1,14	1,16	Campo Grande
MT	1,11	1,15	Cuiabá
SUL			
PR	1,13	1,15	Curitiba
RS	1,1	1,12	Porto Alegre
SC	1,09	1,1	Florianópolis
SUDESTE			
RJ	1,08	1,09	Rio de Janeiro
SP	1,13	1,15	São Paulo
MG	1,09	1,11	Belo Horizonte
ES	1,06	1,08	Vitória

janelas de tempo, modelos climáticos e cenários de emissão de GEE – Brasil:
e cenários de emissão de GEE – Brasil: UF e capitais

2041–2070		2071–2100	
Eta-HadGEM2-ES		Eta-HadGEM2-ES	
4.5	8.5	4.5	8.5
RR	RR	RR	RR
1,15	1,22	1,18	1,36
1,15	1,21	1,19	1,39
1,13	1,18	1,16	1,29
1,11	1,16	1,14	1,27
1,13	1,23	1,17	1,35
1,13	1,2	1,16	1,32
1,14	1,22	1,18	1,36
1,1	1,14	1,13	1,22
1,1	1,13	1,12	1,2
1,09	1,13	1,12	1,2
1,1	1,14	1,13	1,22
1,1	1,13	1,12	1,2
1,1	1,13	1,12	1,2
1,1	1,17	1,14	1,26
1,09	1,13	1,12	1,2
1,1	1,13	1,12	1,21
1,14	1,23	1,19	1,35
1,16	1,25	1,2	1,38
1,18	1,25	1,2	1,39
1,17	1,25	1,2	1,39
1,12	1,16	1,14	1,27
1,11	1,13	1,12	1,21
1,09	1,1	1,1	1,17
1,11	1,14	1,13	1,23
1,13	1,18	1,16	1,29
1,14	1,21	1,17	1,32
1,1	1,13	1,12	1,21

Tabela 7 – Número de mortes excedentes por ano (municipal, agregado por estado), 2041–2070 (capitais,

Janela 2011–2040				CENÁRIO		
UF	População	WSDdif	Mortes/ano	Capital	UF	População
DF	2.570.160	-1.53	-1.71	Campo Grande	MS	1.117.278
GO	6.003.788	-2.08	-6.27	Cuiabá	MT	843.887
MT	3.035.122	-0.63	-1.55	Goiânia	GO	2.032.518
MS	2.449.024	-0.98	-1.92	Brasília	DF	5.006.230
Centro-Oeste	14.058.094	-5.22	-11.46	Centro-Oeste		8.999.913
AL	3.120.494	0.82	2.02	São Luís	MA	1.194.762
BA	14.016.906	-1.03	-8.43	Teresina	PI	797.004
CE	8.452.381	-1.65	-6.21	Fortaleza	CE	2.956.280
MA	6.574.789	-1.81	-4.46	Natal	RN	1.119.017
PB	3.766.528	0.60	3.20	João Pessoa	PB	808.605
PE	8.796.448	0.00	4.05	Recife	PE	1.968.627
PI	3.110.292	-0.29	-0.43	Maceió	AL	1.027.695
RN	3.168.027	0.63	2.17	Aracaju	SE	755.079
SE	2.068.017	0.85	1.50	Salvador	BA	3.003.424
Nordeste	53.073.882	-1.89	-6.58	Nordeste		13.630.493
AC	733.559	0.58	0.13	Porto Velho	RO	558.429
AP	669.526	-0.84	-0.74	Rio Branco	AC	531.494
AM	3.483.985	2.83	1.84	Manaus	AM	2.901.557
PA	7.581.051	1.05	1.42	Boa Vista	RR	473.626
RO	1.562.409	-0.41	-0.22	Belém	PA	2.208.004
RR	450.479	2.79	0.31	Macapá	AP	758.603
TO	1.383.445	0.37	0.28	Palmas	TO	240.156
Norte	15.864.454	6.36	3.03	Norte		7.671.869
ES	3.514.952	2.22	6.13	Belo Horizonte	MG	2.946.323
MG	19.597.330	1.06	10.45	Vitória	ES	487.434
RJ	15.989.929	1.98	22.99	Rio de Janeiro	RJ	7.354.310
SP	41.262.199	-2.84	-44.05	São Paulo	SP	14.934.150
Sudeste	80.364.410	2.42	-4.47	Sudeste		25.722.217
PR	10.444.526	-1.44	-11.52	Curitiba	PR	2.174.907
RS	10.693.929	2.12	14.50	Florianópolis	SC	625.605
SC	6.248.436	1.07	3.21	Porto Alegre	RS	1.561.164
Sul	27.386.891	1.75	6.19	Sul		4.361.676
BRASIL	190.747.731	3.42	-13.29	BRASIL		60.386.168

projetado para as janelas de tempo 2011–2040
agregado por estado) e 2071–2100 no cenário RCP 8.5

RCP 8.5

2041–2070		Janela 2071–2100				
WSDIdif	Mortes/ano	Capital	UF	População	WSDIdif	Mortes/ano
-2.57	-1.66	Campo Grande	MS	1.318.000	-3.22	-2.46
-0.13	-0.07	Cuiabá	MT	1.002.734	-3.89	-2.28
1.13	1.33	Goiânia	GO	2.467.625	-1.21	-1.73
0.73	1.59	Brasília	DF	6.571.542	-1.51	-4.31
-0.83	1.19	Centro-Oeste		11.359.901	-9.83	-10.78
1.37	0.84	São Luís	MA	1.296.164	-0.87	-0.58
2.27	0.97	Teresina	PI	788.306	1.52	0.64
1.23	2.11	Fortaleza	CE	3.260.585	-0.30	-0.57
0.03	0.02	Natal	RN	1.298.040	0.29	0.22
-0.17	-0.08	João Pessoa	PB	893.140	1.59	0.85
-2.60	-3.92	Recife	PE	2.197.722	-0.16	-0.28
-2.10	-1.39	Maceió	AL	1.097.594	-0.77	-0.55
-0.97	-0.41	Aracaju	SE	888.305	0.54	0.27
-2.03	-3.64	Salvador	BA	3.160.465	-2.15	-4.05
-2.97	-5.51	Nordeste		14.880.321	-0.30	-4.03
2.00	0.61	Porto Velho	RO	653.512	-1.55	-0.56
2.97	0.81	Rio Branco	AC	663.256	-1.67	-0.57
4.17	5.70	Manaus	AM	3.589.043	7.87	13.31
4.90	0.89	Boa Vista	RR	597.404	3.02	0.69
6.33	8.41	Belém	PA	2.603.921	0.55	0.86
1.50	0.43	Macapá	AP	994.290	-2.13	-0.81
1.93	0.12	Palmas	TO	285.908	-0.98	-0.07
23.80	16.99	Norte		9.387.334	5.10	12.85
1.17	2.28	Belo Horizonte	MG	3.193.127	-0.72	-1.53
2.77	0.88	Vitória	ES	577.830	0.78	0.29
0.73	5.04	Rio de Janeiro	RJ	7.876.904	-0.42	-3.06
-1.07	-11.09	São Paulo	SP	16.751.979	-1.43	-16.66
3.60	-2.89	Sudeste		28.399.840	-1.79	-20.96
-2.50	-3.48	Curitiba	PR	2.403.288	-3.84	-5.90
-0.40	-0.13	Florianópolis	SC	767.137	-1.63	-0.64
-2.23	-3.02	Porto Alegre	RS	1.595.961	-2.61	-3.60
-5.13	-6.62	Sul		4.766.386	-8.08	-10.14
18.47	3.16	BRASIL		68.793.782	-14.90	-33.06

3.3.3 Impacto da temperatura na diarreia infantil

A tabela 8 apresenta os resultados do impacto das projeções climáticas de temperatura, considerando os dois cenários (RCP 4.5 (otimista) e RCP 8.5 (pessimista), para a diarreia infantil no Brasil e nas regiões.

Observa-se, segundo as projeções no modelo, um aumento dos valores dos riscos relativos segundo o avanço nos períodos de tempo considerados em todas as regiões e no país. A exceção ocorreu na região Sul, onde os riscos relativos para esse cenário (RCP 4.5) não se alteraram quando comparados aos valores de riscos relativos das janelas de tempo de 2011–2040 e 2041–2070, respectivamente. Para o Brasil como um todo, para o período 2011–2040, verifica-se que 9% das diarreias podem estar relacionadas ao aumento da temperatura, chegando a alcançar um incremento de risco de 15% para o período de 2071–2100.

Para o cenário RCP 8.5 (pessimista), o mesmo comportamento é observado em relação aos riscos relativos para a ocorrência das doenças diarreicas entre menores de cinco anos de idade. Ao se comparar os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, observa-se uma elevação expressiva da temperatura, em comparação ao cenário otimista, em todas as regiões e para Brasil, o mesmo ocorrendo em relação aos riscos relativos (RR).

Tabela 8 – População menor de cinco anos, projeções de temperatura (°C) e RR para a diarreia infantil em menores de cinco anos, considerando os cenários e janelas de tempo no Brasil e nas regiões

MODELO Eta-HadGEM2-ES					
RCP 4.5				RCP 8.5	
Regiões	Pop. < 5 anos	Aumento T(°C)	RR	Aumento T(°C)	RR
2011–2040					
NORTE	1.553.548	1,51	1,08	1,87	1,1
NORDESTE	4.231.910	1,01	1,05	1,3	1,07
CENTRO-OESTE	1.062.663	2,33	1,12	2,96	1,15
SUL	1.763.744	1,97	1,11	2,31	1,13
SUDESTE	5.184.294	1,7	1,11	2,02	1,12
BRASIL	13.796.159	1,7	1,09	2,02	1,11
2041–2070					
NORTE	443.093	2,63	1,14	4,19	1,2
NORDESTE	676.177	1,93	1,1	2,6	1,13
CENTRO-OESTE	469.214	3,26	1,15	4,95	1,24
SUL	191.702	2,11	1,11	2,52	1,14
SUDESTE	1.187.465	2,42	1,13	3,14	1,17
BRASIL	2.967.651	2,42	1,12	3,14	1,17
2071–2100					
NORTE	543.630	3,46	1,17	7,04	1,34
NORDESTE	737.458	2,49	1,12	4,07	1,21
CENTRO-OESTE	593.462	3,98	1,19	7,7	1,36
SUL	209.343	2,46	1,13	4,28	1,24
SUDESTE	1.312.167	2,88	1,15	5,2	1,28
BRASIL	3.396.060	2,88	1,15	5,2	1,28

A tabela 9 apresenta os valores de risco relativo para o desenvolvimento da diarreia entre menores de cinco anos de idade para os vários períodos até o final do século.

Observa-se, na tabela 9, que, no período 2011–2040, para o RCP 4.5, os valores mais elevados de riscos relativos foram encontrados nas UFs de Mato Grosso do Sul (RR = 1,14), do Paraná e de São Paulo (RR = 1,13). Já no cenário 8.5, os valores mais elevados de riscos relativos foram encontrados nas UFs de Mato Grosso do Sul (RR = 1,16), Goiás, Mato Grosso, Paraná e São Paulo (RR = 1,15). Nesse mesmo cenário (8.5), as UFs com maior risco para desenvolvimento da diarreia foram Goiás e Mato Grosso (RR = 1,09).

Na janela de tempo 2041–2070, no cenário RCP 4.5, os maiores valores de risco relativo foram encontrados nas capitais Campo Grande/MS (RR = 1,18) e Goiânia/GO (RR = 1,16). Nesse mesmo modelo climático, porém de maior emissão de GEE (RCP 8.5), essas duas capitais, além de Cuiabá/MT, também tiveram os maiores valores de risco relativo (RR = 1,25), seguidas do Distrito Federal e de Palmas/TO (RR = 1,23). Em 2071–2100, no cenário RCP 4.5, os maiores riscos relativos foram estimados nas capitais Goiânia, Campo Grande e Cuiabá (RR = 1,20). No cenário RCP 8.5, o maior risco relativo (RR = 1,39) foi encontrado nas capitais Campo Grande, Cuiabá e Manaus.

Tabela 9 – Riscos relativos para o desenvolvimento da diarreia segundo janelas de tempo, modelos climáticos e cenários de emissão de GEE – Brasil: UF e capitais

2011–2040			2041–2070			2071–2100	
ETA-HADGEM2-ES			ETA-HADGEM2-ES			ETA-HADGEM2-ES	
UF	4.5	8.5	Capitais	4.5	8.5	4.5	8.5
	RR	RR		RR	RR	RR	RR
NORTE							
AC	1,1	1,12	Rio Branco	1,15	1,22	1,18	1,36
AM	1,08	1,09	Manaus	1,15	1,21	1,19	1,39
AP	1,07	1,09	Macapá	1,13	1,18	1,16	1,29
PA	1,07	1,09	Belém	1,11	1,16	1,14	1,27
TO	1,08	1,12	Palmas	1,13	1,23	1,17	1,35
RR	1,07	1,09	Boa Vista	1,13	1,2	1,16	1,32
RO	1,11	1,13	Porto Velho	1,14	1,22	1,18	1,36
NORDESTE							
BA	1,05	1,07	Salvador	1,1	1,14	1,13	1,22
AL	1,05	1,06	Maceió	1,1	1,13	1,12	1,2
CE	1,05	1,06	Fortaleza	1,09	1,13	1,12	1,2
MA	1,06	1,08	São Luiz	1,1	1,14	1,13	1,22
PB	1,05	1,06	João Pessoa	1,1	1,13	1,12	1,2
PE	1,05	1,06	Recife	1,1	1,13	1,12	1,2
PI	1,05	1,09	Terezina	1,1	1,17	1,14	1,26
RN	1,05	1,06	Natal	1,09	1,13	1,12	1,2
SE	1,05	1,06	Aracajú	1,1	1,13	1,12	1,21
CENTRO-OESTE							
DF	1,1	1,13	Distrito Federal	1,14	1,23	1,19	1,35
GO	1,12	1,15	Goiânia	1,16	1,25	1,2	1,38
MS	1,14	1,16	Campo Grande	1,18	1,25	1,2	1,39
MT	1,11	1,15	Cuiabá	1,17	1,25	1,2	1,39

(continua)

2011–2040			2041–2070			2071–2100	
ETA-HADGEM2-ES			ETA-HADGEM2-ES			ETA-HADGEM2-ES	
UF	4.5	8.5	Capitais	4.5	8.5	4.5	8.5
	RR	RR		RR	RR	RR	RR
SUL							
PR	1,13	1,15	Curitiba	1,12	1,16	1,14	1,27
RS	1,1	1,12	Porto Alegre	1,11	1,13	1,12	1,21
SC	1,09	1,1	Florianópolis	1,09	1,1	1,1	1,17
SUDESTE							
RJ	1,08	1,09	Rio de Janeiro	1,11	1,14	1,13	1,23
SP	1,13	1,15	São Paulo	1,13	1,18	1,16	1,29
MG	1,09	1,11	Belo Horizonte	1,14	1,21	1,17	1,32
ES	1,06	1,08	Vitória	1,1	1,13	1,12	1,21

4 Discussão

As informações deste capítulo têm o objetivo de apresentar uma síntese da componente Saúde no contexto da TCN brasileira de acordo com as Diretrizes das Comunicações Nacionais dos Países em Desenvolvimento (Decisão 17/CP.8 da Convenção) e as diretrizes metodológicas do IPCC. Seu conteúdo apresenta dados e informações que podem subsidiar gestores e profissionais de saúde, assim como outros setores da economia e da sociedade civil organizada, considerando as projeções de alguns agravos relacionados diretamente com as alterações climáticas, a partir de simulações dos modelos globais. Embora resumido e com algumas lacunas e incertezas, o capítulo evidencia a importância da modelagem da mudança climática para a sociedade e constitui um alerta sobre a vulnerabilidade, os riscos e os impactos na saúde pública, com utilidade para gestores, tomadores de decisão e governantes do setor saúde.

A natureza, a magnitude e a extensão dos efeitos das alterações climáticas no Brasil variam ao longo do tempo e do espaço. Os impactos das alterações climáticas na saúde humana são complexos, muitas vezes indiretos e

multifatoriais. Considerando os problemas estruturais do modelo de desenvolvimento do país, como acentuada desigualdade social, infraestrutura de saneamento, educação, serviços de transporte, serviços de saúde deficientes, há um consenso por parte da comunidade científica de que os problemas de saúde pública não necessariamente são originados pelas mudanças climáticas. Na sua maioria, esses problemas são estruturais e independentes das alterações do clima, mas certamente serão exacerbados ou intensificados por esses cenários das alterações climáticas.

4.1 Exposição climática

No cenário de sustentabilidade global (RCP 4.5), o Brasil ao longo do século XXI aquecerá 1,18°C acima da média histórica, ultrapassando em todo o país o limiar de 2°C, com municípios apresentando incremento de temperaturas acima de 4°C, como é o caso das capitais Campo Grande/MS e da Região Metropolitana de Goiânia/GO na região Centro-Oeste, assim como outras grandes cidades do interior mineiro e sudeste paulista. Na região Norte, o aquecimento parece ser agravado pelos corredores de desmatamento, associados à abertura de novas rodovias. Verifica-se também a formação de uma bolha de aquecimento sobre a Região Metropolitana de Manaus/AM.

Para o cenário de aquecimento global (RCP 8.5), sem mitigação segundo o modelo Eta-HadGEM2-ES, o aquecimento no Brasil deverá alcançar um aumento médio de 4,8°C (ligeiramente superior à média global) variando entre o mínimo de 3,15°C (São José do Norte/RS) no início do século e 8,43°C (Parintins/AM) no final. Esse aumento de temperatura é mais extensivo em termos da cobertura espacial ao longo do século. Nesse cenário *business as usual* (RCP 8.5), as projeções mostram que todas as regiões ultrapassarão o limiar de 4°C de aquecimento, principalmente as regiões Norte e Centro-Oeste, onde o aquecimento médio ultrapassa respectivamente, 6°C e 7,5°C em quase toda a extensão. Na região Norte, em especial a Amazônia Ocidental, as projeções apontam um aumento significativo no número de dias de ondas de calor. Essas projeções chamam atenção para a situação do estresse térmico e as consequências para a população acima de 40 anos principalmente para as doenças cardiovasculares como o infarto

agudo do miocárdio e as doenças hipertensivas. Também é importante ressaltar que a vulnerabilidade social interfere diretamente na capacidade da população se adaptar a essas situações de estresse.

No cenário RCP 8.5 comparado com o RCP 4.5, o aquecimento agrava-se, sobretudo, em torno de três áreas de maior impacto:

- a) áreas do planalto central: com Brasília/DF, que registra um aumento de 2°C com expansão para toda a região Centro-Oeste, sul do Pará, sertão do Nordeste e interior norte da região Sudeste (São Paulo e Minas Gerais);
- b) área de bolha de aquecimento sobre a Amazônia: na região em torno de Manaus/AM, verifica-se um aumento de temperatura de mais de 4°C no cenário RCP 8.5 com aumento muito significativo em relação ao número de dias sob o efeito de onda de calor;
- c) área do Centro-Oeste e interior Sul-Sudeste: em comparação com o cenário 4.5, verifica-se um aquecimento de mais 3°C, o cenário pessimista (*business as usual*) é acompanhado de um aumento do índice de ondas de calor no estado de Mato Grosso para o período 2041–2070.

Na região Norte, existe uma tendência de aquecimento exponencial ao longo do século XXI centrado em torno de Manaus, onde se registra um dos maiores aquecimentos e aumentos de frequência de ondas de calor no final do século, seja no Brasil e na América Latina. Os estudos de modelagem evidenciam corredores de aquecimento na região do arco do desmatamento, principalmente em municípios com abertura de novas rodovias. Esses resultados indicam que a expansão do aquecimento para a região Norte, a partir da metade do século XXI, poderá ser agravada pelo desmatamento da floresta amazônica. Considerando a sensibilidade e a vulnerabilidade desse bioma a extremos climáticos, em especial as secas e as ondas de calor, eliminar o desmatamento da Amazônia pode constituir, não apenas uma medida de redução de emissões de GEE, mas também uma estratégia de adaptação climática regional, minimizando o aumento de temperaturas e reduzindo impactos nos padrões ecológicos e epidemiológicos da região.

Na análise comparativa dos efeitos dos cenários RCP 8.5 e 4.5, no conjunto de cidades com mais de 250 mil habitantes e com um aquecimento mínimo acima de 3°C, verificou-se que a população dessas cidades estaria sendo exposta a um clima mais quente e adverso, em comparação com o cenário RCP 4.5. Esse incremento resultante de um cenário global *business as usual* inclui cerca de 30 a 50 milhões de brasileiros.

Para analisar as implicações desta exposição climática às circunstâncias estruturais do modelo de desenvolvimento, foi necessária uma análise espacial dos determinantes socioeconômicos e sociodemográficos da população brasileira e da situação de saúde atual das doenças sensíveis ao clima no Brasil.

Os resultados das projeções dos modelos para as várias regiões do país são extremamente relevantes para o planejamento estratégico, para a definição de prioridades, para a tomada de decisão e para a implementação de ações proativas que contribuem para a redução das desigualdades sociais, a melhoria de infraestrutura, a ampliação e a capacitação de serviços de saúde, a redução das vulnerabilidades sociais e ambientais e a implementação de planos de adaptação de nível local.

4.2 Análise dos indicadores de vulnerabilidade

A análise da situação socioeconômica do Brasil, segundo os indicadores selecionados usando o último censo demográfico no país (2010), revelou uma situação preocupante de vulnerabilidade social no que se refere à saúde da população nos municípios localizados na região Nordeste e nas regiões da Amazônia. Em comparação com regiões mais desenvolvidas, como a região Sudeste. As regiões Nordeste e parte da Amazônia Ocidental e Oriental apresentam predomínio de unidades territoriais classificadas como de baixo e muito baixo IDH e de menor oferta de serviços de infraestrutura e de saúde. Diante de uma perspectiva de aumento na temperatura média e na frequência e intensidade de ondas de calor, essa situação de vulnerabilidade socioeconômica e de acesso ao serviço de saúde no país poderá comprometer significativamente a qualidade de vida, o bem-estar e os agravos à saúde dessas populações em situação de exclusão social.

A análise de componentes principais mostrou que a maior parte dos indicadores socioeconômicos estão correlacionados refletindo contextos em que coexistem desigualdades que podem ser agravadas com as mudanças climáticas. Esses cenários devem ser considerados para o planejamento de ações locais.

Os resultados da análise especial revelam que a região Norte e áreas da região Nordeste são apontadas consistentemente como as mais vulneráveis, seja ao nível da saúde, seja ao nível socioeconômico, em especial o oeste da região Norte e o semiárido do Nordeste. As regiões norte e leste do estado de Minas Gerais, na região Sudeste, destacaram-se pela concentração de municípios considerados de vulnerabilidade elevada, sobretudo, ao nível socioeconômico.

O mapeamento da vulnerabilidade referente ao acesso a serviços de saúde demonstra uma distribuição mais heterogênea, com municípios em situação de alta vulnerabilidade em todas as regiões. Isso reflete a política de definição de municípios polos em microrregiões para concentrar a oferta de serviços de saúde, principalmente de alta complexidade.

Contudo, apesar do acesso aos serviços de saúde nas últimas décadas ter apresentado melhorias, ainda existem importantes limitações e desigualdades regionais como acesso a saneamento e esgotamento sanitário, o que representa um entrave para o enfrentamento das mudanças climáticas na perspectiva da saúde pública. As mudanças climáticas e socioambientais ameaçam as conquistas e os esforços empreendidos para a redução das doenças transmissíveis e não transmissíveis no Brasil, as quais poderão ser acentuadas, sobretudo, nas regiões Norte e Nordeste, em função das atuais características da infraestrutura de saúde e maior vulnerabilidade social decorrente das condições socioeconômicas.

4.3 Risco climático

O risco climático foi calculado em função do aumento de temperatura média e de dias de ondas de calor, assim como em função da vulnerabilidade socioeconômica e de serviços de saúde. Esta análise permitiu observar, para a região Centro-Oeste, áreas que enfrentarão um elevado aquecimento, resultando

em um índice de risco muito alto (acima de 2°C) já na primeira janela de tempo (2011–2040) do cenário RCP 4.5.

A região Norte foi apontada como uma área de risco muito alto em todas as janelas temporais para ambos os cenários, independente do tipo de vulnerabilidade abordada. As projeções climáticas indicam um aumento severo no número de ondas de calor na região, principalmente na porção mais ocidental (COSTA *et al.*, 2015). Contudo, essa é uma área notadamente menos desenvolvida e com serviços básicos de infraestrutura de saneamento e saúde precários ou inexistentes, o que caracteriza essa população como muito vulnerável (PINHEIRO *et al.*, 2016a). Em avaliações anteriores locais, Ignotti *et al.* (2009) estimou um aumento percentual no risco relativo de internações hospitalares de idosos entre 21% e 47% associado ao aumento da temperatura média do ambiente para a cidade de Alta Floresta/MT, localizada na Amazônia Legal. Do ponto de vista de saúde pública, apesar de seu montante populacional representar menos de 10% da população nacional, a região Norte é uma área prioritária para o delineamento de planos de adaptação e alerta para as alterações climáticas. No cenário pessimista, a Amazônia Ocidental será uma das áreas mais críticas do país. Além disto, a região Amazônica é estratégica no contexto de mudanças climáticas e carece de dispositivos para proteger sua população e biodiversidade das ameaças ambientais.

Os resultados das análises permitiram observar que as regiões Norte e Nordeste apresentarão alto risco, sobretudo, no cenário RCP 8.5, seja em relação ao aumento de temperatura média, seja ao aumento de frequência de ondas de calor, uma vez que, apresentando menor aquecimento médio (no caso da região Nordeste), os altos níveis de vulnerabilidade conduzem aos riscos climáticos mais elevados, comprometendo a saúde principalmente de grupos mais vulneráveis como crianças, idosos e pessoas com antecedentes de doenças cardiovasculares e respiratórias.

Avaliando os municípios com mais de 250 mil habitantes em 2010 que apresentaram índice de risco alto ou muito alto, foi observado que toda a população das capitais das regiões Norte e Nordeste está exposta a um alto risco, considerando a sua vulnerabilidade socioeconômica. No Sudeste, ressaltam-se os grandes municípios das regiões metropolitanas das capitais, como, por exemplo, os municípios da

Baixada Fluminense na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, municípios da Região Metropolitana de São Paulo como Carapicuíba, Diadema e Itaquaquecetuba, e Governador Valadares/MG, que apresentam risco elevado. Essas regiões urbanas de alto risco caracterizam-se como prioritárias para políticas de adaptação climática.

Na análise do risco climático, observou-se que, apesar do risco associado à vulnerabilidade ao acesso aos serviços de saúde ser mais elevado no interior do Nordeste e no oeste da região Norte, a elevação da temperatura estimada no decorrer do século não impediu que áreas com melhor infraestrutura de saúde, como parte das regiões Sul e Sudeste, apresentassem também um alto risco climático.

Hajat *et al.* (2006) estimaram o efeito adicional de dias consecutivos com altas temperaturas em três cidades europeias utilizando séries temporais de mais de 18 anos. O incremento percentual na mortalidade para dias em ondas de calor variou entre as cidades, de 5.5% em Londres a 15.2% em Milão. Outro estudo elaborado com base em dados de 66 comunidades chinesas também encontrou um contraste significativo no excesso de mortes percentuais atribuídas a ondas de calor e apontou maior impacto nas comunidades mais urbanizadas e populosas (MA *et al.*, 2015). Essas heterogeneidades podem ser atribuídas à vulnerabilidade de cada população, bem como à aclimatação fisiológica e comportamental (MCGEEHIN; MIRABELLI, 2001; KOPPE *et al.*, 2004).

Apesar do Rio de Janeiro apresentar vulnerabilidade socioeconômica e de acesso aos serviços de saúde menor comparada aos estados das regiões Norte e Nordeste, o impacto das ondas de calor na mortalidade geral mostrou-se importante e sugere a priorização dos municípios fluminenses, principalmente da Baixada Fluminense, nos planos de mitigação, adaptação e alocação de recursos, principalmente, para a capacitação da área de saúde atender os impactos das mudanças climáticas.

Não obstante as limitações e incertezas intrínsecas das projeções de clima futuro, os resultados desses modelos e da vulnerabilidade socioeconômica e dos serviços de saúde permitiram estimar riscos qualitativos, de forma hipotética, que contribuem para a compreensão dos efeitos das alterações climáticas para

a saúde humana, reunindo informações que podem subsidiar ações regionais de adaptação, assim como sensibilizar o setor saúde em nível municipal para a importância de ações proativas e preventivas para o setor melhor enfrentar os impactos das alterações climáticas.

4.4 Impacto na mortalidade geral por ondas de calor

Fatores como nível de desenvolvimento econômico, educação, localização geográfica, crescimento populacional e raça/etnia podem ter influência importante nas perdas potenciais para a saúde provenientes das mudanças climáticas (BASU; OSTRO, 2008; SAMSON *et al.*, 2011; MALIK *et al.*, 2012), já que podem determinar o acesso a cuidados de saúde de qualidade e serviços de saúde pública essenciais (SMITH, 2008; FRUMKIN; MCMICHAEL, 2008). Outros fatores como gênero e estrutura etária (crianças, jovens e idosos) magnificam a vulnerabilidade e o risco de doenças e incapacidades relacionadas ao clima (PERERA, 2008; SHEFFIELD; LANDRIGAN, 2011). No mundo, a mortalidade devido a desastres naturais, incluindo as secas, inundações e tempestades, são maiores entre mulheres em comparação aos homens (WHO, 2011).

Na França, em 2003, Fouillet *et al.* (2008) mostraram que 75% das ondas de calor foram atribuíveis às mudanças climáticas antropogênicas, que foram responsáveis por aproximadamente 15 mil mortes. Além disso, 80% das mortes ocorreram em pessoas acima de 75 anos de idade. Condições térmicas dentro dos edifícios, incluindo ventilação, umidade, radiação das paredes e teto e presença de ar condicionado são fatores importantes na determinação da ocorrência de um evento adverso, sendo estas questões pouco exploradas em estudos epidemiológicos (ANDERSON *et al.*, 2012).

Os estudos epidemiológicos internacionais sobre o aumento de temperatura e impacto na saúde (morbidade e mortalidade) têm se concentrado em projeções de excesso de mortes associadas à exposição a elevadas temperaturas e a ondas de calor (extremos). No Brasil, os poucos estudos de impacto na saúde relativos à temperatura são descritivos e não permitem inferências causais. A literatura nacional ainda não reportou estudos sobre o excesso de mortes, considerando as projeções

dos modelos climáticos e os cenários de exposição RCP 4.5 e 8.5. Os resultados apresentados neste capítulo são os primeiros utilizando as projeções climáticas até o final do século, porém os valores de risco relativo não se referem a estudos realizados no Brasil (PINHEIRO *et al.*, 2016b). Deve-se procurar realizar estudos nacionais nas suas diversas regiões e biomas, de modo a caracterizar a exposição aos eventos extremos e produzir melhores estimativas de risco.

Nos resultados dos estudos para o cenário RCP 4.5, a região Nordeste apresenta o maior incremento, com 70 mortes por ano para todo o período projetado de ondas de calor. Em relação aos demais estados da Federação, o estado do Rio de Janeiro apresenta o maior impacto na mortalidade geral.

Para o cenário RCP 8.5, na região Sul, é estimado um excesso de seis mortes/ano entre 2011 e 2040 devido ao aumento de temperatura. No decorrer do século XXI, a região Sudeste (e suas capitais) apresenta o maior impacto de aumento de frequência de dias em ondas de calor no cenário otimista. Na cidade do Rio de Janeiro, os resultados apontam para um aumento de 25 mortes por ano e um acréscimo acima de 50% neste número entre 2041 e 2100. As capitais do estado de São Paulo e do Distrito Federal serão altamente impactadas até ao final do século (39 e 30 mortes/ano, respectivamente) nos desfechos epidemiológicos analisados. Esses resultados apontam a necessidade de estudos que estimem os riscos relativos para a saúde humana e para diferentes regiões do Brasil desses extremos de calor. Somente a partir desses estudos que se terá projeções mais realistas do impacto do aumento da temperatura e das ondas de calor sobre a população brasileira, considerando os cenários de aquecimento até o final do século XXI.

4.5 Diarreia

Vários estudos internacionais têm mostrado uma associação entre aumento de temperatura e extremos de calor ou eventos de precipitação e incidência de doenças gastrointestinais agudas ou veiculadas pela água e por alimentos. No entanto, o Brasil ainda carece de estudos que avaliem a contribuição das mudanças climáticas para as doenças diarreicas, o que motivou a realização deste estudo.

As regiões Centro-Oeste e Norte do país, a partir das projeções dos modelos climáticos, possivelmente serão as mais atingidas quanto às mudanças de temperatura. Além disso, possuem um sistema de saneamento precário, baixos níveis de escolaridade, socioeconômico e de cobertura de atenção básica de saúde. Esses fatores associados às mudanças climáticas potencializam a vulnerabilidade dessas regiões e contribuem para a elevação de riscos relacionados à diarreia entre menores de cinco anos.

Esses resultados da análise de hospitalizações no Brasil por doenças diarreicas mostram que, apesar da diminuição considerável ao longo das últimas décadas deste agravo, o quadro da diarreia pode ser intensificado, com alterações climáticas adversas, caso não sejam tomadas medidas de prevenção, como melhoria das condições de vulnerabilidade dos serviços de saneamento e acesso à atenção básica de saúde. Em relação às condições ambientais, especificamente relacionadas ao saneamento básico inexistente ou inadequado, destacou-se o elevado percentual (50%) de municípios sem saneamento ou com condições precárias, em todas as regiões do país, mas, sobretudo, nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. É, portanto, evidente que as políticas públicas devem priorizar o saneamento básico enquanto medida de proteção à saúde humana e adaptação às mudanças climáticas particularmente nas regiões com piores condições socioeconômicas do país e num quadro de mudança climática global.

Com o objetivo de minimizar as incertezas das estimativas do risco das doenças diarreicas para os menores de cinco anos, as análises foram realizadas considerando o efeito do aumento da temperatura na incidência de todas as causas de diarreia. Além disso, acredita-se que as estimativas geradas neste estudo são conservadoras, já que grande parte dos casos de diarreia não exigem hospitalização e não são notificados nos serviços de saúde no país.

Apesar da complexidade e multiplicidade dos determinantes socioeconômicos na relação entre mudanças climáticas e saúde, é possível estabelecer limiares biológicos de conforto térmico e de adaptabilidade biológica ao calor extremo. Sherwood e Huber (2010) indicaram limites humanos para adaptabilidade ao aquecimento derivado das mudanças climáticas mensuráveis a partir da temperatura de bulbo-úmido T_w (*wet-bulb*). T_w estabelece o limite físico e termodinâmico do corpo humano para lidar com o calor excessivo. Esse limite biológico é de

35°C sem grandes oscilações entre o clima mundial. Até 2008, o máximo atingido no clima observado foi de 30°C, chegando aos 31°C em algumas regiões. Cerca de 58% da população mundial vive exposta a um T_w acima de 26°C. Para cada aumento de 1°C na temperatura média global, Sherwood e Huber (2010) preveem um aumento de 0,75°C na T_w nos trópicos. Por isso, um aumento de 4°C na temperatura média global levaria algumas das regiões mais quentes do mundo (como o Brasil) a atingir o limiar de inabitabilidade humana de $T_w = 35^\circ\text{C}$ durante parte ou a totalidade do ano.

5 Conclusão

Segundo o IPCC WG1 (2014), o Brasil é a região tropical do mundo onde se observaram durante o século XX os maiores e mais extensivos aumentos de temperatura, com áreas mais críticas nas regiões Norte e Centro-Oeste com elevados níveis de sensação térmica (SHERWOOD; HUBER, 2010). Segundo as projeções climáticas regionais aqui apresentadas, o Brasil continuará a aquecer acima da média global, sobretudo, com mais intensidade nas regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste. Essas projeções preveem aumentos acima de 4°C mesmo no cenário RCP 4.5 para a região Centro-Oeste e ultrapassando os 8°C no final do século no cenário RCP 8.5. Isso pode levar a um aumento de até 6°C nos valores atuais da temperatura, ultrapassando, assim, os limiares humanos de aclimatização ao calor excessivo e seriamente alterando as condições de vida e de organização social dessas regiões brasileiras, representando sérios riscos para a saúde pública e a economia do país.

O Brasil já é parte de um cenário denominado “tempo de emergência” (HAWKINS; SUTTON, 2012), com elevada temperatura para determinadas regiões. Logo, a discussão nacional e internacional deverá ter prioridade sobre a mitigação e a adaptação climática para os novos padrões climáticos excessivamente quentes se tornarem permanentes.

Referências

- ANDERSON, M. *et al.* Defining indoor heat thresholds for health in the UK. **Perspectives in public health**, Los Angeles, v. 133, n. 3, p. 158-164, 2013.
- AUBRECHT, C. *et al.* Long-term spatio-temporal social vulnerability variation considering health-related climate change parameters particularly affecting elderly. **Natural hazards**, Dordrecht, v. 68, n. 3, p. 1371-1384, 2013.
- AUBRECHT, C.; ÖZCEYLAN, D. Identification of heat risk patterns in the US National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability. **Environment international**, Oxford, v. 56, p. 65-77, 2013.
- BARCELLOS, C. *et al.* **Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil**. Brasília: Ministério da Saúde; Organização Pan Americana de Saúde, 2008. 40 p.
- BASU, R.; OSTRO, B. D. A. multicounty analysis identifying the populations vulnerable to mortality associated with high ambient temperature in California. **American Journal of Epidemiology**, Baltimore, v. 168, n. 6, p. 632-637, 2008.
- BÜHLER, H. F. *et al.* Análise espacial de indicadores integrados de saúde e ambiente para morbimortalidade por diarreia infantil no Brasil, 2010. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 9, p. 1921-1934, 2014.
- CAMPBELL-LENDRUM, D.; WOODRUFF, R. Climate Change: Quantifying the Health Impact at National and Local Levels. **Environmental Burden of Disease Series**, Geneva, World Health Organization, n. 14, 2007.
- CHECKLEY, W. *et al.* Effects of EI Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. **The Lancet**, New York, v. 355, n. 9202, p. 442-450, 2000.
- CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, United States, v. 3, n. 5, p. 438, 2014.
- CONFALONIERI, U. E. C. *et al.* Public health vulnerability to climate change in Brazil. **Climate Research**, London, v. 40, n. 2-3, p. 175-186, 2009.
- COSTA, D. *et al.* Municipal Temperature and Heatwave Predictions as a Tool for Integrated Socio-Environmental Impact Analysis in Brazil. **American Journal of Climate Change**, United States, 4, 385-396, 2015.
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, Austin, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

FOUILLET, A. *et al.* Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. **International Journal of Epidemiology**, London, v. 37, n. 2, p. 309-317, 2008.

FRUMKIN, H.; MCMICHAEL, A. J. Climate change and public health: thinking, communicating, acting. **American Journal of Preventive Medicine**, New York, v. 35, n. 5, p. 403-410, 2008.

HAJAT, S. *et al.* Impact of high temperatures on mortality: is there an added heat wave effect?. **Epidemiology**, Oxford, v. 17, n. 6, p. 632-638, 2006.

HAWKINS, E.; SUTTON, R. Time of emergence of climate signals. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados>>. Acesso em: 26 ago. 2015.

IGNOTTI, E. *et al.* Effects of the Climate Change on Hospital Admissions by Respiratory Diseases in the Subequatorial Amazon. **Epidemiology**, Oxford, v. 20, n. 6, p. S88, 2009.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

IPCC WG1. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. DOI: <10.1017/CBO9781107415324>.

IPCC WG2. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Field, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. 32p.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Research Triangle Park, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

KOLSTAD *et al.* Uncertainties Associated with Quantifying Climate Change Impacts on Human Health: A Case Study for Diarrhea. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, N. C., v. 119, n. 3, p. 299-305, 2011.

KOPPE, C. *et al.* **Heat-waves: risks and responses**. health and Global Environmental Change, WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, 2004. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/globalchange>>.

MA, W. *et al.* The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities. **Environment international**, Oxford, v. 75, p. 103-109, 2015.

MALIK, S. M.; AWAN, H.; KHAN, N. Mapping vulnerability to climate change and its repercussions on human health in Pakistan. **Globalization and Health**, Maidenhead, v. 8, n. 1, p. 31, 2012.

MCMICHAEL, A. J. Globalization, climate change, and human health. **The New England Journal of Medicine**, Massachusetts, v. 368, n. 14, p. 1335-1343, 2013.

MCMICHAEL, A. J. *et al.* Global Climate Change. In: EZZATI, M. *et al.* **Comparative Quantification of Health Risks, Global and Regional Burden of Disease Attributable to elected Major Risk Factors**. Geneva: World Health Organization, 2004. p. 1543-1650.

MEEHL, G. A.; TEBALDI, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. **Science**, Washington, v. 305, n. 5686, p. 994-997, 2004.

OLIVEIRA, A. F.; LEITE, I. C.; VALENTE, J. G. Carga global das doenças diarreicas atribuíveis ao sistema de abastecimento de água e saneamento em Minas Gerais, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 20, n. 4, p. 1027-1036, 2015.

PATZ, J. A. *et al.* The potential health impacts of climate variability and change for the United States: executive summary of the report of the health sector of the US National Assessment. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, N. C., v. 108, n. 4, p. 367, 2011.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.

PENG, R. D. *et al.* Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change. **Environ Health Perspect**, Research Triangle Park, N. C., v. 119, n. 5, p. 701-6, 2010.

PERERA, Frederica P. Children are likely to suffer most from our fossil fuel addiction. **Environ Health Perspect**, Research Triangle Park, N. C., v. 116, n. 8, p. 987-990, 2008.

PINHEIRO, S. L. L. A. *et al.* Health Vulnerability to Climate Change in Brazil: Mapping composite indexes based on principal component analysis. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, Brasil, 2016a. (Submitted).

PINHEIRO, S. L. L. A. *et al.* Heat waves and health: vulnerabilities, risks and impacts on mortality considering climate change scenarios in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, Switzerland, 2016b. (Submitted).

PNUD – PROGRAMAS DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas de desenvolvimento humano no Brasil**. Ano 2013. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2013.aspx?indiceAccordion=1&li=li_Atlas2013>. Acesso em: 20 ago. 2015.

REID, C. E. *et al.* Mapping Community determinants of heat vulnerability. **Environ Health Perspect**, Research Triangle Park, N. C., v. 117, n. 11, p. 1730-6, 2009.

SAMSON, J. *et al.* Geographic disparities and moral hazards in the predicted impacts of climate change on human populations. **Global Ecology and Biogeography**, Oxford, v. 20, n. 4, p. 532-544, 2011.

SAUERBORN, R.; EBI, K. Climate change and natural disasters—integrating science and practice to protect health. **Global Health Action**, Höggeby, v. 5, 2012.

SHEFFIELD, P. E.; LANDRIGAN, P. J. Global Climate Change and Children as Health: Threats and Strategies for Prevention. **Environmental health perspectives**, Research Triangle Park, N. C., v. 119, n. 3, p. 291-298, 2010.

SHERWOOD, S. C.; HUBER, M. An adaptability limit to climate change due to heat stress. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 21, p. 9552-9555, 2010.

SMITH, K. R. Comparative environmental health assessments. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, v. 1140, n. 1, p. 31-39, 2008.

TEAM, R. D. C. R. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2010. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 1 mar. 2014.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Geneva: WHO, 2008. Disponível em: <http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/2004_report_update>. Acesso em: 20 ago. 2015.

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível devido ao apoio do dra. Chou Sin Chan juntamente com sua equipe do CPTEC/INPE na recente resolução do modelo Eta. Agradecemos também à equipe de coordenação da Terceira Comunicação Nacional, particularmente Breno Simonini Teixeira e Dr. José Marengo, bem como o Programa para o Desenvolvimento das Nações Unidas (Pnud), Rede CLIMA (Finep 01.13.0353.00), e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação para o desenvolvimento do presente estudo. Aos colegas Dennys Mourão, Carlos Alexandre Pereira, Andreia Sobral e Jefferson Pereira, na ENSP/Fiocruz, e Guilherms Martins, no CCST/INPE, que voluntariamente contribuíram com soluções técnicas, revisão da bibliografia e esclarecimento sobre as opções de visualização para GrADS dados climáticos, bem como para a interpolação espacial e ArcGIS Scripting.

Índice de vulnerabilidade às mudanças do clima nos municípios do estado do Rio de Janeiro

Diana Pinheiro Marinho

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Giovannini Luigi

Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Heliana Vilela de Oliveira Silva

Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Frederico de Oliveira Tosta

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Felipe de Carvalho Vommaro Marincola

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Ulisses Eugênio Cavalcanti Confalonieri

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Martha Macedo de Lima Barata

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Resumo

Este capítulo apresenta a vulnerabilidade da população dos municípios do estado do Rio de Janeiro em face dos cenários futuros de mudanças do clima, com base em indicadores parciais de saúde, socioeconômicos e ambientais, pelo fato de que muitos dos efeitos adversos das mudanças climáticas na saúde e no bem-estar da população decorrem, de forma indireta, pela mediação de processos ambientais e sociais. Analisados de forma integrada, tais indicadores contribuem para apoiar o desenvolvimento e a avaliação da efetividade na tomada de decisões, na definição de políticas públicas de adaptação e elaboração de programas educativos de sensibilização, no sentido de aumentar a resiliência da população. Trata-se da atualização do Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM), com base na análise das projeções de temperatura e precipitação do modelo regional Eta-MIROC5, do CPTEC/INPE, para o cenário de emissão RCP 8.5 e período de integração 2011–2100.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Mudanças climáticas. Estado do Rio de Janeiro. Índice composto. Doenças.

1 Introdução

O Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM) dos municípios do estado do Rio de Janeiro se refere à atualização do Mapa de Vulnerabilidade da População dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro (MVP/ RJ) (BARATA *et al.*, 2013).¹

A vulnerabilidade socioambiental aos impactos do clima é um processo multidimensional, de modo que sua representação por índices específicos, de forma sintética, deve contemplar a inclusão de informações de diferentes setores, como o socioeconômico, o ambiental e a saúde humana.

Nesse contexto, foi proposto o IVM, aplicação inédita no Brasil quando se considera o nível local como referência em estudos climáticos. Tal índice foi desenhado objetivando apoiar decisões setoriais sobre estratégias de adaptação aos efeitos projetados das mudanças climáticas, bem como contribuir para a avaliação e subsídio à formulação de políticas públicas prioritárias para aumentar a resiliência da população em face dos novos cenários climáticos.

As variáveis e indicadores utilizados capturam as três características básicas da vulnerabilidade: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (ou de resposta), as quais se agregou o “fator de perigo” (*hazard*), representado pelas anomalias climáticas de temperatura e precipitação, projetadas para as próximas décadas. O fator “exposição” está refletido nos indicadores ambientais, e a sensibilidade, nos componentes de cunho epidemiológico, ou seja, o conjunto de agravos à saúde sensíveis à variação do clima. A capacidade adaptativa está vinculada aos indicadores sociais. Portanto, o IVM “classifica” os municípios em relação ao grau de “atenção” a ser dispensado –frente aos novos cenários climáticos.

Vale ressaltar que foi adotado o conceito de vulnerabilidade amplamente difundido no AR4 do IPCC (2007), que é o resultado da interação dos elementos exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. No Quinto Relatório de

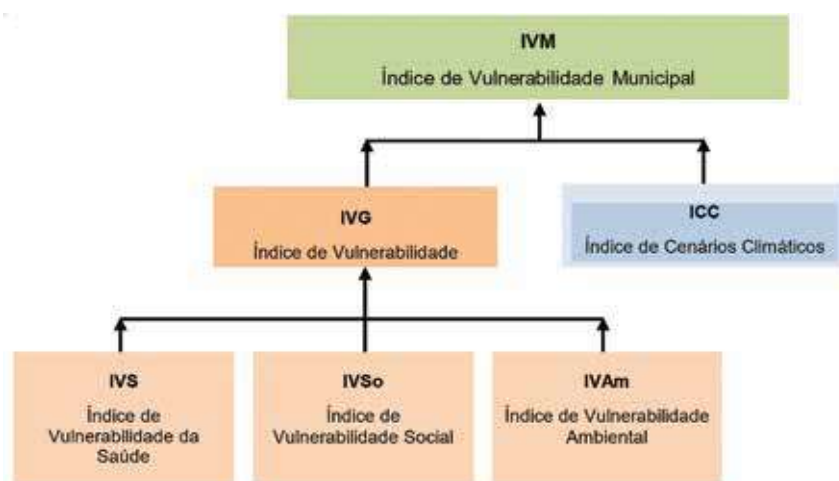
¹ O MVP/ RJ-2013, que contou com o apoio da Vice-Presidência de Ambiente, Atenção e Promoção da Saúde do Instituto Oswaldo Cruz (IOC/Fiocruz), refere-se à atualização do estudo intitulado Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climática nas Áreas Social, Saúde e Ambiental (BARATA *et al.*, 2011). Essa versão inicial foi solicitada à equipe coordenadora deste projeto pela Secretaria de Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (SEA/ RJ).

Avaliação (AR5) (IPCC, 2013), entretanto, a vulnerabilidade resulta da interação entre sensibilidade e capacidade adaptativa, sendo que a exposição é tratada do ponto de vista do conceito de risco.

Segundo a legislação brasileira recente sobre mudanças climáticas, a vulnerabilidade é definida como “grau de suscetibilidade e incapacidade de um sistema, em função de sua sensibilidade, capacidade de adaptação e do caráter, magnitude e taxa de mudança e variação de clima a que está exposto, de lidar com os efeitos adversos da mudança do clima, entre os quais a variabilidade climática e os eventos extremos” (Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 – Política Nacional sobre Mudança do Clima).

O IVM é, portanto, um índice sintético adimensional que integra e resume diferentes dimensões de um tema, proporcionando a redução da complexidade e da diversidade da realidade e, simultaneamente, a comparação entre as unidades de análise. Assim, o IVM é uma representação simplificada, que resume aspectos multidimensionais em um índice adimensional, com base em um modelo conceitual específico. O modelo conceitual subjacente a esta avaliação de vulnerabilidade está representado na figura 1.

Figura 1 – Modelo conceitual do projeto de vulnerabilidade para os municípios do estado do Rio de Janeiro



2 Concepção metodológica e região de estudo

Adotou-se a metodologia utilizada na execução do mapeamento da vulnerabilidade socioambiental e de saúde do Brasil, em nível nacional e regional, aos possíveis efeitos da mudança climática global na saúde (CONFALONIERI *et al.*, 2005, 2008, 2009). Ela inclui os componentes de ambiente que são impactados pelo clima e têm influência na qualidade de vida da população municipal. Em relação ao trabalho desenvolvido por Barata *et al.* (2013), este estudo atualiza os indicadores incluindo os novos cenários regionais gerados pelo CCST/INPE. Introduzem-se também alterações na forma de cálculo do Índice de Vulnerabilidade Ambiental.

O IVM sintetiza, em uma única medida, aspectos sociais, ambientais e de saúde, e foi obtido com base na agregação do Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG) ao Índice de Cenário Climático (ICC), o qual expressa a mudança do clima futuro, com base nos cenários climáticos regionalizados derivados do modelo EtaMIROC 5.

O IVG municipal possui métricas próprias, que são o Índice de Vulnerabilidade da Saúde (IVS), o Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo) e o Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAm), e reflete a condição dos sistemas municipais sob risco de serem afetados pelo clima futuro.

O ICC sintetiza as anomalias climáticas de temperatura do ar e precipitação pluviométrica, tendo como referência o período de integração futuro 2011–2100, do modelo regional Eta-MIROC5, cenário de emissão RCP 8.5.

Diante da necessidade de relativizar os resultados, indicadores e índices foram padronizados, tornando-se adimensionais. A padronização distribui os valores entre 0,00 e 1,00: quanto mais próximo de 1,00, maior a vulnerabilidade e, quanto mais próximo de 0,00, menor a vulnerabilidade. Entretanto, 0,00 não representa, necessariamente, ausência de vulnerabilidade, mas tão somente o menor valor relativo do índice dentre todos os municípios, ao passo que, da mesma forma, 1,00 não representa vulnerabilidade extrema, mas apenas vulnerabilidade relativa maior.

Os componentes do IVM e do ICC, bem como as respectivas fontes de dados, constam no tabela 1.

Tabela 1 – Composição do Índice de Vulnerabilidade Municipal do estado do Rio de Janeiro

Índice de Vulnerabilidade Geral	<p>Índice de Vulnerabilidade da Saúde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Morbidades: <ul style="list-style-type: none"> • dengue; • leptospirose; • leishmaniose tegumentar americana • Mortalidade por diarreia em menores de cinco anos 	<p>Secretaria de Estado de Saúde do Rio de Janeiro (SES/RJ)</p> <p>Período: 1997–2012</p>
	<p>Índice de Vulnerabilidade Social</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estrutura Familiar • Acesso ao Conhecimento • Acesso ao Trabalho • Disponibilidade de Recursos (renda) • Desenvolvimento Infanto-Juvenil • Condições Habitacionais 	<p>IBGE, 2010 (Censo Demográfico)</p>
	<p>Índice de Vulnerabilidade Ambiental</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura de vegetação nativa e em regeneração • Conservação da biodiversidade • Ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos com ou sem vítimas fatais • Área costeira 	<p>Projeto Radambrasil, 1983</p> <p>ZEE/RJ, 2007</p> <p>Rocha <i>et al.</i>, 2009</p> <p>SDC/RJ, 2011</p> <p>IBGE, 2010</p>
Índice de Cenários Climáticos	<p>Fator de Perigo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anomalias climáticas projetadas (precipitação e temperatura) 	<p>CCST/INPE, 2014</p>

Fonte: elaboração própria

A aplicação da proposta metodológica teve como referência o estado do Rio de Janeiro (ERJ), atualmente formado por 92 municípios, organizados em oito regiões de governo (figura 2).

Figura 2 – Mapa dos municípios e regiões de governo do ERJ (IBGE, 2014)



3 Índice de Vulnerabilidade da Saúde (IVS)

Para compor o IVS, foram selecionadas quatro doenças presentes de forma endêmico-epidêmica no ERJ: dengue, leptospirose, leishmaniose tegumentar americana (LTA), assim como diarreia em menores de cinco anos, que apresentam formas de transmissão e persistência relacionadas com o clima.

Os efeitos da mudança do clima sobre a ocorrência das doenças infecciosas podem ser considerados como indiretos, uma vez que os respectivos mecanismos de desenvolvimento são mediados por fatores de ordem ambiental e social. A ampliação da variação das alterações nos padrões de temperatura e precipitação, bem como na intensidade e frequência de eventos extremos em cenários de clima, contribuíram para a expansão de doenças transmitidas por vetores sensíveis ao clima e por veiculação hídrica (OPAS, 2009). Ressalte-se que a variação do clima é apenas um dos fatores que podem contribuir para a expansão de tais doenças (BARATA *et al.*, 2011).

Segundo Aström *et al.* (2011), o efeito do clima sobre a ocorrência do dengue ainda não é claro. Sugere-se que a distribuição geográfica dos vetores seja limitada pelas condições do clima, apesar de haver outros fatores, como os socioeconômicos, que favorecem fortemente a ocorrência do agravo. Chowell *et al.* (2011) relatam que condições climáticas não afetam apenas o desenvolvimento, maturação e sobrevivência do vetor do dengue, mas, também, o seu papel na transmissão da doença, ao interferir no período de incubação extrínseco, ou seja, no tempo que decorre entre a contaminação do mosquito e a infecção de pessoas.

Levett (2001) afirma que mudanças no clima e no comportamento humano são capazes de alterar a epidemiologia da leptospirose e que os casos verificados após vários episódios de enchentes e inundações, relacionados ao El Niño, fizeram ressurgir a atenção do mundo para com essa doença. A explicação corrente sobre o efeito de enchentes e inundações na ocorrência de casos de leptospirose está relacionada à facilitação da dispersão de ratos, principais hospedeiros não humanos, cuja urina é contaminada por bactérias patogênicas (ÁVILA-PIRES, 2006).

Com relação a LTA, o número de espécies e a densidade de vetores, bem como o ciclo de vida da leishmânia, variam de acordo com as condições climá-

ticas. Sendo assim, as mudanças no clima seriam um dos fatores que facilitariam a propagação do vetor (CRUZ, 2010).

Acredita-se que a ausência de água potável e o impacto negativo na produção de alimentos contribuiriam para a baixa resistência do sistema imunológico. Esse quadro, associado a condições sanitárias inadequadas, contribui para o aumento de ocorrência das doenças diarreicas (NOBRE *et al.*, 2010), que pode levar a óbito, sobretudo, crianças menores de cinco anos.

O IVS foi construído seguindo quatro etapas, a saber: avaliação de parâmetros de morbidade (dengue, leptospirose e LTA) e mortalidade (diarreia), atribuição de pesos, cálculo do IVSe cálculo do IVSp.

Para cada município e doença selecionada (com exceção da diarreia), foram avaliados os parâmetros: número de casos, taxa de incidência e tendência. Os parâmetros avaliados para a mortalidade por diarreia foram: número de óbitos, taxa de mortalidade e tendência.

A análise de tendência foi realizada em três fases: (i) ajuste do gráfico de dispersão;(ii) ajuste de um modelo polinomial de segunda ordem; e (iii) ajuste de um modelo de regressão linear.

Valores positivos da tendência indicam que a morbidade tem atingido um número maior de habitantes a cada ano, a taxas de incidências mais altas (tendência crescente), ao passo que valores negativos indicam que a taxa de incidência está reduzindo (tendência decrescente). Por fim, valores iguais a zero ou quando a regressão linear é não significativa indicam que a série é inconclusiva com relação à tendência. Assumiu-se que, nesses casos, a incidência está estável, atribuindo-se valor zero.

Na etapa seguinte, foi calculada a distribuição do número de casos por município, em relação ao total de casos no estado, e definidos pesos, de forma a atribuir maior valor aos municípios cuja vulnerabilidade da saúde é maior. Portanto, quanto maior a proporção de casos agrupados no município, maior o peso. A mesma lógica foi utilizada na atribuição de pesos aos parâmetros de incidência e tendência.

Após a atribuição dos pesos, foi calculado o IVS, representado pela soma dos pesos, para definir o peso final, por município. Como última etapa, os indicadores foram padronizados, gerando o IVSp (figura 3).

Observa-se que os mais altos índices para as doenças consideradas estão concentrados na região metropolitana, onde foi registrado o maior valor dos índices padronizados do dengue, leptospirose e diarreia em crianças menores de cinco anos. A região Noroeste Fluminense exibe, também, valor elevado para leptospirose.

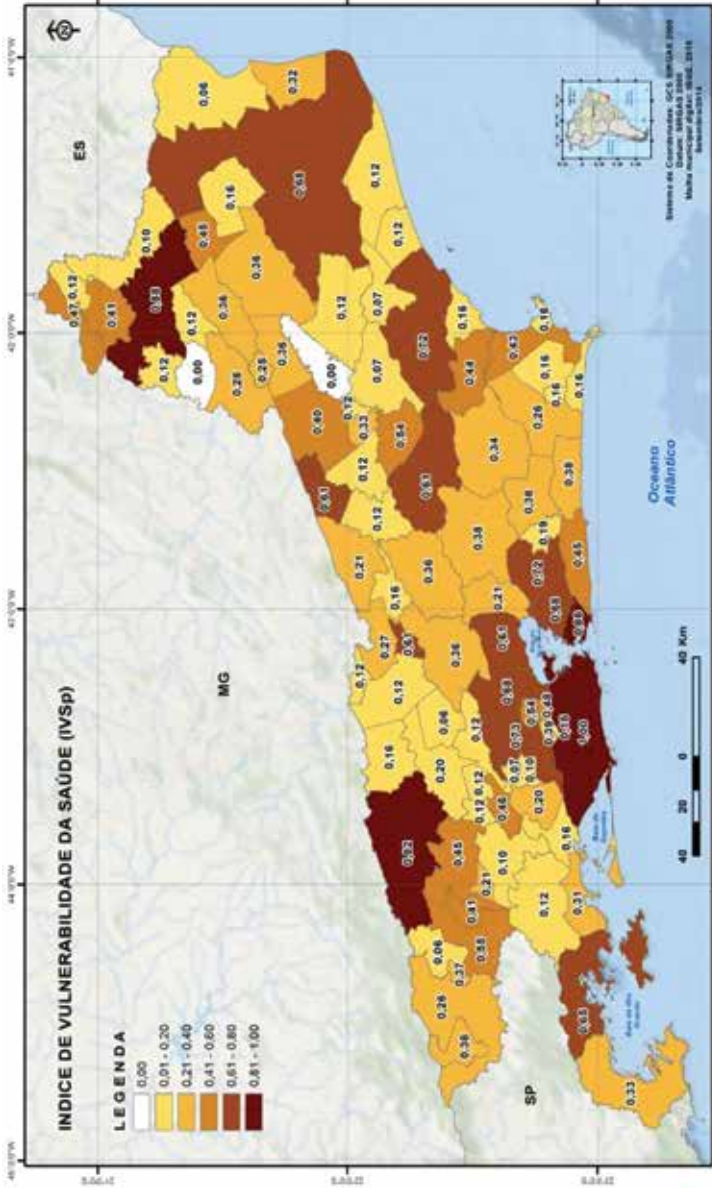
Analisando-se os mapas da dengue por municípios, Conceição de Macabu obteve o menor valor do índice padronizado (0,00), enquanto São Gonçalo apresentou o maior (1,00). Com relação à leptospirose, Trajano de Moraes e Japeri apresentaram os menores valores (0,00), ao passo que Porciúncula, o maior.

Para a LTA, seis municípios obtiveram valor padronizado mínimo: Guapimirim, Nilópolis, Queimados, Seropédica, Tanguá e Vassouras. O valor padronizado máximo foi registrado em Magé, Nova Friburgo e Paracambi.

Para a diarreia, Miracema e São Sebastião do Alto obtiveram valor 0,00, ao passo que Barra do Pirai e Itaperuna apresentaram 1,00.

Considerando os resultados do IVSp, o município do Rio de Janeiro obteve o valor máximo ponderado (1,00). Apesar de não ter se destacado nos índices isolados, em todos os agravos apresentou valores acima de 0,50, o que contribuiu para a formação do valor extremo. Miracema e São Sebastião do Alto, por seu turno, apresentaram o valor mínimo ponderado (0,00). Considerando os indicadores isoladamente, o maior valor obtido foi 0,14, para LTA, para ambos os municípios.

Figura 3 – Mapa dos municípios e regiões de governo do ERJ



4 Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo)

Vulnerabilidade social se refere ao conjunto de aspectos que transcende a escala do indivíduo, abrangendo elementos coletivos, contextuais, que são mais suscetíveis à mudança do clima. Considera-se que os grupos sociais mais vulneráveis serão os menos resilientes frente aos potenciais impactos das mudanças do clima, tais como excesso de chuvas, enchentes, ressacas e agravos na saúde (BARATA *et al.*, 2011).

O IVSo é composto por seis dimensões, 22 componentes e 50 indicadores (tabela 2), conforme Barata *et al.* (2013).

Com os microdados disponibilizados pelo IBGE (2010), e tendo como unidade analítica o domicílio, foi possível realizar o cálculo das variáveis, resultando em saídas com os valores atualizados para cada indicador replicado. Na sequência, os valores referentes aos componentes e à dimensão foram calculados em três etapas: avaliação dos domicílios, segundo as dimensões, componentes e indicadores, cálculo do IVSo e cálculo do IVSop.

Tabela 2 – Dimensões, componentes e indicadores do IVSo

Dimensão	Componente	Indicador
Estrutura domiciliar	Atenção e cuidado com crianças, adolescentes e jovens	Ausência de menores de um ano
		Ausência de criança
		Ausência de criança ou adolescente
		Ausência de criança, adolescente ou jovem
	Presença do Cônjuge	Responsável pela família é do sexo masculino
		Responsável pela família é do sexo masculino e vive em presença do cônjuge
	Ausência de desvantagem física	Ausência de pessoa com incapacidade visual na família
		Ausência de pessoa com incapacidade auditiva na família
		Ausência de pessoa com incapacidade para deambular na família
	Ausência de desvantagem social	Ausência de pessoa com problemas mentais permanentes na família
		Ausência de não brancos na família
		Responsável pela família reside na mesma cidade desde 1995
Ausência de adulto com idade igual ou maior do que 65 anos		

(continua)

Dimensão	Componente	Indicador
Acesso ao conhecimento	Analfabetismo	Responsável pela família sabe ler e escrever
		Responsável pela família tem mais do que quatro anos de estudo
		Ausência de adulto (pessoa com 25 anos ou mais) analfabeto
	Escolaridade	Responsável pela família tem pelo menos ensino fundamental completo ou 1º grau
		Responsável pela família tem pelo menos ensino médio ou 2º grau
		Responsável pela família com alguma educação superior
Acesso ao trabalho	Disponibilidade de trabalho	Responsável pela família trabalha com remuneração
		Adultos (25 anos ou mais) trabalham com remuneração
	Qualidade do posto de trabalho	Responsável pela família é contribuinte de previdência oficial
		Responsável pela família não trabalha mais do que 10 horas/dia – considerou-se semana de cinco dias de trabalho
	Remuneração	Responsável pela família com total de rendimentos do trabalho principal superior a um salário mínimo
		Responsável pela família com total de rendimentos do trabalho principal superior a dois salários mínimos
Disponibilidade de recursos (renda)	Pobreza	Responsável pela família com total de rendimentos do trabalho principal superior a três salários mínimos
		Renda familiar <i>per capita</i> superior à linha de pobreza regionalizada
Desenvolvimento infantil-juvenil	Proteção contra o trabalho precoce	Ausência de crianças entre 10 e 11 anos trabalhando
		Ausência de crianças e adolescentes entre 10 e 17 anos trabalhando
	Acesso à escola	Ausência de criança entre três a seis anos fora da escola
		Ausência de criança/adolescente entre sete a 14 anos fora da escola
	Progresso escolar	Ausência de criança/adolescente entre sete e 17 anos fora da escola
		Criança/adolescente entre 10 e 14 anos tem mais do que quatro anos de estudo
Mortalidade de filhos	Adolescente entre 15 e 17 anos tem mais do que quatro anos de estudo	
	Nenhuma mulher teve filho nascido morto	
		Total de filhos nascidos vivos que estavam vivos é igual ao total de filhos tidos

(continua)

Dimensão	Componente	Indicador	
Disponibilidade de recursos (renda)	Pobreza	Renda familiar <i>per capita</i> superior à linha de pobreza regionalizada	
	Condições habitacionais	Propriedade	Domicílio próprio
densidade		Até três moradores por dormitório	
Abrigabilidade		Existência de banheiro	
Acesso a serviço de abastecimento d'água		Abastecimento adequado (rede geral e pelo menos um cômodo com canalização interna)	
Acesso a serviço de esgotamento sanitário		Esgotamento adequado (rede geral ou fossa séptica)	
Acesso a serviço de coleta de lixo		Destino do lixo adequado (lixo coletado por serviço de limpeza)	
Acesso a serviço de energia elétrica		Existência de iluminação elétrica	
Acesso a bens duráveis		Existência de rádio	
		Existência de rádio e televisão	
		Existência de rádio, televisão e geladeira ou <i>freezer</i>	
	Existência de rádio, televisão, geladeira ou <i>freezer</i> e máquina de lavar roupa		
	Existência de rádio, televisão, geladeira ou <i>freezer</i> , máquina de lavar roupa e linha telefônica instalada		
	Existência de rádio, televisão, geladeira ou <i>freezer</i> , máquina de lavar roupa, linha telefônica instalada e microcomputador		

Fonte: adaptado de Carvalho *et al.* (2003) e Haselbalg (2003)

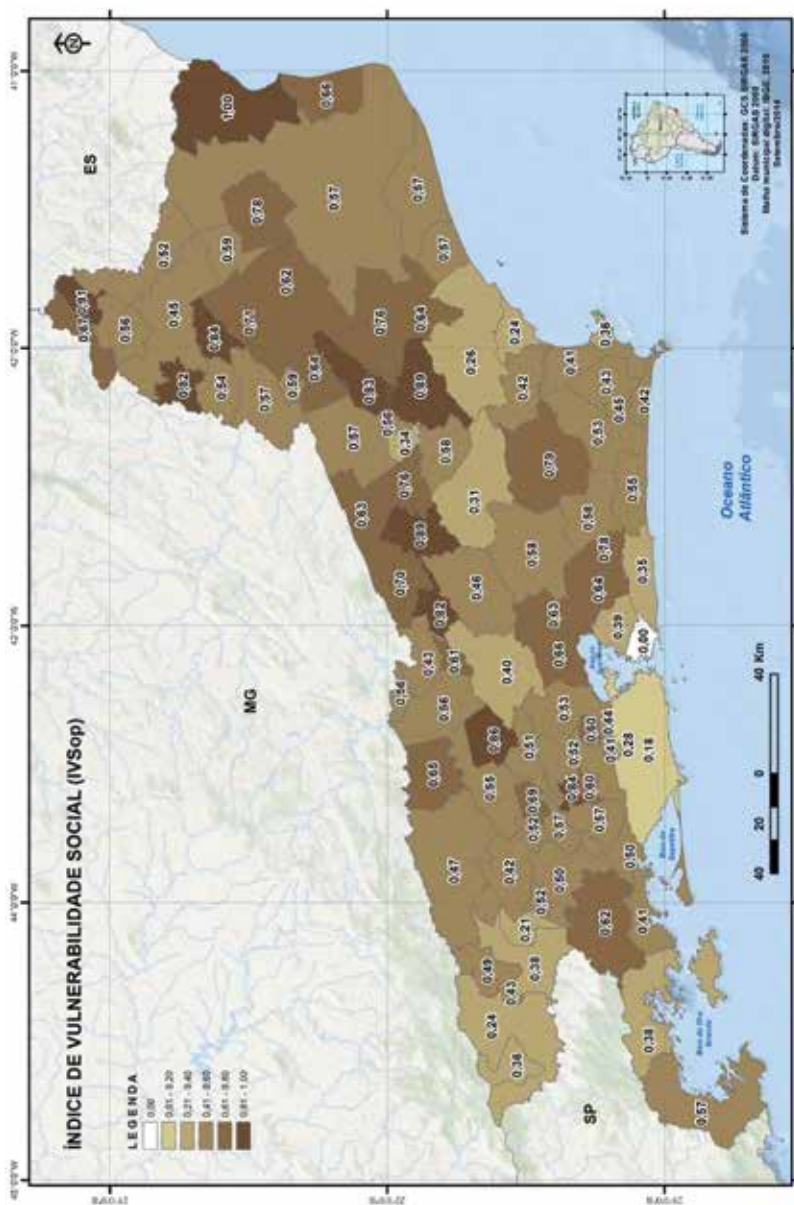
Para a análise dos domicílios, foram consideradas as seis dimensões, bem como os grupos identificados como os mais vulneráveis, segundo Haselbalg (2003), Monteiro (2003), Silva e Haselbalg (1992) e Evans (1994): famílias cujas mulheres são chefes, famílias com presença de crianças e(ou) idosos e chefes de famílias não brancos.

O IVSo é composto, a partir da média aritmética simples, por três ordens de grandeza que apresentam valores distintos entre si: dimensão, componentes

e indicador. Para manter a homogeneidade, os índices de cada município foram padronizados (IVSop), variando de 0,00 a 1,00.

Os municípios com maiores valores de IVSop, ou os mais vulneráveis, foram São Francisco de Itabapoana (1,00), Varre-Sai (0,91), Trajano de Moraes e Sumidouro (0,89), ao passo que os menos vulneráveis foram Niterói (0,00) e Rio de Janeiro (0,18) (figura 4).

Figura 4 – Índice de Vulnerabilidade Social padronizado



5 Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAm)

O IVAm contempla características de sistemas biofísicos vulneráveis aos efeitos do clima, bem como série histórica de eventos meteorológicos extremos. O IVAm é composto pelos seguintes indicadores:

- a) Indicador de Cobertura Vegetal (ICV);
- b) Indicador de Conservação da Biodiversidade (ICB);
- c) Indicador de Linha de Costa (ILC);
- d) Indicador de Eventos Hidrometeorológicos Extremos com vítimas fatais (IEE).

A tabela 3 apresenta as variáveis e respectivas classes e pesos dos indicadores do IVAm.

Tabela 3 – Distribuição de pesos IVAm

Indicador	Variável	Classe	Peso
Cobertura Vegetal	% área cobertura vegetal	0	0
		0,1 a 25,0	1
		25,1 a 50,0	2
		50,1 a 75,0	3
		> 75,0	4
	Tipo de vegetação	Floresta estacional secundária	1
		Floresta ombrófila secundária	2
		Floresta estacional primária	3
		Floresta ombrófila primária	4

(continua)

Indicador	Variável	Classe	Peso
Conservação da Biodiversidade	Valor de conservação	0	0
		1 a 27	1
		28 a 84	2
		85 a 150	3
		151 a 356	4
Eventos Extremos	% de eventos extremos no município em relação ao ERJ	0	0
		0,01 a 0,50	1
		0,51 a 1,00	2
		1,01 a 2,00	3
		> 2,00	4
	% de eventos extremos com vítimas fatais no município	0	0
		0,1 a 25,0	1
		25,1 a 50,0	2
		50,1 a 75,0	3
		> 75,0	4
Linha de Costa	Localização	Não costeiro	0
		Costeiro	1
	Extensão da linha de costa (km)	0	0
		< 25	1
		25 a 50	2
		> 50	3
	Área de manguezal (km ²)/ extensão linha de costa (km)	> 2,00	1
		1,01 a 2,00	2
		0,01 a 1,00	3
		0	4

Fonte: elaboração própria

5.1 Indicador de Cobertura Vegetal (ICV)

A Mata Atlântica possui relevância estratégica para a conservação da biodiversidade em nível global, por se tratar de um bioma rico em espécies da flora e fauna, muitas das quais lhes são exclusivas (endêmicas) (MITTERMEIER *et al.*, 2000). Para a flora, a diversidade de espécies associada às florestas úmidas e secas é notavelmente distinta, conforme ressalta Gentry (1988).

A flora das florestas secas da Mata Atlântica, composta por cerca de 350 gêneros e 82 famílias, é menos rica do que a das florestas úmidas, que somam 219 famílias. Lopes (2007) também concluiu que as florestas secas apresentam um grupo menor de espécies e famílias de elevada importância ecológica, comparativamente às florestas úmidas. Para esse autor, as florestas secas seriam um subconjunto das florestas úmidas.

Na construção do ICV, foram consideradas as classes de vegetação floresta ombrófila e floresta estacional (primária e secundária), tendo sido atribuído peso maior aos municípios com maior percentual de floresta ombrófila primária remanescente. Portanto, o ICV é a soma dos pesos das proporções de área coberta por classe de vegetação, ponderada pelo peso atribuído a cada uma.

5.2 Indicador de Conservação da Biodiversidade (ICB)

O ICB permite identificar os municípios com elevada ocorrência conjunta de espécies de vertebrados terrestres ameaçados e(ou) endêmicos. Os municípios com elevado ICB apresentam menor vulnerabilidade e denotam uma melhor condição de conservação da biodiversidade, como verificado nos municípios onde há grande disponibilidade de áreas naturais preservadas.

O ICB foi integralmente baseado no Índice de Ameaça e Endemismo, elaborado por Rocha *et al.* (2009), que leva em consideração o grau de ameaça e endemismo das espécies da fauna de vertebrados terrestres do ERJ.

5.3 Indicador de Linha de Costa (ILC)

O ILC considerou informações relativas a parâmetros biofísicos dos 26 municípios litorâneos do ERJ. A concepção metodológica considerou a localização, extensão da linha de costa e presença de manguezais, assim considerados:

- a) localização do município – com ou sem linha de costa;
- b) extensão da linha de costa (km);
- c) superfície remanescente de manguezais (km²) – relação entre a área de manguezal (km²) e a extensão linha de costa (km).

Dessa forma, quanto maior a extensão da linha da costa, mais exposto está o município a eventos atmosféricos e oceânicos extremos. Por outro lado, a maior extensão de manguezais protege a linha costeira contra os mesmo fenômenos (KATHIRESAN; RAJENDRAN, 2005).

5.4 Indicador de Eventos Hidrometeorológicos Extremos com Vítimas Fatais (IEE)

A metodologia utilizada para a concepção do IEE levou em consideração a proporção de eventos extremos para cada município e de eventos extremos com vítimas fatais.

Foram utilizadas duas séries de dados, a saber:

- a) número de eventos hidrometeorológicos extremos (n = 293);
- b) vítimas fatais decorrente dos eventos (n = 1.443).

Os valores do IEEp por município são apresentados na figura 5.

5.5 Padronização do Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAm)

No processo de construção de cada indicador do IVAm, foram selecionadas variáveis informativas sobre a vulnerabilidade dos municípios, as quais foram categorizadas em níveis de menor ou maior vulnerabilidade. Cada categoria recebeu um peso específico, sendo que a soma dos pesos corresponde ao valor final de cada um dos indicadores. Cada indicador possui escala distinta e, portanto, para efeito de comparação, foram padronizados para a escala 0,00–1,00.

O IVAm foi calculado pela média aritmética simples dos quatro indicadores padronizados, a qual, também, foi padronizada. O IVAm por município consta na figura 6.

Figura 5 – Índice de Eventos Hidrometeorológicos Extremos padronizado

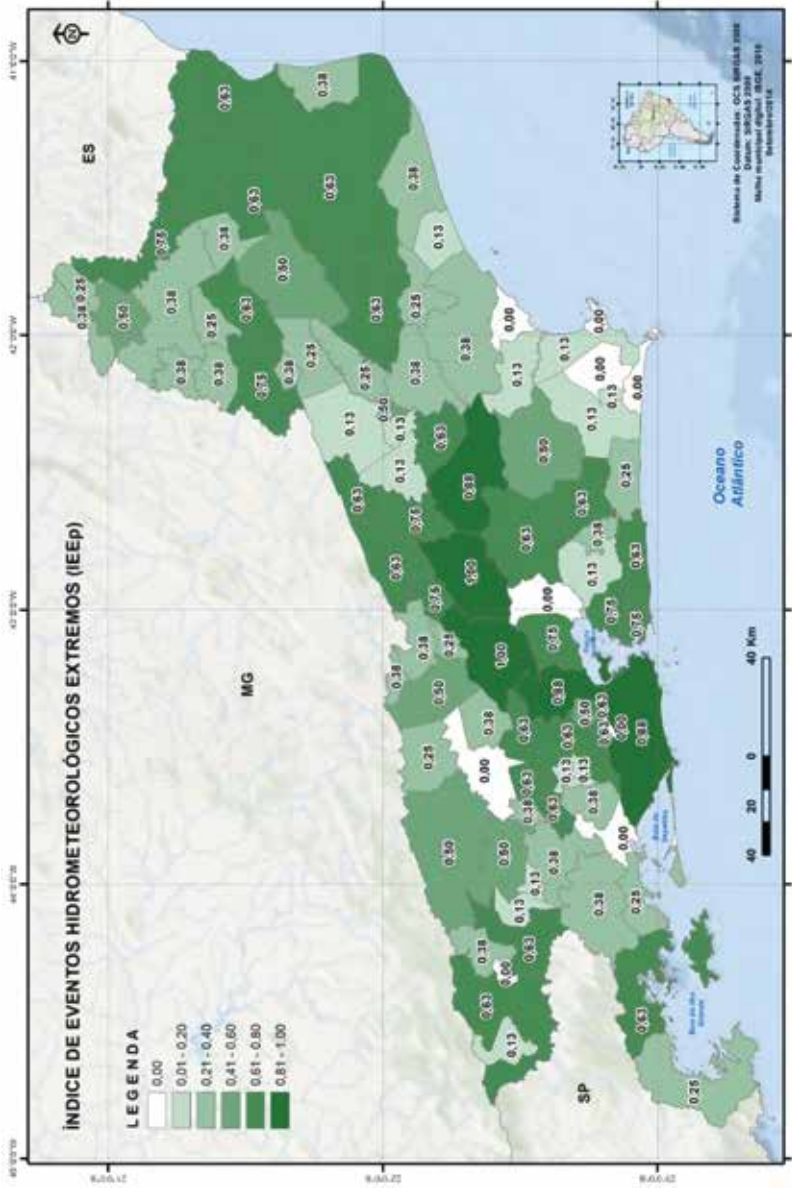
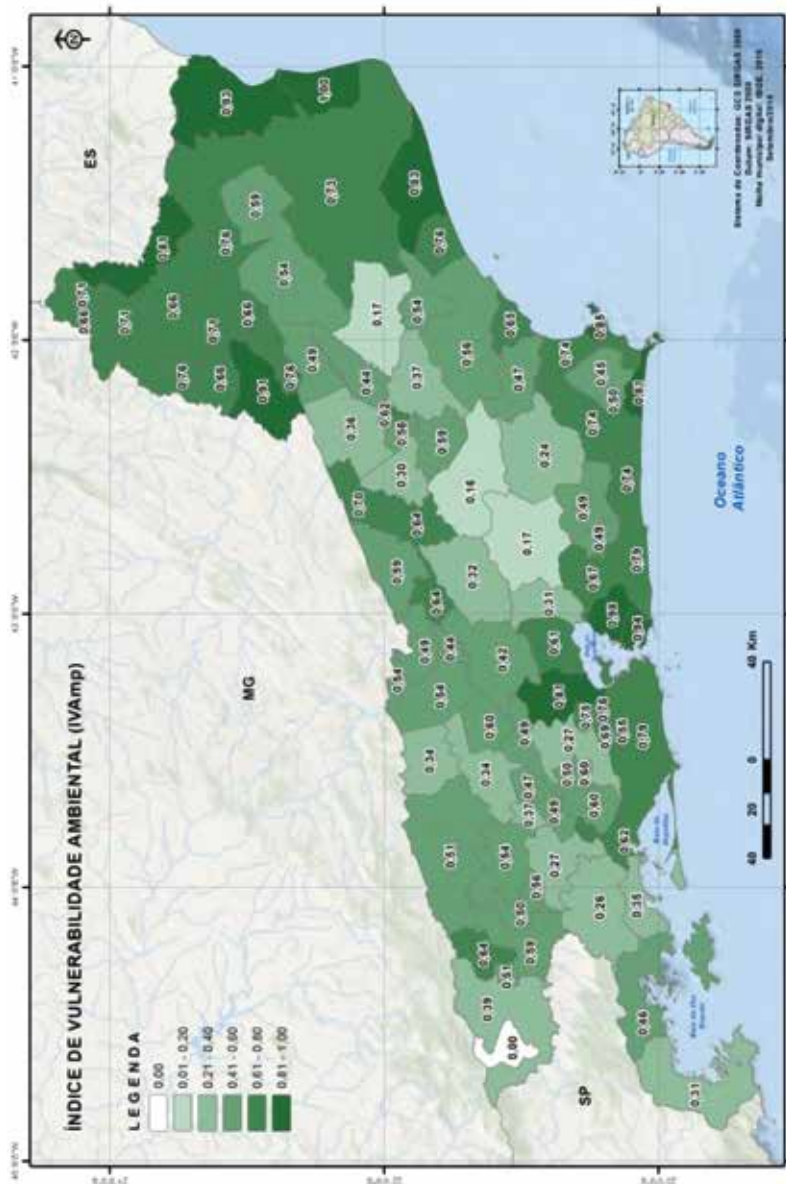


Figura 6 – Índice de Vulnerabilidade Ambiental padronizado



6 Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG)

O Índice de Vulnerabilidade Geral (IVG) é um índice composto formado por diferentes variáveis, que associa a cada município uma medida comparativa (valor numérico), com respeito à vulnerabilidade frente às mudanças climáticas.

O IVG, o primeiro componente do IVM, é formado pelos seguintes índices:

- a) Índice de Vulnerabilidade da Saúde padronizado (IVSp);
- b) Índice de Vulnerabilidade Social padronizado (IVSop);
- c) Índice de Vulnerabilidade Ambiental padronizado (IVAm).

O IVG foi calculado em duas etapas: (i) cálculo da média simples do IVSp, IVSop e IVAm; e (ii) padronização do IVGp.

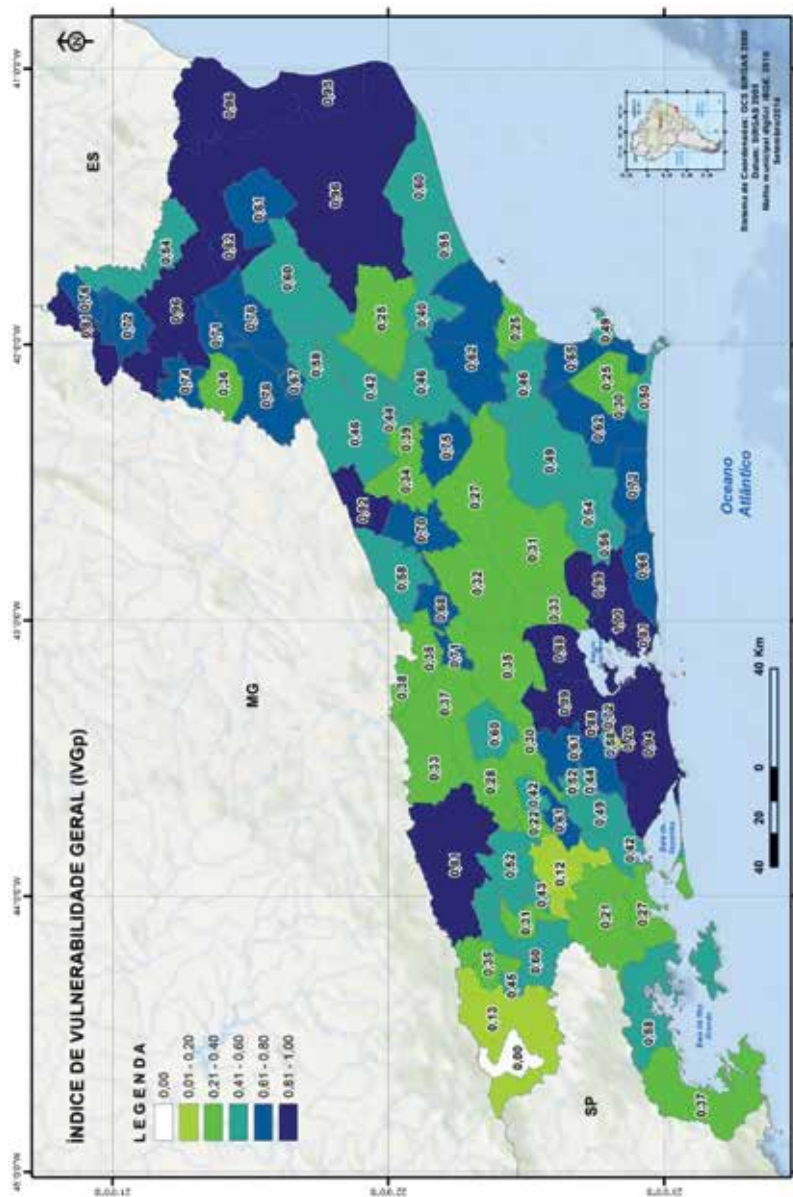
O IVGp para os municípios do ERJ é apresentado na figura 7.

São Gonçalo aparece como o mais vulnerável dentre os 92 municípios do ERJ (= 1,00), com elevados IVAm (0,98) e IVSp (0,68). De fato, boa parte dos municípios da região Metropolitana exibem IVGp altos, a exemplo de Itaboraí (0,99), Duque de Caxias (0,99) e Rio de Janeiro (0,94), que são puxados pelos relativamente altos IVAm e IVSp. O Noroeste e o Norte Fluminense concentraram elevados IVGp, estando à frente de Campos dos Goytacazes (0,96), São Francisco de Itabapoana (0,96), São João da Barra (0,95) e Itaperuna (0,96). Nessas regiões, foi observado baixo desenvolvimento social, captado pelos baixos valores de IVSop e IVAm (figura 8).

Itatiaia, no outro extremo da escala, apresentou o menor IVGp, o que se deve, em especial, ao menor IVAm do ERJ (0,00) (figura 8). Pirai, Resende e Rio Claro, da região de governo do Médio Paraíba, obtiveram, da mesma forma, IVGp também satisfatórios (0,12, 0,13 e 0,21, respectivamente). Assim, dos cinco menores valores IVGp do ERJ, quatro estão associados a municípios do Médio Paraíba.

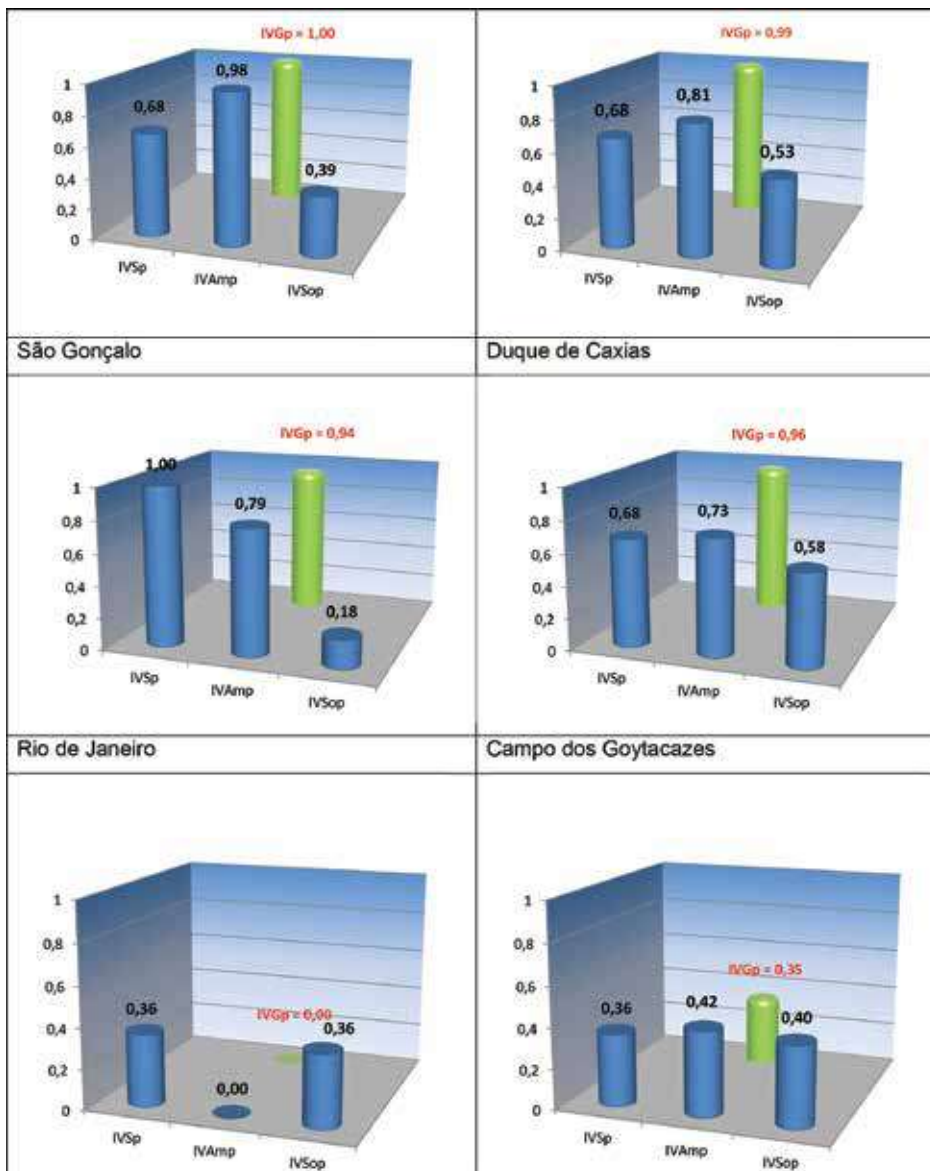
Diversos municípios da região Serrana apresentaram resultados relativamente altos de IVGp, a exemplo de Petrópolis (figura 8), Teresópolis e Nova Friburgo, que se destacaram por índices próximos a 0,30, pautado no equilíbrio entre IVSp, IVSop e IVAm.

Figura 7 – Índice de Vulnerabilidade Geral padronizado



Apesar de terem obtido IVSop acima da média, os municípios mais populosos, principalmente os da região Metropolitana, apontaram para um quadro de maior vulnerabilidade. O município do Rio de Janeiro ocupou o oitavo lugar entre os municípios com maior IVGp, mesmo apresentando 0,18 de IVSp. Por outro lado, Campos dos Goytacazes, que possui um dos maiores PIB do ERJ, aparece como um dos mais vulneráveis (0,96).

Figura 8 – IVSp, IVAm, IVSop, IVGp para municípios do ERJ



7 Índice de Cenários Climáticos (ICC)

O ICC apresenta as anomalias (diferenças) do clima atual 1961–1990 (*baseline*) com relação aos períodos futuros 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100, do modelo climático regionalizado Eta-MIROC5, de *grid* regular de 20 km. As variáveis climáticas utilizadas foram temperatura (TP2M – *Shelvertemperature*) (em graus Celsius) e precipitação (PREC – Acumulado de 12Z) (precipitação pluviométrica, em mm).

A família de cenários adotada foi a RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*), disponibilizada a partir do AR5 do IPCC. Tal cenário se fundamenta no contínuo aquecimento do planeta, mesmo após 2100, quando a forçante radiativa deverá ser maior que $8,5 \text{ W/m}^2$ e a concentração CO_2 equivalente alcançar cerca de 1.370 ppm, as quais permanecerão em ascendência (IPCC, 2013).

Para efeito da análise espacial da variável climática, foi executada modelagem geoestatística, com o auxílio da ferramenta *Geostatistical Analyst* do *software* ArcGIS v. 10.2.2 e Surfer v. 11. O comportamento espacial das variáveis climáticas foi investigado pela inspeção de histogramas e estudo de análise de tendência espacial. A interpolação dos *grids* regulares foi efetuada com base no método *kriging* ordinária, cuja qualidade foi avaliada pela análise do erro médio padronizado (*meanstandardized*), erro quadrático médio (*root-mean-square*), erro padrão médio (*average standard*) e erro quadrático médio padronizado (*root-mean-squarestandardized*).

As anomalias climáticas mensuram a variação esperada nos valores de precipitação e temperatura e integram a componente “exposição” da vulnerabilidade. Valores positivos indicam aumento de precipitação e temperatura, enquanto valores negativos apontam na direção oposta. Valores próximos ou iguais a zero indicam níveis de precipitação e temperatura iguais ou muito próximos aos observados no *baseline*.

A idéia central é a de que quanto maior a anomalia, maior a demanda de resposta (capacidade adaptativa). Essa necessidade de resposta ocorre de maneira independente da direção observada da anomalia (positiva ou negativa), de modo que são tratadas em termos absolutos.

As anomalias de precipitação e temperatura foram distribuídas em quartis, resultando em quatro conjuntos de dados: 25% menores ou iguais ao 1º quartil; 25% distribuídos entre o 1º e o 2º quartil; 25% entre o 2º e o 3º quartil; e os restantes 25% dos dados maiores ou iguais ao 3º quartil (tabela 4).

O cálculo do ICC padronizado foi realizado em quatro etapas: distribuição das anomalias de precipitação e temperatura em quartis; atribuição de peso às anomalias nos quartis; cálculo do ICC municipal; e cálculo do ICC municipal padronizado (ICC_p).

Tabela 4 – Quartis observados para os módulos (valores absolutos) das anomalias climáticas

Quartil	Período de Integração	
	2011-2100	
	AP	AT
1º	56,07	1,12
2º	112,58	1,85
3º	212,85	2,86

Fonte: elaboração própria

O ICC municipal corresponde à média dos pesos atribuídos às anomalias absolutas de precipitação e temperatura por município, considerando os três períodos futuros do cenário de emissão RCP 8.5. Foi atribuído maior peso aos municípios com maiores anomalias, o que significa que, quanto maior o valor, em módulo, maior o respectivo peso.

O ICC foi padronizado considerando o período de integração 2011–2100, de modo a permitir a comparação direta entre os três períodos futuros (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100). Os mapas das anomalias de temperatura, precipitação e dos ICC_p são apresentados nas figuras 9 a 17.

As anomalias de temperatura apresentam tendência de aumento até o final do século XXI. Considerando os cenários climáticos estudados, observou-se que houve uma elevação permanente da temperatura ao longo do período de integração 2011–2100. No que se refere à precipitação, houve uma redução expressiva dos índices entre 2011–2040 e aumento, entre 2041 e 2100. Nesse contexto, valores elevados de vulnerabilidades (refletidos pelo IVMp) foram obtidos particularmente para municípios das regiões de governo Norte e do Médio Paraíba, no período 2011–2040, sendo que, em 2041–2070, houve redução no número de municípios com vulnerabilidade elevada. Entre 2071–2100, porém, o número de municípios em situação de elevada vulnerabilidade aumenta, em especial na região Metropolitana.

A média municipal observada, para o período 2011–2040, foi 1,06 °C (variando entre 0,88 e 1,27 °C), passando a 1,85 °C (1,65–2,09 °C), em 2041–2070, até atingir 3,03 °C (2,74–3,33 °C), no período 2071–2100. A maior mudança ocorre, portanto, a partir de 2041, comportamento que se repete em modelos climáticos globais para a região tropical, no que se refere tanto à temperatura quanto à precipitação.

A distribuição espacial das anomalias de temperatura segue um padrão mais ou menos regular no ERJ ao longo do século, sendo que os municípios litorâneos e entorno imediato são os que apresentam os menores valores, em contraposição ao restante do estado. Esse perfil é particularmente válido para os municípios das regiões Metropolitana, das Baixadas Litorâneas e Norte Fluminense.

Com relação à precipitação, o período 2011–2040 apresenta redução de índices pluviométricos em todos os municípios, fenômeno mais intenso, porém, nas regiões Serrana e Centro-Sul Fluminense. A média das anomalias para os 92 municípios é de -212,13 mm, com extremos registrados em Cantagalo (-314,34 mm), na região Serrana e Arraial do Cabo (-79,62 mm), na região das Baixadas Litorâneas.

Os períodos 2041–2070 e 2071–2100 apresentam média positiva de anomalias de precipitação, sendo da ordem de 75,09 e 83,27 mm, respectivamente. Em ambos os casos, os municípios da região Serrana seguem apresentando os menores valores, indicando redução da umidade, comparativamente às demais regiões.

Para 2041–2070 foram registradas anomalias de cerca de $-45,00$ mm em Santa Maria Madalena e São Sebastião do Alto, ambos localizados na região Serrana. Na região das Baixadas Litorâneas, ao contrário, Iguaba Grande e Cabo Frio apresentaram valores superiores a $250,00$ mm, com máxima de $274,51$ mm registrada em São Pedro da Aldeia. Os municípios litorâneos e entorno imediato se destacam, portanto, por apresentarem anomalias mais elevadas.

Para 2070–2100, verifica-se redução generalizada de valores de anomalias de precipitação com relação ao período anterior, particularmente nos municípios do interior. No litoral, entretanto, as anomalias seguiram aumentando, atingindo valores pouco superiores a $400,00$ mm em São Pedro da Aldeia e Iguaba Grande, na região das Baixadas Litorâneas. Em São Sebastião do Alto, na região Serrana, a anomalia registrada foi de cerca de $-185,00$ mm, confirmando a posição de menor precipitação disponível nessa região, com relação ao restante do ERJ.

Para o período 2011–2040, os maiores valores de ICCp (acima de $0,83$) foram registrados em 24 municípios, particularmente das regiões Serrana, Centro-Sul Fluminense e Médio Paraíba. Em 15 municípios, porém, foi registrado ICCp $0,00$, incluindo o Rio de Janeiro e toda a região das Baixadas Litorâneas, assim como municípios próximos, indicando a combinação das anomalias de temperatura e precipitação menos extremas nessa porção do ERJ. Nos demais municípios, incluindo toda a região Norte e Noroeste Fluminense, foram registrados valores intermediários de ICCp.

Padrão nítido como o observado para o período 2011–2040 não se repetiu nos outros dois períodos futuros, de modo que a combinação das anomalias de temperatura e precipitação variaram livremente entre municípios e regiões de governo.

Para 2041–2070, apenas Rio Claro, Pirai e São Fidelis apresentaram ICCp igual a $0,00$. No outro extremo da escala, estão Comendador Levy Gasparian, Lage do Muriaé, Miracema, Paraíba do Sul, Rio das Flores, São José de Ubá, Três Rios e Vassouras, com ICCp igual a $1,00$. Tais municípios integram, respectivamente, as regiões Centro-Sul Fluminense e Noroeste Fluminense, justamente as que, de um modo geral, apresentaram os ICCp mais elevados. Valores medianos ($0,50$) foram registrados em todas as regiões, em cerca de 60% dos municípios.

Para 2071–2100, somente Campos dos Goytacazes e São João da Barra apresentaram ICCp igual a 0,00, ao passo que sete outros – Bom Jardim, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, São Sebastião do Alto, Trajano de Moraes e Parati –, alcançaram 1,00. Da mesma forma que no período anterior, não houve um padrão muito claro com relação à distribuição dos valores de ICCp, havendo valores intermediários registrados para todas as regiões. Ressalte-se, portanto, que, nesse caso, a região Serrana surge como a que apresenta um cenário de combinação de anomalias climáticas de precipitação e temperatura extremas.

Figura 9 – Anomalias de temperatura (em °C) – Período de futuro: 2011–2040



Figura 10 – Anomalias de temperatura (em °C) – Período de futuro: 2041–2070

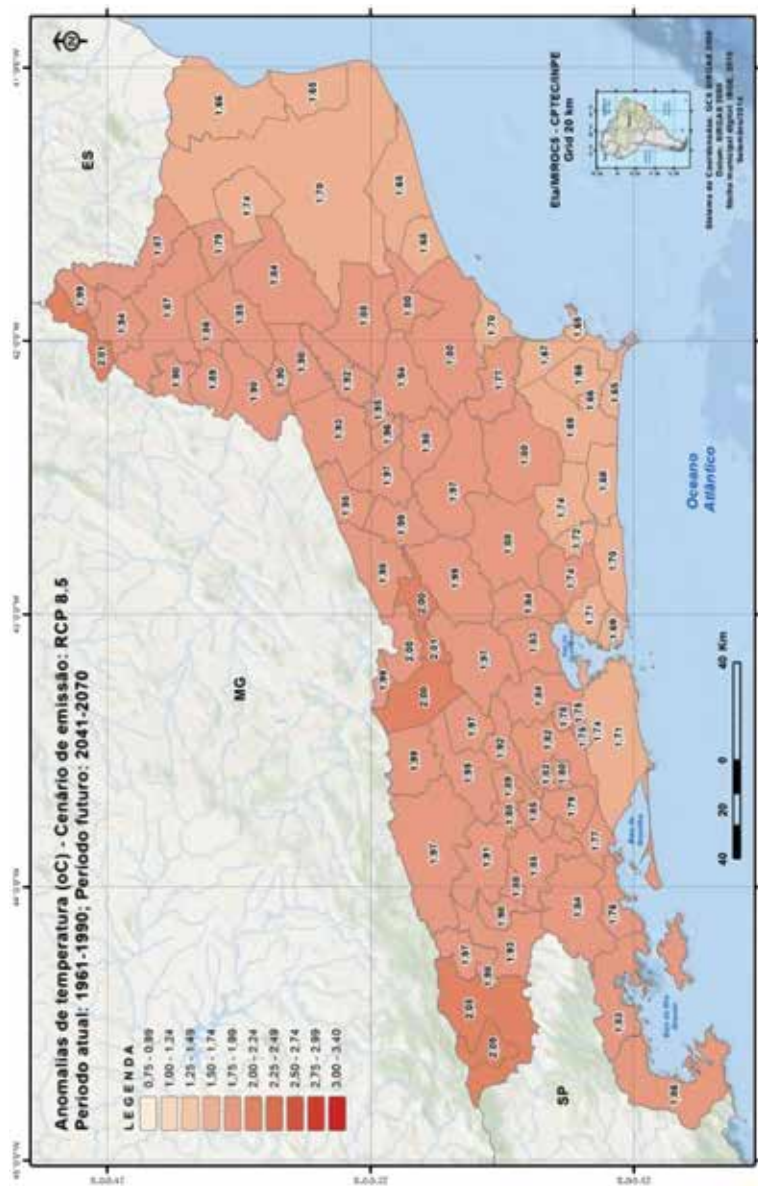


Figura 11 – Anomalias de temperatura (em °C) – Período de futuro: 2071–2100

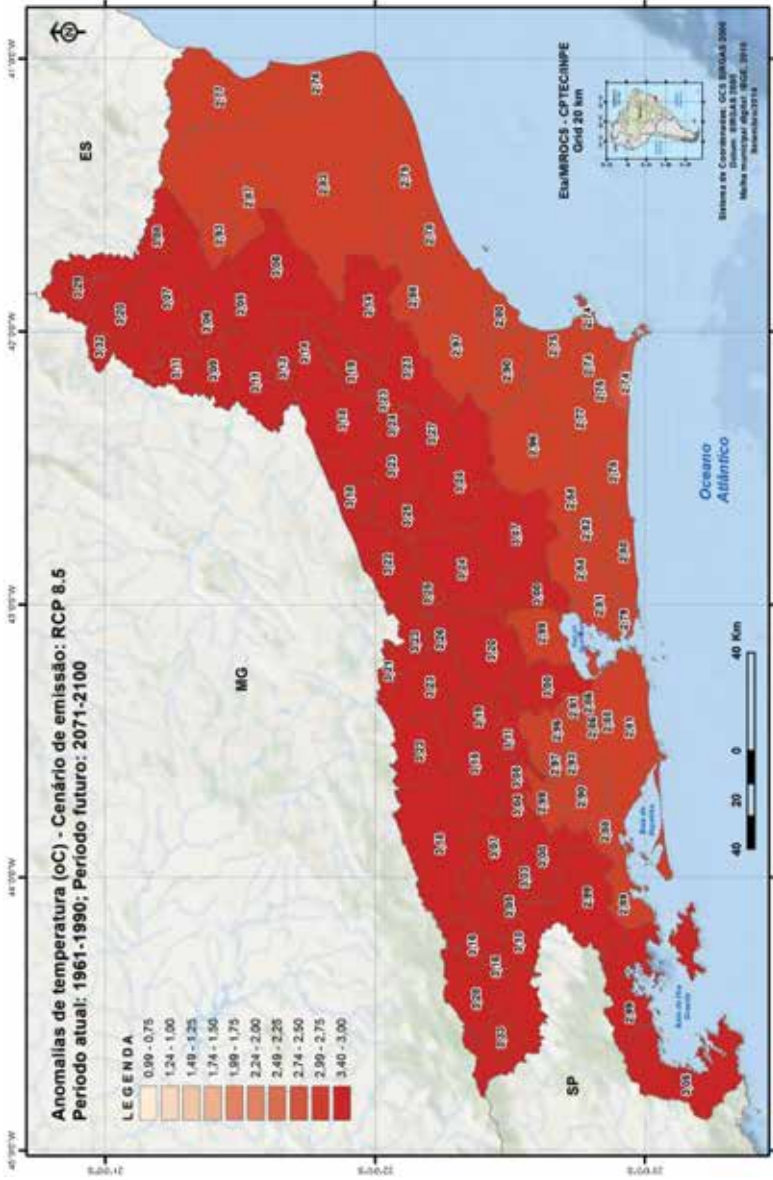


Figura 12 – Anomalias de precipitação (em mm) – Período de futuro: 2041–2070

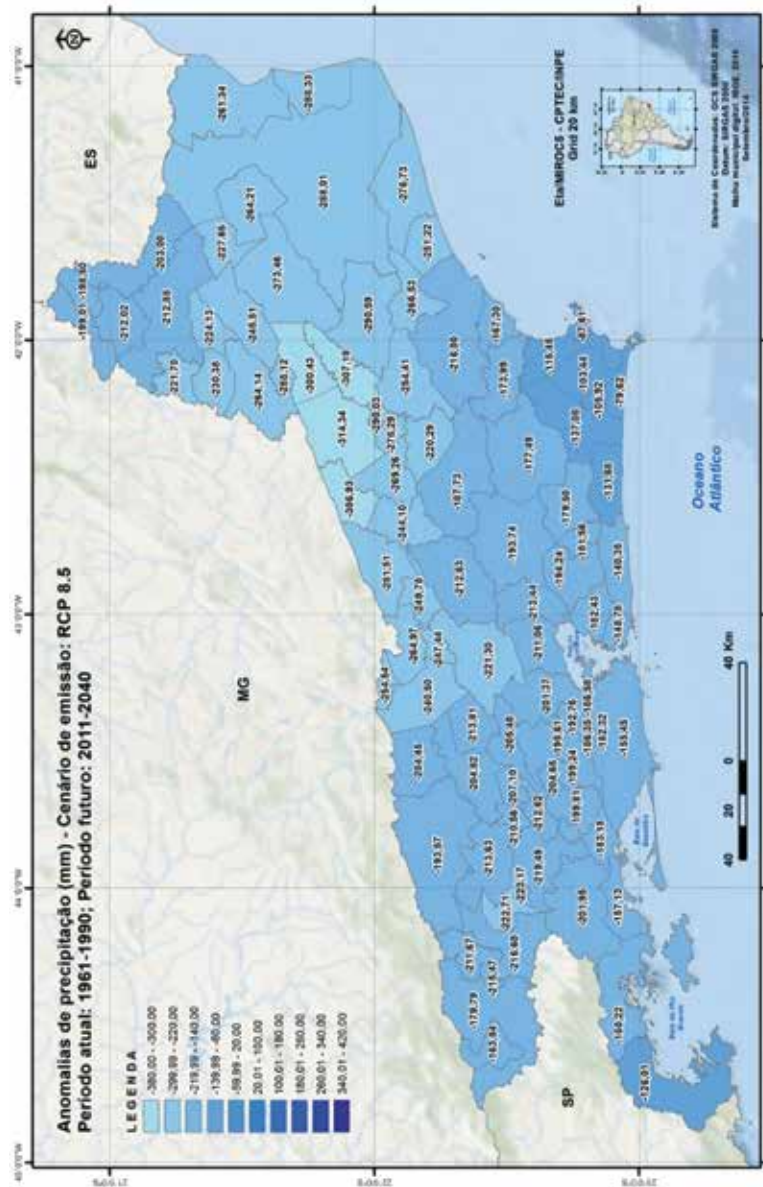


Figura 13 – Anomalias de precipitação (em mm) – Período de futuro: 2041–2070

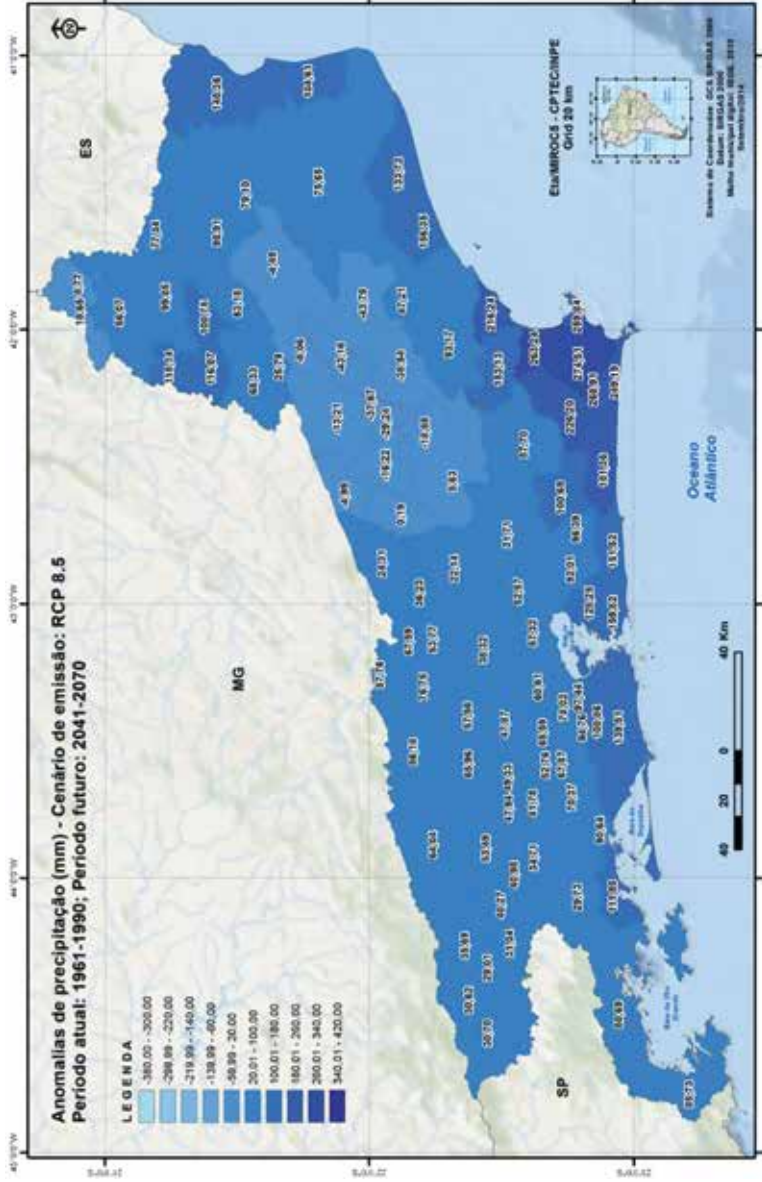


Figura 14 – Anomalias de precipitação (em mm) – Período de futuro: 2071–2100

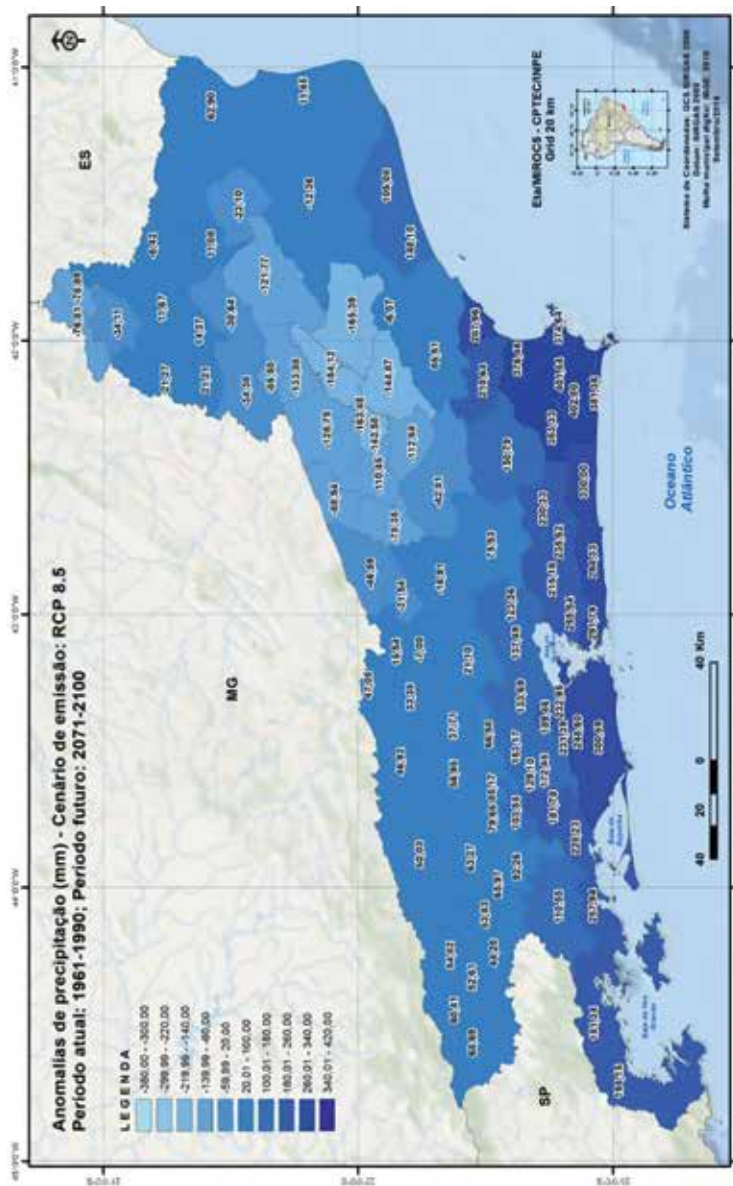


Figura 15 – Índice de Cenário Climático – Período de futuro: 2011–2040

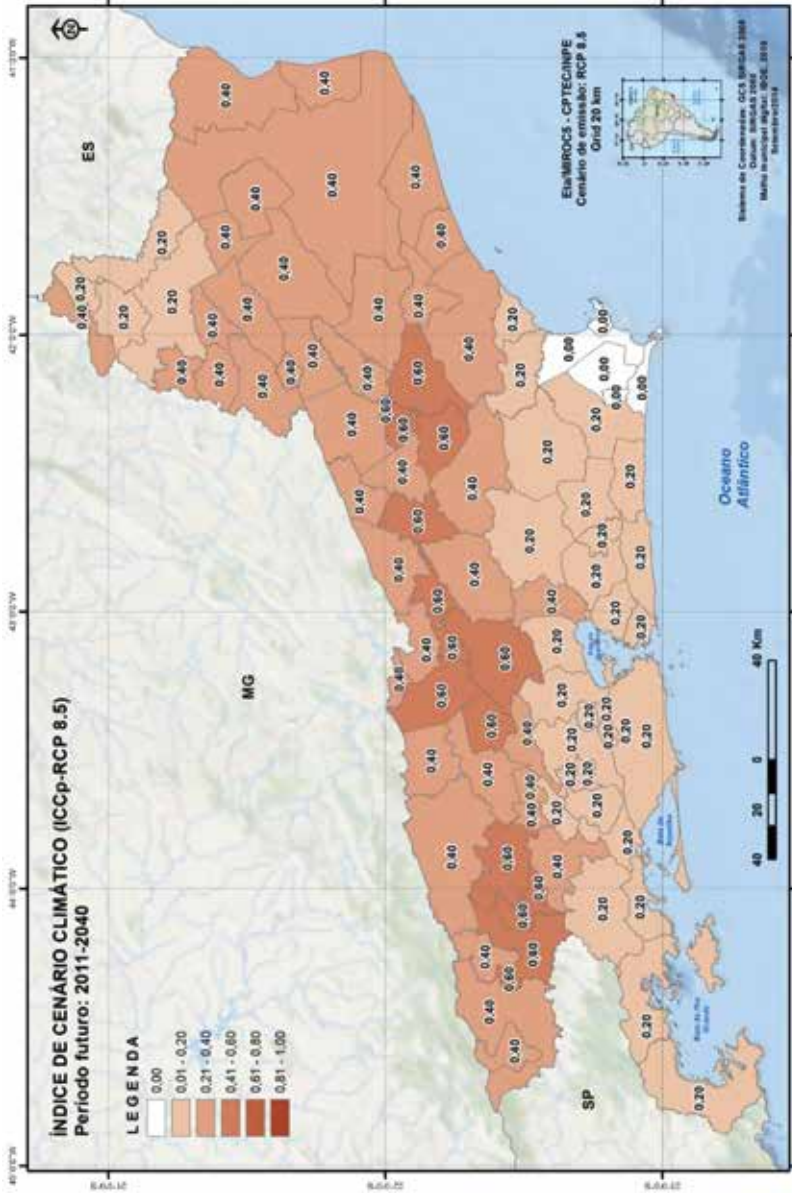


Figura 16 – Índice de Cenário Climático – Período de futuro: 2041–2070

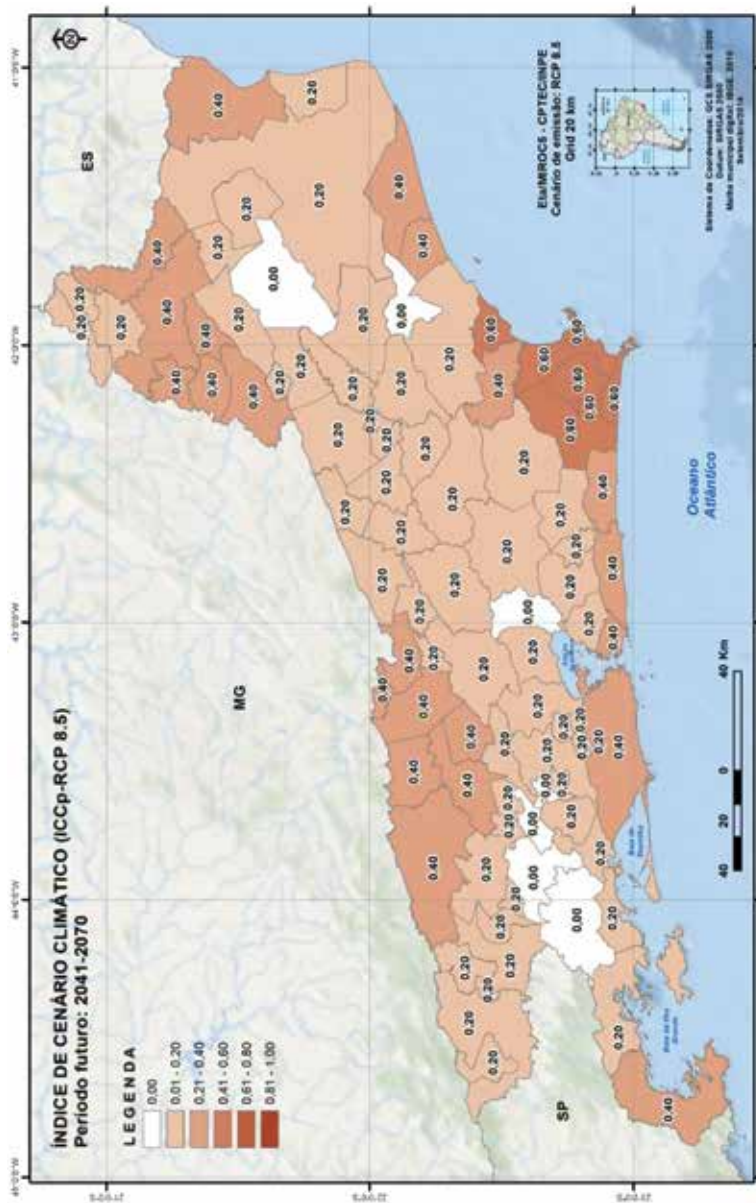
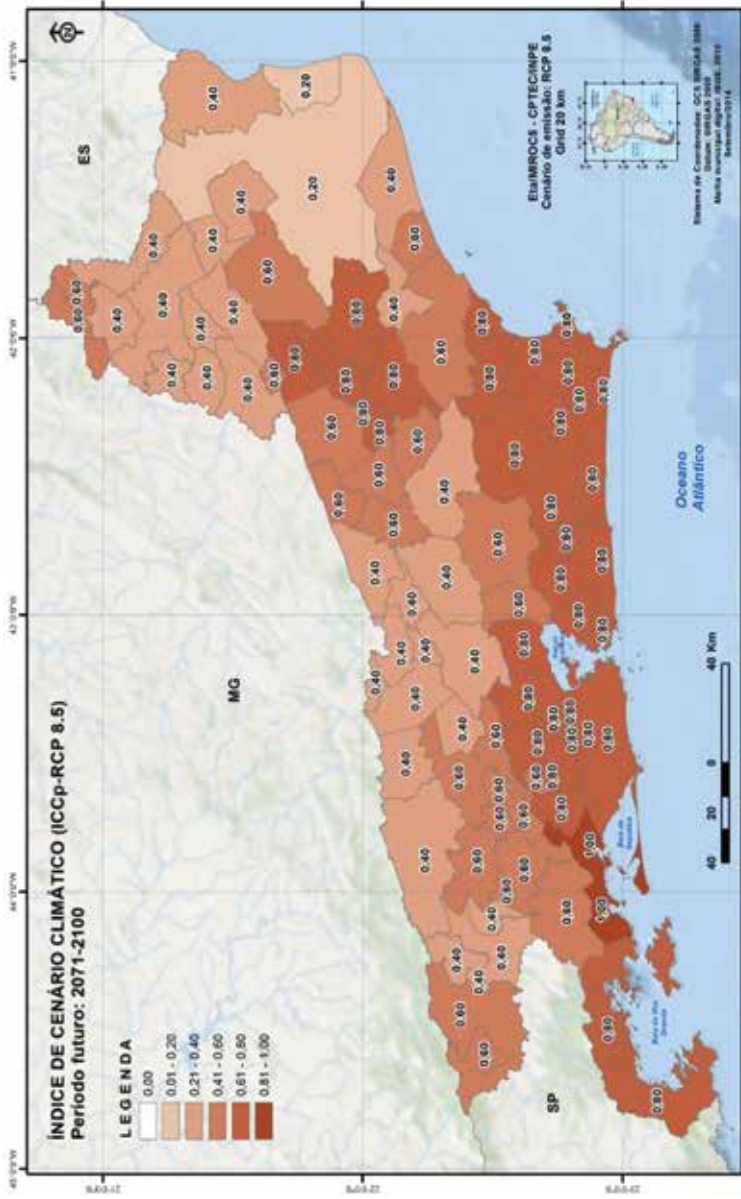


Figura 17 – Índice de Cenário Climático – Período de futuro: 2071–2100



8 Índice de Vulnerabilidade Municipal (IVM)

O IVM agrega o IVGp, que reflete a condição de vulnerabilidade presente nos municípios do ERJ sob risco de serem afetados pelo clima futuro, e o ICCp, que projeta as anomalias climáticas. Dessa forma, o IVM é um índice composto que agrega diferentes variáveis e associa a cada município uma relativa medida comparativa (valor numérico) com respeito à vulnerabilidade frente às mudanças climáticas.

Os índices são incorporados ao IVM com pesos equivalentes e possuem valores que podem ser comparados diretamente entre si. Com o objetivo de promover a melhor interpretação, o IVM foi também padronizado para a escala 0,00–1,00.

As figuras 18 a 20 apresentam o IVM para os três períodos futuros.

Como visto, o IVM associa a vulnerabilidade municipal nos campos socioambiental e de saúde humana, tratadas no IVG, às anomalias de precipitação e temperatura, estudadas sob a ótica do ICC. Nesse sentido, o IVM é capaz de apontar a direção para a qual a vulnerabilidade municipal poderá progredir, considerando as projeções climáticas.

Assim, como mostrado anteriormente, o IVGp é mais acentuado nos municípios das regiões Noroeste Fluminense, Norte, Médio Paraíba e Metropolitana, sendo extremo nos municípios dessa última região: Itaboraí (0,99), Duque de Caxias (0,99) e São Gonçalo (1,00). Considerando o IVM para o período 2011–2040, os índices de vulnerabilidade continuam elevados nas regiões Noroeste Fluminense, Norte e Médio Paraíba, mas se acentua nos municípios das regiões Serana e Centro-Sul Fluminense e reduz na região Metropolitana. Desse modo, Itaboraí e São Gonçalo, por exemplo, experimentam redução de vulnerabilidade relativa, ainda que permaneçam em um patamar mediano (respectivamente, 0,60 e 0,50). A redução, porém, foi pequena, no que concerne à Duque de Caxias (0,82).

Os municípios da região das Baixadas Litorâneas, anteriormente com média de IVGp igual a 0,47 (variando entre 0,25 e 0,72), apresentam IVMp médio de 0,16 (0,00 a 0,72), destacando-se São Pedro da Aldeia e Rio das Ostras, ambos com 0,00. Com relação à região Metropolitana, uma das mais vulneráveis sob a ótica

do IVGp (média igual a 0,64), considerando-se o conjunto de municípios, nota-se uma redução da vulnerabilidade geral, cuja média municipal passa a ser de 0,44.

Em termos gerais, considerando a totalidade dos municípios do ERJ, a vulnerabilidade municipal média é de 0,55 para o IVGp e o IVMp, no período 2011–2041.

Figura 18 – Índice de Vulnerabilidade Municipal – Período de futuro: 2011–2040

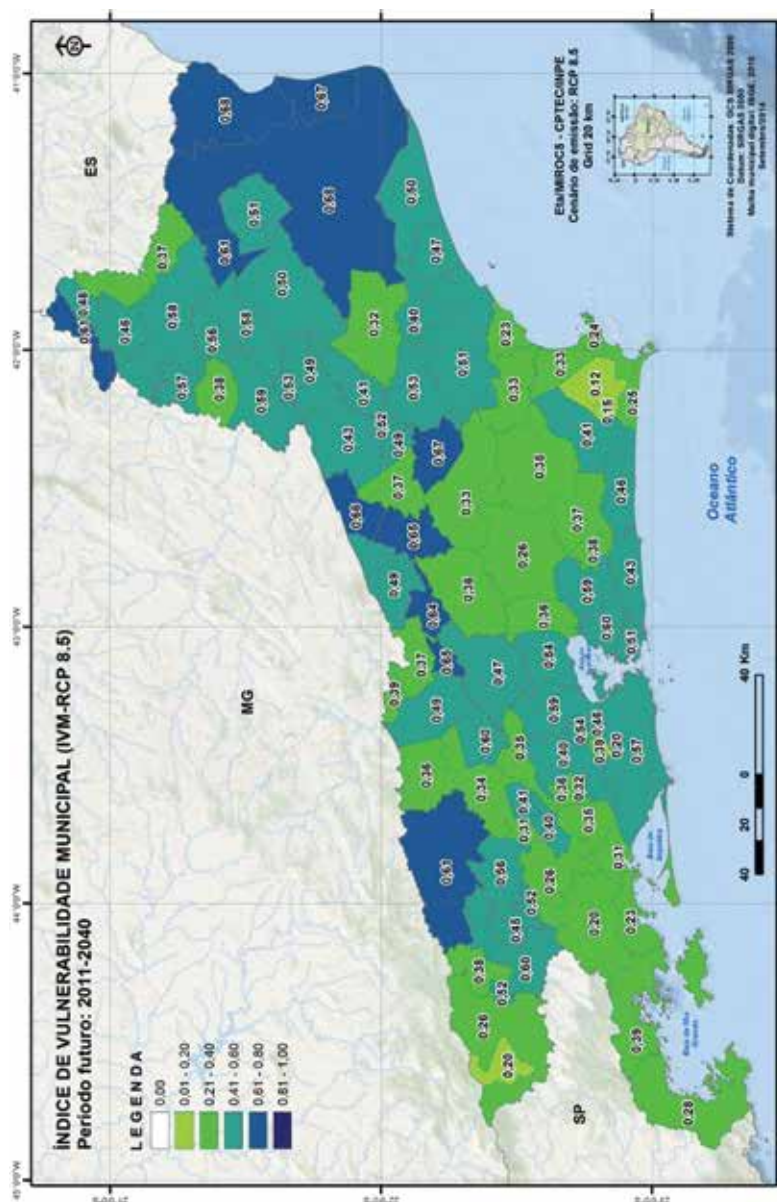


Figura 19 – Índice de Vulnerabilidade Municipal – Período de futuro: 2041–2070

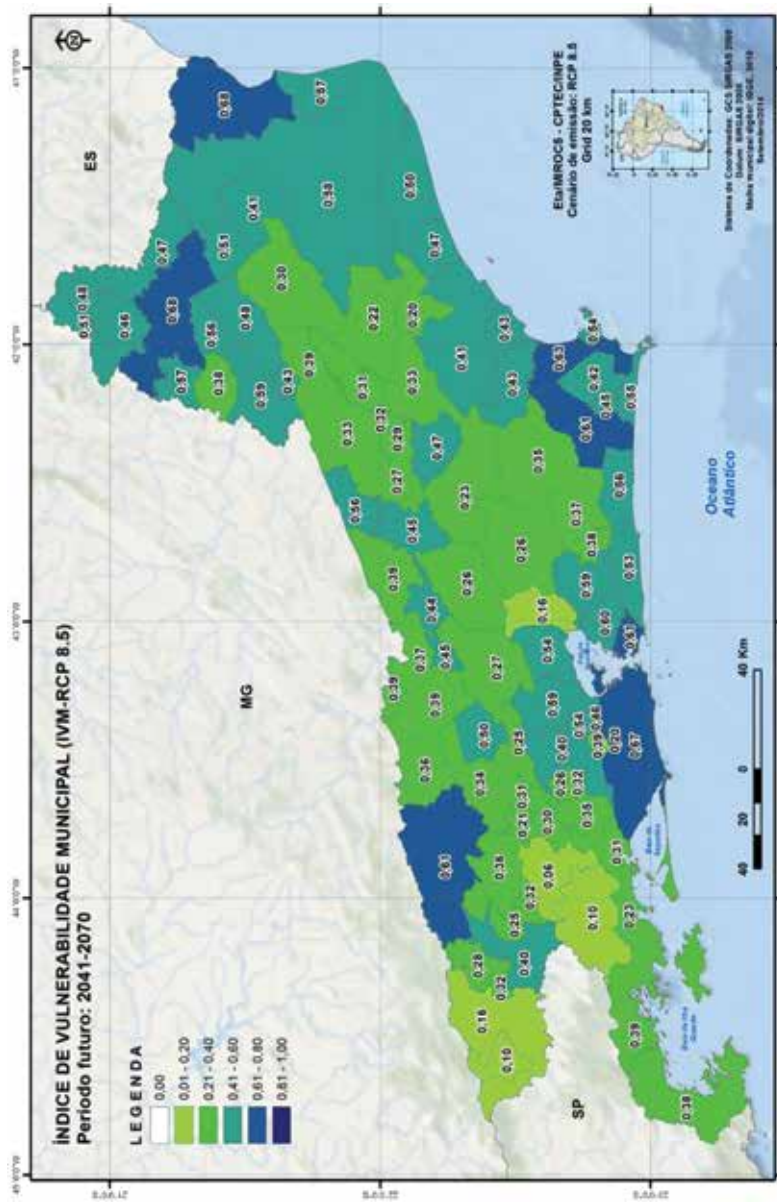
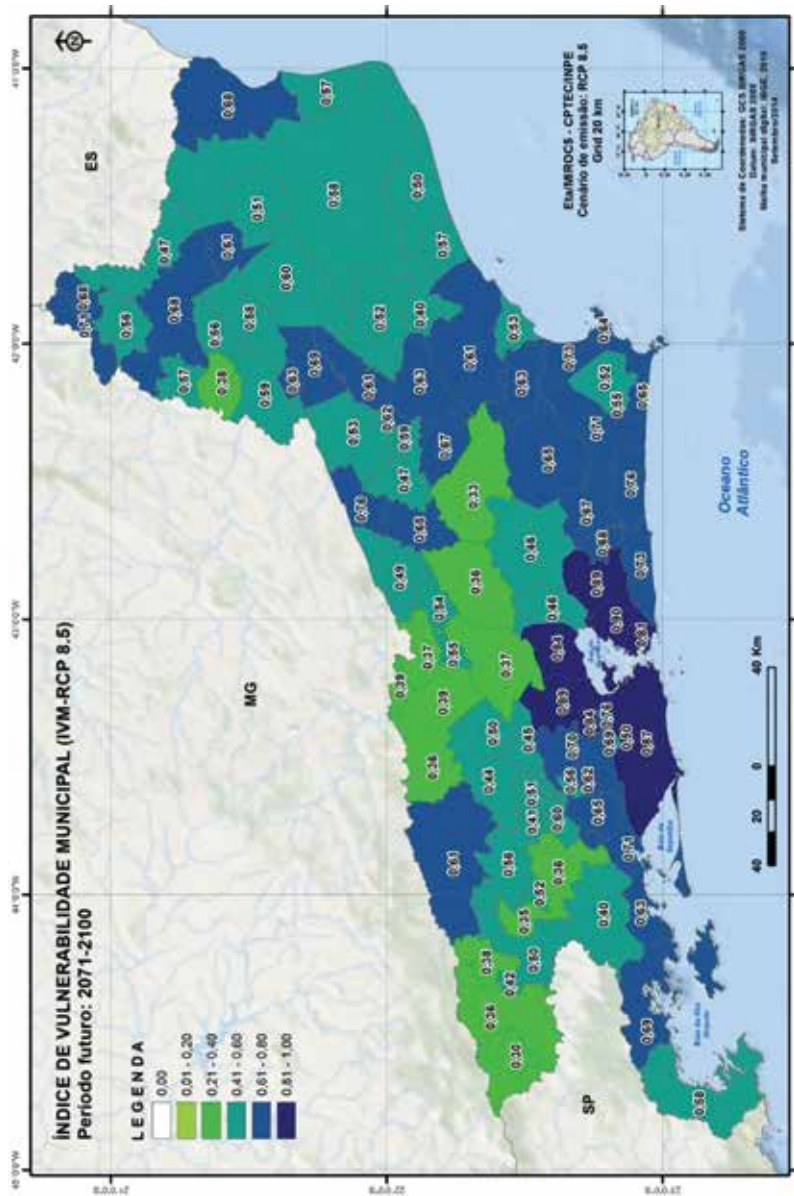


Figura 20 – Índice de Vulnerabilidade Municipal – Período de futuro: 2071–2100



9 Considerações finais

Este trabalho permitiu uma visão abrangente e multisetorial da vulnerabilidade relativa da população dos municípios do estado do Rio de Janeiro, em face dos cenários futuros de mudanças do clima. A construção do índice composto foi feita com base em subíndices setoriais de saúde, sociais e ambientais, bem como do potencial perigo climático. Seus componentes são mostrados graficamente e explicitados segundo a respectiva influência relativa.

Nesse contexto, disponibiliza-se aos gestores públicos, uma ferramenta que se espera seja útil ao planejamento de ações e medidas de adaptação de curto, médio e longo prazo para reduzir a vulnerabilidade humana, seja na sua sensibilidade ou exposição, seja no aumento da capacidade adaptativa da população vulnerável e de suas instituições. Exemplificando, ao utilizar o mapa apresentado na figura 5, os gestores percebem que a população residente nos municípios da região Serrana do estado do Rio de Janeiro são as mais vulneráveis a eventos extremos. Nesses municípios, sugere-se avaliar e priorizar estratégias que possibilitem reduzir os seus determinantes. Ao avaliar o mapa da figura 7, observa-se que a população residente nos municípios de São Gonçalo, Duque de Caxias e Rio de Janeiro estão entre as mais vulneráveis no estado. Avaliar os respectivos determinantes e planejar e implantar ações que possibilitem reduzi-la nesses municípios poderá contribuir para reduzir o impacto do clima sobre a população dos referidos municípios, bem como a sua atual vulnerabilidade.

Destaque-se que os resultados do trabalho aqui apresentado refletem diretamente a disponibilidade de dados e informações científicas, bem como as estatísticas municipais.

Trabalhos futuros dessa natureza podem ser elaborados considerando a inclusão de novos indicadores, a exemplo de doenças respiratórias influenciadas pela qualidade do ar (rinites, gripes, bronquites etc.). Atualmente, tal iniciativa é inviável, uma vez que nem todos os agravos fazem parte das estatísticas de doenças de notificação compulsória, assim como inexistem séries contínuas e abrangentes de qualidade do ar no ERJ.

Considerando um nível de abordagem ainda mais complexo e desafiador podem ser incluídos indicadores que reflitam mudanças sociais, a exemplo de taxas de crescimento da população (que influenciam o número de pessoas expostas a inundações, ondas de calor etc.); assim como mudanças tecnológicas, que interferem diretamente na capacidade de adaptação e qualidade de vida da população municipal.

Destaca-se, da mesma forma, a necessidade de inclusão de diferentes modelos climáticos regionalizados, tendo como objetivo aprimorar a construção do IVM, o que se reveste de fundamental importância para tomadas de decisões estratégicas em nível local. A inclusão de novos modelos climáticos permitirá, inclusive, que sejam mitigadas as incertezas nas avaliações do risco climático, cuja robustez cresce com o maior número de modelos climáticos agregados nas análises.

Há fortes evidências científicas de que as mudanças climáticas poderão interferir negativamente nas sociedades, afetando a economia global e o meio ambiente natural e antropizado, de modo que a avaliação dos riscos climáticos futuros precisa levar em conta uma ampla gama de fatores. Porém, as fontes de incerteza são diversas, variando desde os quantitativos de emissões futuras de gases de efeito estufa, de origem antrópica e natural, à variabilidade natural dos sistemas climáticos, pouco apreensíveis pelos atuais modelos climáticos.

Considerando que a mudança climática global é um dos dois maiores problemas da crise ambiental contemporânea da humanidade, por seu ritmo, amplitude e profundidade e, ainda, há grande incerteza nos seus possíveis impactos sobre a população humana, faz-se necessário realizar estudos que possibilitem avaliar a vulnerabilidade da população associada aos potenciais perigos climáticos de modo a contribuir para o estabelecimento de estratégias que mitiguem este perigo. O trabalho realizado para o estado do Rio de Janeiro mostrou-se útil para tal fim. Nesse contexto, este mesmo trabalho está sendo finalizado para os 84 municípios do estado da Bahia inseridos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, na extensão do bioma Caatinga contando para tal com o apoio financeiro do Ministério da Saúde. Adicionalmente ele está sendo desenvolvido para mais seis estados do Brasil, contando para tal com recursos do Fundo Clima. Essa foi uma demanda do

Ministério do Meio Ambiente e espera-se, com isto, subsidiar o Plano Nacional de Adaptação, por meio da identificação de populações e territórios vulneráveis à mudança do clima no Brasil. Espera-se que os indicadores de vulnerabilidade da população municipal dos estados do Brasil à mudança do clima contribuam para que gestores e sociedade civil brasileira possam avaliar a vulnerabilidade da população dos municípios às mudanças do clima e identificar e localizar espacialmente as vulnerabilidades específicas presentes em diferentes estados, por meio de comparações entre municípios.

Considerando que o risco é definido como o potencial para consequências em que algo de valor está em jogo, mas cujo resultado é incerto, reconhecendo-se a diversidade de valores (IPCC, 2013), é natural que sejam considerados os impactos das opções de desenvolvimento socioeconômico presente, bem como a capacidade institucional de resposta e medidas de adaptação e mitigação adotadas pela sociedade. Entretanto, do ponto de vista da gestão pública – e em circunstâncias muito favoráveis –, o planejamento do desenvolvimento econômico e territorial possui alcance temporal restrito a poucas décadas, o que necessariamente reduz o poder de persuasão de análises do clima futuro de muito longo prazo. Estas, porém, devem ser consideradas como indicativo de tendências do comportamento do clima de base para uma determinada região, sendo, dessa forma, indissociáveis para o aprimoramento e fortalecimento da resiliência dos municípios.

Referências

ÅSTRÖM D. O.; FORSBERG B.; ROCKLÖV, J. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. **Maturitas**, Austrália, v. 69, n. 2, p. 99-105, 2011.

ÁVILA-PIRES, F. D. Leptospirose e enchentes: uma falsa correlação? **Revista de Patologia Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 3, p.199-204, 2006.

BARATA, M. M. L. *et al.* **Mapa de vulnerabilidade da população do estado do Rio de Janeiro aos impactos das mudanças climáticas nas áreas social, saúde e ambiente**. Rio de Janeiro: Secretaria de Estado de Ambiente, 2011.

BARATA, M. M. L. *et al.* **Mapa da vulnerabilidade da população do estado do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas.** Rio de Janeiro: Secretaria de Estado de Ambiente, 147. p. 2013.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 dez. 2009 [edição extra]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm>. Acesso em: abr. 2012.

CARVALHO, M. D.; BARROS, R. P. D.; FRANCO, S. Índice de Desenvolvimento da Família (IDF). In: ACOSTA, A. R.; VITALE, M. A. F. (Orgs.). **Família: redes, laços e políticas.** São Paulo: Instituto de Estudos Especiais/PUC, 2003.

CHOWELL, G. *et al.* The influence of geographic and climate factors on the timing of dengue epidemics in Peru, 1994–2008. **BMC Infectious Diseases**, Londres, v. 11, p. 164, 2011.

CONFALONIERI, U. E. C.; MARINHO, D. P.; RODRIGUEZ, R. R. **Análise da vulnerabilidade da população brasileira aos impactos sanitários das mudanças climáticas.** Relatório final de projeto de pesquisa. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2005. 96 p.

_____. Public health vulnerability to climate change in Brazil. **Climate Research**, Alemanha, v. 40, p. 175-186, 2009.

CONFALONIERI, U. E. C. *et al.* **Mudança Climática, migrações e saúde no Nordeste brasileiro.** Relatório final do projeto GOF. Belo Horizonte/MG: CPqRR/ Fiocruz, 2008. 67 p.

CRUZ, C. F. R. **Leishmaniose Tegumentar Americana (LTA) no município de Bandeirantes – Paraná, entre 2000 e 2009.** 2010. 129 p. Dissertação (Mestrado em Epidemiologia) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

EVANS, R. G. **Why are some people healthy and others not? The determinants of health of the population.** In: EVANS, R. G.; BARER, M. L.; MARMOR, T. R. (Orgs.). New York: Aldine de Gruyter, 1994.

GENTRY, A. H. Diversity and floristic composition of neotropical dry forests. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (Eds.). **Seasonally dry tropical forests.** Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1995.

HASELBALG, C. **Pobreza no Brasil no final do século XX.** Origens e destinos: desigualdades sociais ao longo da vida. Rio de Janeiro: Topbooks, 2003.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. **Censo 2010.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 3 jul. 2013.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 104 p. 2007.

_____. Summary for Policymakers. In: STOCKER, T. F. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

KATHIRESAN, K.; RAJENDRAN, N. Coastal mangrove forests mitigated tsunamis. **Nature**, Londres, v. 399, n. 6733, p. 258-261, 2005.

LEVETT, P. N. Leptospirosis. **Clinical Microbiology Reviews**, Washington, DC, v. 14, n. 2, p. 296-325, 2001.

LOPES, C. G. R. **Relações florísticas e estruturais entre fragmentos de florestas secas e úmidas (Floresta Atlântica), Nordeste do Brasil**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* **Hotspots**: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Mexico City: Cemex / Conservation International, 2000. 430 p.

MONTEIRO, C. A. A dimensão da pobreza, da desnutrição e da fome no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo. v. 17, p. 7-20, 2003.

NOBRE, C. A. *et al.* **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas**: Região Metropolitana de São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/mclima/pdfs/publicacoes/2010/SumarioExecutivomegacidades.pdf>>. Acesso em: abr. 2012.

OPAS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Mudança climática e saúde**: um perfil do Brasil. Brasília/DF: OPAS / Ministério da Saúde, 2009.

ROCHA, C. F. D. *et al.* Répteis e a sua conservação no Estado do Rio de Janeiro. In: BERGALLO, H. G. *et al.* (Orgs.). **Estratégias e ações para a conservação da biodiversidade no Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro/RJ: Instituto Biomas, 2009. 344 p.

SILVA, N. V.; HASELBALG, C. A. Pobreza e desigualdade no Brasil nos anos 80. In: **Seminários Estratégias Liberais de Refundação: Dilemas Contemporâneos do Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Instituto Universitário de Pesquisa do Rio de Janeiro, 1992. p. 42.

Avaliação de estudos de vulnerabilidade e adaptação à mudança do clima nas cidades brasileiras

Denise de Sousa

Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Vivien Green

Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA)/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe)/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Resumo

As mudanças climáticas vêm ganhando cada vez mais destaque em todo o mundo e traz em seu bojo duas formas básicas de enfrentamento: a mitigação e a adaptação. Até pouco tempo, no cenário mundial, o foco esteve voltado para a mitigação e atualmente a adaptação começa a ganhar evidência, principalmente, em áreas urbanas. É esperado que a intensidade, duração ou frequência de eventos de extremos climáticos se altere ao longo do tempo e os potenciais impactos das mudanças climáticas comecem a exigir que estratégias de respostas sejam adotadas num esforço para mitigá-los. Surge, assim, um novo desafio ao planejamento e gestão das cidades que já estão, de alguma forma, buscando superá-lo, realizando estudos de impactos, adaptação e vulnerabilidade a mudanças climáticas (*Climate Change Impact, Adaptation and Vulnerability* – CCIAV), essenciais à tomada de decisão sobre a concepção e implementação destas estratégias. Todavia, em função, dentre outros fatores, da multidisciplinaridade envolvida, é difícil selecionar as abordagens, métodos e ferramentas apropriados para os estudos e, mais ainda, avaliá-los e compará-los.

Nesse contexto, foi elaborada uma estrutura metodológica de avaliação e comparação de estudos de CCIAV, com base na literatura internacional, e aplicada aos estudos oficiais realizados para cidades brasileiras, identificados num levantamento prévio. Como resultado, foi possível observar que o número de estudos é ainda inexpressivo. Os estudos avaliados possuíam, dentre outros, dimensões espaciais e temporais, cenários climáticos globais e regionais e resoluções, métodos e ferramentas de coleta e análise distintas, mas são unânimes em apontar a dificuldade de obtenção de dados como um dos fatores limitantes. O trabalho apresenta também recomendações que podem ser seguidas, visando ao aperfeiçoamento das metodologias adotadas e resultados a serem alcançados em estudos futuros, de forma a criar condições para melhor aplicabilidade e ter efeito multiplicador. Ademais, são apresentados os resultados das vulnerabilidades às mudanças climáticas identificadas nos estudos analisados.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Adaptação. Metodologia de análise. Cidades brasileiras. Mudanças climáticas.

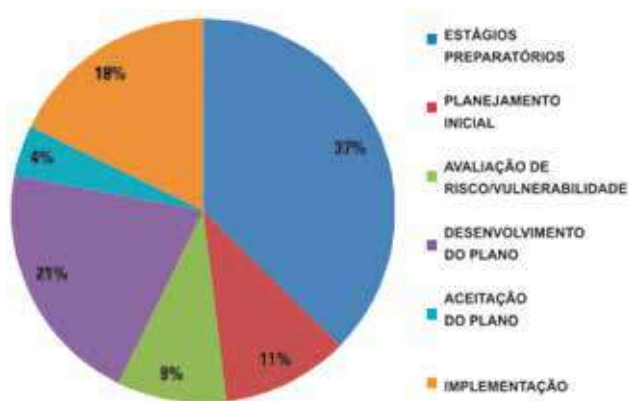
1 Introdução

As mudanças climáticas vêm ganhando cada vez mais destaque em todo o mundo e traz em seu bojo duas formas básicas de enfrentamento: a mitigação e a adaptação. Até pouco tempo, o foco esteve voltado para mitigação, buscando mecanismos para redução da concentração atmosférica de gases que contribuem para o efeito estufa. Mais recentemente, observa-se que a adaptação vem ganhando espaço, definindo-se estratégias de respostas para os sistemas afetados e(ou) potencialmente afetados à mudança do clima.

No contexto urbano, a adaptação ainda pode ser vista como um novo desafio, principalmente, no momento de incorporá-la aos processos de planejamento e gestão das cidades, uma vez que é esperado que a intensidade, a duração ou a frequência de eventos de extremos climáticos se altere ao longo do tempo (IPCC, 2014). Em outras palavras, como considerar, por exemplo, essa não estacionariedade temporal climática e incertezas na avaliação da vulnerabilidade das infraestruturas das cidades. Embora estudos que utilizem métodos de avaliação dos riscos climáticos que considerem essa não estacionariedade e incerteza ainda sejam limitados, cidades no mundo todo estão procurando avaliar o potencial impacto das mudanças climáticas para se adaptarem.

Carmin *et al.* (2012) identificou, por meio de entrevistas, quais as cidades membros do programa do ICLEI – *Local Governments for Sustainability* que estão desenvolvendo estudos de identificação e avaliação da vulnerabilidade/riscos das mudanças climáticas e(ou) planos de adaptação. O estudo apontou que 68% das cidades ao redor do mundo estão procurando elaborar planos de adaptação e as cidades da América Latina e Canadá apresentam as maiores taxas de engajamento (95% e 92% respectivamente). A figura 1 aponta a situação reportada das cidades que responderam às entrevistas.

Figura 1 – Situação do planejamento de adaptação



Fonte: Carmin *et al.* (2012)

Apesar de as cidades latino-americanas apresentarem elevadas taxas de engajamento no estudo anteriormente citado, no Brasil, considerando o contexto da mudança climática no universo de 26 estados, no Distrito Federal e em, aproximadamente, 5.570 municípios, até meados de 2014, o país só possuía 16 políticas estaduais e cinco municipais instituídas no campo das mudanças climáticas (PBMC, 2014).

Número também inexpressivo é a quantidade de estudos oficiais disponíveis (envolvendo as esferas de governo beneficiárias do estudo) realizados sobre adaptação, resiliência e vulnerabilidade às mudanças climáticas no âmbito de cidades/regiões/estados. Tal fato foi possível observar, a partir da pesquisa realizada nos portais dos municípios e respectivas secretarias de meio ambiente, além de consulta a partes interessadas que poderiam dar informações adicionais no período compreendido entre julho e outubro de 2014.

Foram encontrados estudos para as cidades de Curitiba, Goiânia, João Pessoa Pernambuco e Santos; para a Região Metropolitana de São Paulo; e para os estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro.

Observa-se que estudos de impactos, adaptação e vulnerabilidade a mudanças climáticas (*Climate Change Impact, Adaptation e Vulnerability – CCIAV*) são essenciais para as decisões sobre a concepção e implementação de estratégias de adaptação que possam vir a responder a futuras mudanças climáticas (CARTER; MÄKINEN, 2011). Todavia, em função, dentre outros fatores, da multidisciplinaridade envolvida, em alguns casos, é difícil selecionar as abordagens, métodos e ferramentas apropriadas e, mais ainda, avaliá-los e compará-los.

Nesse contexto, o estudo realizado teve por objetivo identificar os estudos oficiais de CCIAV nacionais, em âmbito estadual e local, elaborados ou em fase de elaboração, demonstrar quais as metodologias adotadas e como se deu o engajamento das diferentes partes interessadas.

Complementarmente, foram apresentados sucintamente os resultados observados em cada um destes estudos no que tange as vulnerabilidades às mudanças climáticas.

2 Metodologia de avaliação de estudos de CCIAV no Brasil

Apesar das dificuldades para se avaliar os CCIAV, alguns autores têm proposto estruturas de análise e comparação de estudos, considerando questões-chave para demonstrá-las e classificá-las. Com base em diferentes referências bibliográficas, foi elaborada uma metodologia de análise dos estudos brasileiros cujo referencial teórico e proposta metodológica são apresentados a seguir.

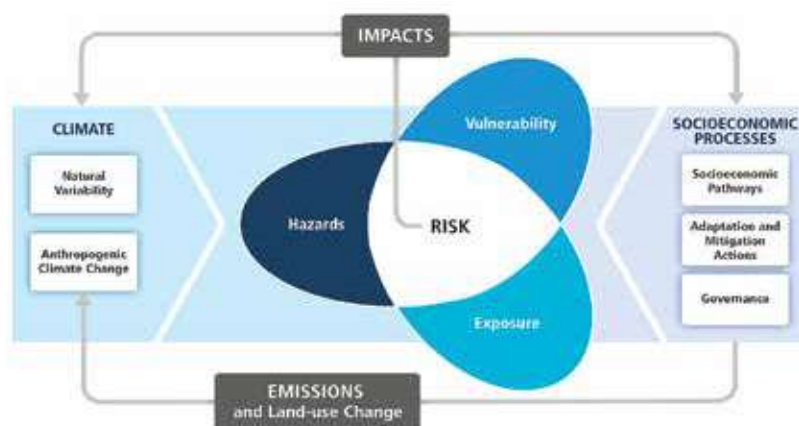
2.1 Referencial teórico e proposta metodológica

Adaptação envolve a redução de risco e vulnerabilidade, a busca de oportunidades e construção da capacidade de nações, regiões, cidades, setor privado, comunidades, indivíduos e sistemas naturais para lidar com os impactos climáticos, bem como mobilizar essa capacidade por meio da implementação de decisões e ações (TOMPKINS *et al.*, 2010 *apud* NOBLE; HUQ, 2014).

Entende-se por vulnerabilidade “a propensão ou predisposição de um sistema de ser adversamente afetado” (NOBLE; HUQ, 2014). Até o *Fourth Assessment Report* (AR4) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), publicado em 2007, era composta por três elementos: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação. No entanto, no *Fifth Assessment Report* (AR5) passou a ser apenas compreendida pela sensibilidade e capacidade de adaptação, passando a exposição a ser incorporada no conceito de risco (figura 2) (IPCC, 2014).

Ainda de acordo com o último relatório do IPCC, define-se risco como o potencial para consequências em que algo de valor humano (incluindo os seres humanos) está em jogo e o resultado é incerto. O risco é muitas vezes representado como probabilidade de ocorrência de eventos perigosos ou tendências, multiplicados pelas consequências se ocorrerem esses eventos (IPCC, 2014). Os riscos relacionados ao clima resultam da interação do perigo, incluindo evento perigoso e tendência, com a vulnerabilidade e exposição dos sistemas naturais e humanos. Assim, mudanças no sistema climático (variabilidade natural e antropogênica) e nos processos socioeconômicos (caminhos socioeconômicos, ações de adaptação e mitigação e governança) são *drivers* de perigo, exposição e vulnerabilidade (figura 2) (IPCC, 2014).

Figura 2 – Conceitos fundamentais da avaliação e gestão do risco



Fonte: Noble *et al.* (2014)

Nesse contexto, o processo de adaptação às mudanças climáticas abrange cinco estágios definidos em Provia, 2013:

- 1) **identificar as necessidades de adaptação:** que impactos podem ser esperados com as mudanças climáticas? Quais são as vulnerabilidades e capacidades dos atores? Quais decisões importantes precisam ser abordadas?
- 2) **identificar opções de adaptação:** como podem os riscos e as oportunidades que foram identificados serem geridos? Podem existir várias opções disponíveis para atingir os objetivos desejados.
- 3) **avaliar as opções de adaptação:** quais são os prós e contras das diferentes opções, quais melhor se adéquam aos objetivos da adaptação?
- 4) **planejar e implementar as ações de adaptação:** como as responsabilidades serão atribuídas? Quais estruturas institucionais serão criadas? Que ações serão tomadas?
- 5) **monitorar e avaliar a adaptação:** como será monitorada e avaliada, de forma a assegurar que está de acordo com o planejado? Como identificar eventuais problemas e mudar de rumo quando necessário? Quais lições poderão ser tiradas?

A identificação das necessidades de adaptação requer uma avaliação dos fatores que determinam a natureza e a vulnerabilidade aos riscos climáticos e uma avaliação das opções de adaptação para reduzir os riscos (FÜNFGELD; MCEVOY, 2011 *apud* IPCC, 2014a).

Como mencionado, essas avaliações são de extrema importância para a tomada de decisões sobre estratégias de adaptação a serem selecionadas, de forma a responder a futuras mudanças do clima (CARTER; MÄKINEN, 2011). No entanto, destaca-se as inúmeras dificuldades que existem no decorrer do processo, sendo a multidisciplinaridade, a seleção das abordagens, dos métodos e das ferramentas apropriados e, mais ainda, a forma de avaliação e comparação considerados três pilares de grande importância a serem observados na tentativa de aperfeiçoá-lo.

Exemplo concreto dessa importância é o compêndio de métodos e ferramentas para avaliar CCIAV da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima que vem sendo atualizado ao longo dos anos (UNFCCC, 2009).

A busca pela sistematização da avaliação se deu no início nos anos 1980, a partir da compilação de estudos apresentados em reuniões e *workshops* com a participação de diversos pesquisadores – modeladores, avaliadores de impacto, entre outros – que culminaram com a formação de estruturas de avaliação de impacto que são bastante difundidas na atualidade, tal como a apresentada na Conferência das Partes de 1995. Esta compreende sete passos de análise: definição do problema; seleção de métodos; teste de métodos; desenvolvimento de cenários de mudanças climáticas; avaliação dos potenciais impactos (biofísicos e socioeconômicos); avaliação de ajustes autônomos; e avaliação de estratégias de adaptação (CARTER; MÄKINEN, 2011).

Essa abordagem dominou as seções de avaliação dos três primeiros relatórios do IPCC e ficou conhecida como “abordagem padrão”, “de primeira geração” ou “tipo 1” (BURTON *et al.*, 2002 *apud* IPCC, 2014). É descrita como sendo *top-down*, pois combina o *downscaling* de cenários de modelos climáticos globais para a escala local, com uma sequência de etapas de análise, que se inicia com o sistema climático e percorre os impactos biofísicos e socioeconômicos (IPCC, 2007 *apud* IPCC, 2014).

Posteriormente, uma nova geração de estudos de impacto, baseadas em cenários climáticos, também surgiu, ligando ferramentas de análise biofísica, econômica e social (IPCC, 2014). A segunda geração de avaliação de vulnerabilidade e adaptação (BURTON *et al.*, 2002 *apud* IPCC, 2014), denominada de abordagem *bottom-up* (DESSAI; HULME, 2004 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011), surgiu para focar na vulnerabilidade para subsidiar à adaptação. A unidade é local (comunidades, por exemplo) e a escala temporal mais próxima do curto prazo (CARTER; MÄKINEN 2011).

As avaliações de vulnerabilidade focam no risco de danos causados por mudanças climáticas, buscando minimizar ou reverter possíveis perdas e maximizar benefícios (ADGER, 2006 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011). Ademais, têm sido dominadas pelo uso de indicadores e sua combinação em índices de vulnerabilidade.

Como visto, existem diferentes formas de se avaliar a vulnerabilidade, bem como de avaliar e comparar esses diferentes estudos, sendo a proposta por Polsky (2007) *apud* Carter e Mäkinen (2011) uma opção. Estes apresentaram um diagrama de escopo, identificando as dimensões comuns de vulnerabilidade (exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação), os componentes dessas dimensões (os atributos que os caracterizam para um determinado sistema humano-ambiente) e as medidas dos componentes (métricas quantitativas ou qualitativas que, individual ou coletivamente, descrevem a contribuição para a vulnerabilidade).

Críticas a essas avaliações têm se pautado no fato que indicadores podem oferecer somente uma medida relativa de vulnerabilidade (por exemplo: entre lugares ou períodos de tempo). Além de só servirem para identificar populações particularmente vulneráveis, regiões ou setores em uma escala local em que as unidades de exposição sejam estritamente definidas por algumas variáveis (HINKEL, 2011 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011).

A avaliação de adaptação é definida como a “prática de identificar opções para se adaptar às mudanças climáticas e avaliá-las em termos de critérios como disponibilidade, benefícios, custos, eficácia, eficiência e viabilidade” (IPCC, 2014). Essas opções podem ser classificadas em três grandes categorias: estrutural/física (engenharia e ambiente construído, tecnológica, baseada em ecossistemas e serviços), social (educacional, comportamental e informativa) e institucional (econômica, legislação e normas e políticas e programas de governo) (IPCC, 2014).

Normalmente, a avaliação de adaptação é uma etapa analítica integrante do processo de adaptação, para a qual não existe procedimento sistematizado, mas uma série de métodos e ferramentas que podem ser formais (análise multicritério e análise custo-benefício), deliberativos (método de elicitação) ou ainda intuitivos (baseado em experiências passadas) (PROVIA, 2013).

No que se refere à identificação das opções de adaptação, as avaliações de CCIAV do tipo *top-down* estimam os potenciais impactos para os cenários

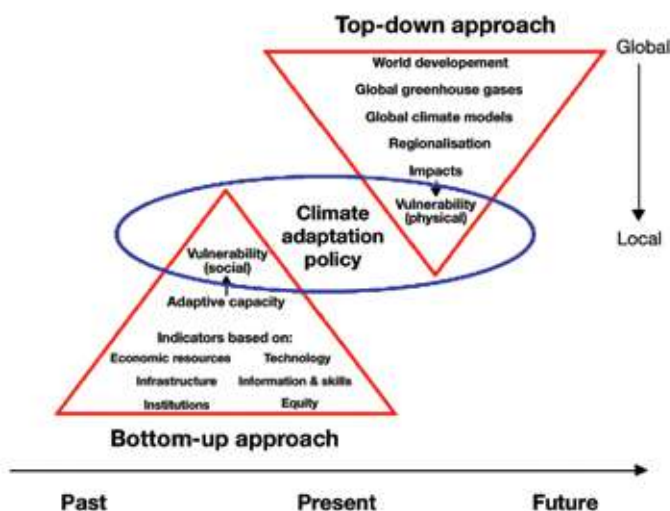
climáticos e, em seguida, consideram as possíveis respostas de adaptação com relação a esses impactos. Estas podem ser definidas ou não a partir da contribuição dos principais *stakeholders*. Raramente é realizado um levantamento abrangente de opções disponíveis e se relacionam muito mais com as projeções de mudanças climáticas de longo prazo do que com a variabilidade climática.

As opções de adaptação nas avaliações *bottom-up* são comumente voltadas para lidar com a variabilidade climática, a partir do levantamento realizado em conjunto com os principais interessados em um determinado setor ou região (CARTER; MÄKINEN, 2011).

Atualmente, as avaliações estão evoluindo e incluem abordagens *top-down* e *bottom-up*, abrangendo assim a avaliação dos riscos biofísicos das mudanças climáticas e os fatores que tornam as pessoas vulneráveis a estes riscos (IPCC, 2014).

Essas avaliações têm sido denominadas integradas, uma vez que buscam representar as interações complexas em escala espacial e temporal, entre processos e atividades (figura 3). Podem envolver o uso de um ou mais modelos matemáticos (de complexidade variada e aplicados separadamente, mas com saídas combinadas de diversas maneiras) ou um modelo único (*Integrated Assessment Models – IAMs*) que procura representar os principais fatores, setores, processos e *feedbacks* de interesse em um sistema interativo. Podem ainda representar um processo integrado de avaliação, ligando diferentes disciplinas e grupos de pessoas, muitas vezes usando a informação qualitativa ou semiquantitativa (CARTER *et al.*, 2007 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011). Portanto, nesse domínio de avaliações, três diferentes classes podem ser apontadas: modelos de avaliação integrada (IAMs), análise integrada baseada em modelos; e avaliação qualitativa integrada (CARTER; MÄKINEN, 2011).

Figura 3 – Abordagens *top-down* e *bottom-up*



Fonte: Carter e Mäkinen (2011)

Em consonância com a classificação elucidada anteriormente, o quarto relatório do IPCC apresenta uma classificação para as abordagens de CCIAV baseadas em quatro tipos: impactos, vulnerabilidade, adaptação e integrada. É sugerida também a gestão de riscos como uma alternativa que engloba os quatro tipos anteriores (CARTER *et al.*, 2007 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011).

A partir da alternativa sugerida, Carter *et al.* (2007), Jones e Preston (2011) *apud* Carter e Mäkinen (2011) concluem que as avaliações CCIAV, que evoluíram ao longo do tempo, poderiam se ajustar no contexto do processo de gestão de riscos. Baseada nessa premissa, a tabela 2 demonstra essa adequação.

Tabela 2 – Evolução da avaliação do risco climático desde a criação do IPCC em 1988

Avaliação	Questão política	Estágio da avaliação de risco	Abordagem metodológica	Exigência de cenário	Período
1ª Geração	Mudança climática é um problema?	A delimitação da questão, identificação do risco	Análise de sensibilidade	Cenários incrementais para as principais variáveis climáticas	1988–1992
2ª Geração	Quais são os potenciais impactos das mudanças climáticas não gerenciados?	Análise de risco	Avaliação de impacto dirigido ao cenário	Modelo climático derivado de cenários de múltiplas variáveis em escala global e regional	1988–2001
3ª Geração	Como é que podemos efetivamente nos adaptar às mudanças climáticas?	Análise de risco	Avaliação de risco Avaliação de vulnerabilidade	Modelo de cenários derivado para muitas variáveis, consistente com outros cenários, integração em uma variedade de escalas	1995–2007
4ª Geração	Quais as opções de adaptação são os mais eficazes?	Gestão de riscos	Gestão de riscos Integração da adaptação em políticas, planos e programas (PPP)	Cenários dinâmicos de clima e outros fatores-chave, probabilidades condicionais	2001– atual
5ª Geração	Será que estamos vendo os benefícios?	Implementação e monitoramento	Implementação, monitoramento e revisão	Atualizando cenários, por meio da observação e aprendendo fazendo	2007–atual

Fonte: Jones e Preston (2011) *apud* Carter e Mäkinen (2011)

No entanto, com as abordagens desenvolvidas sendo abrangidas numa estrutura de gestão de riscos, ainda permanece a dificuldade de seleção dos métodos e ferramentas apropriados – dentre os inúmeros disponíveis, para a operacionalização da adaptação –, bem como a compreensão dos resultados obtidos. Isso se deve ao fato, dentre outros, das abordagens se basearem em conceitos abstratos e ambíguos, como vulnerabilidade.

Apesar das dificuldades já elencadas para se avaliar as CCIAV, alguns autores têm proposto estruturas de análise e comparação de estudos, considerando questões-chave (CARTER; MÄKINEN, 2011; PRESTON *et al.*, 2011; HAMMILL *et al.*, 2013), como apresentadas a seguir.

No âmbito do projeto *Mediation*¹ da Comunidade Europeia (CE), Carter e Mäkinen (2011) descreveram uma possível classificação de avaliações CCIAV que compreende uma lista de atributos que precisam ser considerados em uma avaliação, a fim de alcançar os objetivos definidos pelos beneficiários do estudo. Para tal, realizaram uma revisão da maior parte das principais abordagens de CCIAV que pudessem ser adotadas em diferentes estudos e escalas na CE e a estrutura proposta para classificar as avaliações, de forma a subsidiar o processo de tomada de decisão. Essa classificação é apresentada no tabela 3.

¹ *Mediation (Methodology for Effective Decision-making on Impacts and Adaptation)* – Projeto da CE que tem por objetivo desenvolver uma metodologia integrada para apoiar as decisões políticas no domínio da adaptação às mudanças climáticas.

Tabela 3 – Elementos de uma estrutura de classificação proposta para avaliações CCIAV

Elemento	Descrição
Tipo de avaliação, audiência, propósito e alvo	
Nome do estudo	Nome completo e sigla.
Motivação da avaliação	A principal motivação da avaliação.
Ênfase da avaliação	Orientação principal da avaliação: riscos climáticos, adaptação ou análise de política global.
Beneficiários	O público-alvo pretendido e outras potenciais partes interessadas.
Abordagem	Abordagem principal de avaliação: vulnerabilidade, impacto, adaptação ou avaliação integrada.
Dimensões da avaliação	
Foco setorial/temática	Foco temático da avaliação, por exemplo, determinado setor, grupo ou comunidade populacional.
Região/escala espacial	Região e escala espacial para qual a análise é realizada e os resultados são válidos. Sempre que necessário, a resolução espacial aplicada.
Horizonte temporal e resolução	Se passado e perspectivas futuras estão incluídas; para estudos futuros, também período e resolução considerados na avaliação.
Métodos e participação	
Métodos e ferramentas	Métodos de análise específicos e ferramentas aplicadas na avaliação, bem como detalhes de sua aplicação.
Engajamento de <i>stakeholders</i>	Grupos de <i>stakeholders</i> -chave que formalmente influenciaram a avaliação.
Gestão da informação	
Dados e cenários	Dados e métodos utilizados para caracterizar o passado, presente e futuro em uma avaliação (por exemplo, para clima, uso do solo, meio ambiente, socioeconômica e condições tecnológicas).
Tratamento de incertezas	Técnicas utilizadas para abordar e representar diferentes fontes de incertezas.
Saídas da avaliação	
Métricas	Medidas/medições específicas e unidades em termos dos quais os resultados da avaliação são apresentados.
Apresentação dos resultados	Abordagem para exibir e documentar a informação de base, métodos, resultados e conclusões da avaliação para os usuários.
Documentações/publicações	Artigos revisados por pares, relatórios técnicos, outros relatórios e descrições na <i>web</i> .

Fonte: adaptado de Carter e Mäkinen (2011)

Destaque-se que a ênfase dessa avaliação surgiu do ajuste entre os quatro tipos de abordagens de CCIAV – baseada em impactos, vulnerabilidade, adaptação e de forma integrada – apresentada no quarto relatório do IPCC e o processo de gestão de risco² desenvolvido pelo Programa de Impactos Climáticos do Reino Unido (*UK Climate Impacts Programme – UKCIP*).

Assim, observou-se que as abordagens de avaliação de impactos e vulnerabilidades se concentram em avaliar os impactos climáticos e riscos associados, e que estes poderiam se conectar a fase estabelecida pelo UKCIP relativa à avaliação de risco climático. As abordagens de adaptação e a integrada, que, por sua vez, oferecem mais de uma ênfase de adaptação, poderiam ser ligadas às fases de avaliação das opções de adaptação. Portanto, sugeriram que houvesse uma dissociação e que fossem enfatizadas duas abordagens: em riscos da mudança climática e em adaptação à mudança climática.

Preston *et al.* (2011) fez uma revisão de 45 estudos, disponíveis na literatura (entre 1997 e 2009), de mapeamento de vulnerabilidade às mudanças climáticas que usaram alguma forma de visualização geográfica para representar a vulnerabilidade e(ou) seus determinantes espacialmente, considerando quatro questões-chave para o processo de avaliação:

- 1) quais são os objetivos da avaliação? Enfatizam a orientação do problema ou ações de adaptação para tomada de decisão?³
- 2) como é a avaliação da vulnerabilidade estruturada? Que aspectos dos sistemas são vulneráveis (vulnerabilidade de que)? Que fatores determinantes da vulnerabilidade são considerados (vulnerabilidade para quê)? Como são representadas as dinâmicas espacial, temporal e multiescala da vulnerabilidade?

² Esse processo fornece uma estrutura de apoio mais amplo para a tomada de decisão sobre a adaptação às mudanças climáticas em todo o ciclo de política, incluindo, portanto, as avaliações CCIAV e elementos adicionais relevantes para a tomada de decisão (WILLOWS; CONNELL, 2003 *apud* CARTER; MÄKINEN, 2011).

³ Orientação do problema e suporte à tomada de decisão – o primeiro tipo refere-se à compreensão da natureza do problema, incluindo não só relações de causa e efeito, mas também o contexto institucional e de governança no qual o problema se situa. O segundo envolve determinar porque uma estratégia de gestão é preferível para uma dada alternativa e como deve ser implementada (CLARK, 2002 *apud* PRESTON *et al.*, 2011).

- 3) quais são os métodos utilizados pela avaliação e mapeamento da vulnerabilidade? Como se lida com a incerteza e complexidade?
- 4) quem participa da avaliação e como os resultados são traduzidos em ações? Quem é responsável pela concepção e realização da análise espacial? Para quem se destina? Que esforços são feitos de forma a assegurar que a informação é apresentada de uma forma relevante e, posteriormente, interpretada de forma adequada? Quais são os processos pelos quais a avaliação da vulnerabilidade pode facilitar as respostas adaptativas?

No contexto do Inventário de Métodos de Adaptação às Mudanças Climáticas (IMACC),⁴ Hammill *et al.* (2013) procurou articular uma base conceitual comum e critérios analíticos para a condução de avaliação de vulnerabilidade, bem como fornecer recomendações práticas sobre escolha de métodos. Para tanto, apresentou uma estrutura de análise e comparação dos estudos de vulnerabilidades realizados em dois países, baseada em quatro componentes da avaliação de vulnerabilidade – concepção, entrada, saída e processo de condução –, conforme apresentada a seguir:

- 1) **concepção:** como a vulnerabilidade é compreendida, interpretada e definida:
 - a) definição de vulnerabilidade, incluindo seus componentes e como é sua configuração;
 - b) situação de vulnerabilidade sendo avaliada – o sistema, o atributo de preocupação, o perigo e o horizonte temporal;
 - c) a motivação e(ou) objetivo(s) da avaliação da vulnerabilidade, o que almeja alcançar;
 - d) o público-alvo para os resultados.

⁴ Iniciativa global que visa reduzir a confusão e incerteza em torno do planejamento de adaptação, financiada pelo Ministério Federal Alemão para o Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) e implementado pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) em colaboração com o Instituto Potsdam para a Pesquisa de Impactos Climáticos.

2) entrada: tipo de dados e informações:

- a) fonte de dados e informações;
- b) métodos e ferramentas usadas para coletar e analisar dados e informações;
- c) consideração de incerteza.

3) saída: as saídas e, se possível, os resultados da análise:

- a) produtos (por exemplo: mapas e tabelas);
- b) cadeias *ex-post* de impactos;
- c) limites identificados, onde aplicável;
- d) métricas/indicadores;
- e) resultados e recomendações.

4) processo: quem (*stakeholders*) participa e como (passos seguidos) se dá a avaliação:

- a) principais passos;
- b) atores, parceiros, instituições e seus papéis;
- c) nível de participação;
- d) coordenação.

Observou ainda que a estrutura definida poderia servir para a análise e comparação dos estudos de vulnerabilidades, mas também para:

- a) categorizar as principais questões que devem ser consideradas na concepção de uma avaliação de vulnerabilidade;
- b) definir e focar a análise;
- c) verificar as necessidades e lacunas de informação para a sua realização;
- d) identificar especialistas e outras partes interessadas que devem ser consultados;

- e) pensar sobre como o processo será coordenado e os resultados apresentados e comunicados;
- f) entender as semelhanças e diferenças na forma como a vulnerabilidade está sendo conceituada e avaliada.

No relatório de Hammil *et al.* (2013), ainda é possível observar outra proposição realizada pelos autores. A partir dos passos de avaliação de vulnerabilidade (AV), desenvolvidos por Schröter *et al.* (2005), elaborou-se um *link* com os quatro componentes da estrutura de análise e comparação desenvolvida, buscando, desta forma, se ter noção de onde e quando no processo estes componentes terão que ser definidos (tabela 4).

Tabela 4 – Passos da AV versus Componentes da AV

Passo da AV	Componente da AV
Definir área de estudo junto com os <i>stakeholders</i>	<p>Concepção: selecionar as escalas temporais e espaciais.</p> <p>Processo: iniciar engajamento e participação com colaboradores e beneficiários/usuários dos resultados de AV.</p> <p>Saída: pensar sobre os formatos em que os beneficiários/usuários devem receber os resultados, incluindo mensagens, linguagem/gíria e calendário.</p>
Conhecer o lugar ao longo do tempo	<p>Concepção: contexto do estudo para entender a dinâmica socioecológica que pode influenciar a vulnerabilidade.</p> <p>Entrada: recolher informação, por meio de revisões de literatura e consultas, sobre a dinâmica que pode influenciar a vulnerabilidade.</p> <p>Processo: continuar o engajamento com <i>stakeholders</i>.</p>
Hipotetizar sobre quem é vulnerável a que	<p>Concepção: selecionar o perigo climático que será analisado junto com as pessoas, os bens, serviços e(ou) ecossistemas que podem ser prejudicados pelo perigo identificado.</p> <p>Entrada: identificar os dados, informações, ferramentas analíticas, tempo e recursos financeiros necessários para empreender a análise.</p>

(continua)

Passo da AV	Componente da AV
Desenvolver um modelo causal de vulnerabilidade	<p>Concepção: elaborar um modelo explicando os fatores e as relações entre eles que levam a vulnerabilidade.</p> <p>Entrada: consulta.</p> <p>Processo: envolver os interessados no desenvolvimento, aperfeiçoamento e validação do modelo.</p>
Achar indicadores para os elementos da vulnerabilidade	<p>Entrada: métricas para caracterizar diferentes partes do modelo de causalidade.</p> <p>Processo: consultar as partes interessadas para sugestões sobre métricas; garantir que os indicadores sejam compreensíveis pelas partes interessadas; decidir sobre o que é quantificável e que deve ser omitido. Ou seja, a definição de vieses e limitações.</p>
Operacionalizar modelos de vulnerabilidade	<p>Entrada: ponderar e combinar indicadores para produzir uma medida de vulnerabilidade; sobrepor diferentes indicadores em um mapa.</p> <p>Processo: coordenação entre os pesquisadores; engajamento com as partes interessadas para validar medidas de vulnerabilidade.</p>
Projetar vulnerabilidade futura	<p>Entrada: cenários das variáveis de vulnerabilidade que refletem tendências e opinião de especialistas. Tornar clara a explicação de suposições e incertezas em torno dos cenários.</p> <p>Processo: validar os cenários com as partes interessadas apropriadas.</p>
Comunicar criativamente a vulnerabilidade	<p>Saída: produtos da AV, tais como relatórios, mapas, <i>sites</i>, fotos, vídeo/filme etc.</p> <p>Processo: comunicar as saídas para as partes interessadas com base em relacionamento e diálogo sustentado ao longo do processo AV.</p>

Fonte: Hammill *et al.* (2013)

Pelo referencial teórico exposto e as estruturas de análise e comparação de estudos, observa-se que todos convergem para as mesmas questões-chave. No entanto, considera-se a abordagem de Carter e Mäkinen (2011) mais voltada para CCIAV enquanto Preston *et al.* (2011) e Hammill *et al.* (2013), para avaliação de vulnerabilidade. A diferença se dá, basicamente, na definição da abordagem, uma vez que, na primeira, há um leque de quatro opções enquanto que, na última, uma só.

Neste estudo, considerou-se a estrutura proposta por Hammill *et al.* (2013) como base para o desenvolvimento da Avaliação de Estudos de Vulnerabilidade e Adaptação à Mudança do Clima nas Cidades Brasileiras. No entanto, foram realizadas algumas customizações, apreciando as demais metodologias e peculiaridades nacionais, de forma a ampliar o escopo da análise e permitir comparar estudos de avaliação de CCIAV no país.

A estrutura metodológica para a avaliação dos estudos de CCIAV das cidades brasileiras às mudanças climáticas pode ser apreciada na tabela 5, na qual estão descritos os componentes utilizados para esta avaliação.

Tabela 5 – Componentes de avaliação dos estudos de CCIAV no Brasil

1) Concepção Metodológica	Motivação, objetivo, tipo de avaliação, público-alvo e dimensões
Motivação e objetivo(s)	Conjunto de fatores que influenciaram a avaliação e o que se pretende alcançar.
Abordagem e conceituação	Abordagem principal de avaliação: vulnerabilidade, impacto, adaptação ou avaliação integrada. Definição dos principais conceitos.
Foco	Setorial, temático ou outro. Determinado setor, grupo ou comunidade.
Dimensão espacial	Região e escala espacial para qual a análise é realizada e os resultados são válidos. Sempre que necessário, a resolução aplicada.
Dimensão temporal	Inclui passado e(ou) perspectivas futuras. Para estudos futuros, também período considerado.
Beneficiários	O público-alvo pretendido e outras potenciais partes interessadas.
2) Processo	Quem participou e como se deu a avaliação
Etapas	Principais passos.
Engajamento de <i>stakeholders</i>	Atores, parceiros, instituições, seus papéis e nível de participação.
Coordenação	Quem coordenou.
3) Entrada	Tipo de dados e informações utilizadas
Cenários climáticos, projeções e resolução	Quais cenários, quais projeções adotadas e resolução considerada na avaliação.
Métodos e ferramentas de coleta e análise	Dados e métodos utilizados para caracterizar o passado, presente e futuro, por exemplo, clima, uso do solo, meio ambiente, social e econômico e condições tecnológicas.

(continua)

3) Entrada	Tipo de dados e informações utilizadas
Tratamento de incerteza	Técnicas utilizadas para abordar e representar diferentes fontes de incertezas.
4) Saída	As saídas e, se possível, os resultados da análise
Conhecimento produzido	Abordagem para exibir e documentar a informação de base, métodos, resultados e conclusões da avaliação para os usuários, como relatórios, mapas, <i>websites</i> etc.
Métricas/indicadores	Medidas/medições específicas e unidades em termos dos quais os resultados são apresentados.
Lacunas e limitações	Dificuldades e restrições encontradas para a execução do estudo.
Observações e recomendações	Entendimentos e indicações futuras.

Fonte: elaboração própria baseado em Hammill *et al.* (2013) e Carter e Mäkinen (2011).

2.2 Descrição dos estudos

Diferentes estudos acadêmicos envolvendo mudanças climáticas têm sido desenvolvidos no país. No entanto, ainda há um hiato entre o saber científico e o processo de tomada de decisão governamental, principalmente, no que se refere à apropriação desse conhecimento científico produzido no planejamento e gestão das cidades. Portanto, torna-se urgente melhorar a comunicação entre o tomador de decisão e a academia para o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas que não podem mais ser evitados.

Algumas cidades, vislumbrando essa necessidade de enfrentamento, iniciaram ou realizaram algum tipo de estudo. Após a realização de pesquisa nos portais municipais, e respectivas secretarias de meio ambiente, além de consultar partes interessadas em mudanças climáticas no país entre julho e outubro de 2014, foi possível identificar oito estudos relativos à mudança climática e vulnerabilidade:

- 1) Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba;
- 2) *Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean cities – Complete Report: Santos, Brazil;*

- 3) Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais;
- 4) Estudo Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Região Metropolitana de São Paulo;
- 5) Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente;
- 6) Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia (Relatório Final – Contrato de Serviços Técnicos de Consultoria Nº 01/2012);
- 7) Plano de Ação João Pessoa Sustentável;
- 8) Plano Estadual de Mudanças Climáticas de Pernambuco.

Como visto na lista elencada, a área de abrangência territorial não se limitou às fronteiras de uma cidade, como no caso dos estudos da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e dos estados do Rio de Janeiro (RJ) e de Minas Gerais (MG). Além disso, os estudos de João Pessoa/PB e Pernambuco (PE), até o momento do desenvolvimento do relatório para Terceira Comunicação, não estavam concluídos ou não apresentavam os elementos necessários à avaliação, de acordo com a metodologia proposta.

Apesar de não ser feita uma análise desses dois planos, seguindo a metodologia aplicada ao estudo, estes foram citados, pois, certamente, podem agregar valor ao futuro desenvolvimento de planos e ações de enfrentamento às mudanças climáticas no país.

Cabe ressaltar que houve dificuldade na obtenção de dados para cumprimento dos objetivos pretendidos com o estudo de subsídio a Terceira Comunicação Nacional, uma vez que há uma fraca divulgação do material, de cunho climático, produzido pelas cidades. Assim, por muitas vezes, não há conhecimento, por parte de terceiros, do que está sendo estudado e realizado nesse campo. Em outros casos, apesar de existirem os dados, encontra-se uma barreira no acesso e obtenção desse material.

3 Resultados

Os seis estudos de CCIAV brasileiros foram avaliados, de acordo com a estrutura metodológica descrita na tabela 5, e os resultados da avaliação são apresentados, de forma agregada, para cada um dos quatro componentes: concepção metodológica; processo; entrada; e saída.

A síntese das informações relativas a cada um dos quatro componentes é apresentada nas tabelas 6 a 9.

Em seguida, no subitem 3.5, serão apresentados sucintamente os resultados de cada estudo, no que tange o apontamento e compreensão das vulnerabilidades de cada localidade frente às alterações climáticas. A disposição das informações se dá de acordo com a lista apontada no subitem 2.2 (Descrição dos estudos).

3.1 Concepção metodológica

Todos os estudos, com exceção do caso do RJ, foram motivados e fomentados por iniciativas globais voltadas especificamente para adaptação às mudanças climáticas ou para adaptação às mudanças climáticas no contexto da sustentabilidade.

Como objetivo, os estudos permearam desde a identificação das suas vulnerabilidades às mudanças climáticas até a determinação de quais são as ações de adaptação pertinentes. Os estudos de Curitiba/PR, Goiânia/GO e de MG e RJ foram desenvolvidos visando à orientação do problema – identificando os impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas específicos – e ao suporte à tomada de decisão – identificando áreas vulneráveis, setores e as opções de adaptação necessárias. Os demais estudos, além de identificar o problema, determinaram porque uma estratégia de gestão é preferível para uma dada alternativa e como deve ser implementada, estando de acordo com o proposto por Clark (2002) *apud* Preston *et al* (2011).

A abordagem dos estudos curitibano, goiano, mineiro e fluminense foi baseada em um estudo de vulnerabilidade. A exceção foram os estudos santista e paulistano, que adotaram uma abordagem de avaliação integrada.

Em relação aos conceitos, quase todos os estudos levam em consideração as definições de vulnerabilidade e seus componentes adotados pelo IPCC. No entanto, dada a sua data de publicação, as definições adotadas ainda se baseiam no conceito dos relatórios anteriores, como por exemplo, o AR4 de 2007.

Em relação ao foco, pode-se identificar que todos focaram na análise da vulnerabilidade de seu território. Há uma variação em relação ao foco específico, tendo o estudo de Curitiba centrado nos setores econômicos (principalmente, transporte), nas infraestruturas e na localização das populações mais vulneráveis. MG não se aprofunda em um setor em particular e agrega a questão de seus recursos naturais à sua análise. Os estudos de Santos e da RMSP analisaram a questão das inundações e dos deslizamento de terra em seu território. A RMSP ainda realizou uma análise no âmbito da saúde. Já os estudos de RJ e de Goiânia também focam em uma análise

Tabela 6 – Síntese das informações

Informações Básicas	Nome do Estudo	Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba	<i>Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean cities – Complete Report: Santos, Brazil</i>
	Data de Publicação	2014	2012
Concepção Metodológica	Motivação e objetivo(s)	<ul style="list-style-type: none"> * No âmbito do projeto da ANTP * Orientação do ações preventivas das políticas públicas * Servir de modelo para outras cidades 	<ul style="list-style-type: none"> * No âmbito do Projeto de Planejamento de Adaptação às MC em Cidades da AL e Caribe do Banco Mundial * Fortalecer a capacidade de adaptação local e aumentar a resiliência urbana

territorial, porém dando ênfase aos componentes socioeconômico e ambiental. O RJ ainda agrega a questão da saúde, enquanto Goiânia abarca a questão da infraestrutura da cidade.

Para a dimensão territorial, têm-se dois estudos voltados para a região metropolitana, São Paulo e Curitiba (exceto as análises socioeconômicas, que foram somente dentro dos limites da cidade). Os estudos de Santos e Goiânia se limitaram a seu território municipal. MG e RJ fizeram estudos para o seu perímetro estadual (setores de planejamento e municípios, respectivamente).

Os períodos de avaliação utilizados pelos estudos foram distintos variando desde 1960, para análises pretéritas, até 2100, para projeções climáticas, sendo realizada também análise para o período atual. A tabela 6 apresenta a síntese das informações desse componente da avaliação.

de concepção metodológica

Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais	Estudo de Vulnerabilidade da Região Metropolitana de São Paulo	Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente	Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia
2014	2011	2011	2012
<p>* No âmbito do Projeto de construção diagnóstico do Plano de Energia e Mudanças Climáticas (PEMC)</p> <p>* Definir em que medida o estado de Minas Gerais é e pode ser afetado pelas MC</p>	<p>* Fomentar a discussão das questões climáticas na política e nos programas nacionais tanto de ordem pública quanto privada</p> <p>* Promover a identificação dos impactos das mudanças climáticas na incidência de desastres naturais e na saúde na RMSP</p>	<p>* Apoiar o governo estadual e os 92 governos municipais em seu planejamento de alocação de recursos para avaliação de impactos e para planos de adaptação às MC</p> <p>* Construir metodologia com o intuito de sintetizar, os aspectos ambientais, sociais e de saúde humana sensíveis às variações climáticas</p>	<p>* No âmbito da Iniciativa das Cidades Emergentes e Sustentáveis do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID)</p> <p>* Identificação das áreas mais expostas da cidade</p>

(continua)

	Abordagem e conceitos	<p>* Estudo de vulnerabilidade – analisado risco, área afetada, impacto, setor vulnerável</p> <p>* Conceito de vulnerabilidade do AR4 (identificada de forma subentendida)</p>	<p>* Avaliação integrada – estudo de vulnerabilidade – analisado as três dimensões: exposição; sensibilidade e capacidade de adaptação; e de adaptação</p> <p>* Terminologia UNISDR (2009)</p>
Concepção Metodológica	Foco	<p>* Análise centrada nos setores econômicos, nas infraestruturas e na localização das populações mais vulneráveis, dando ênfase ao setor de transporte</p>	<p>* Análise da questão das inundações e deslizamento de terra em seu território</p>
	Dimensão espacial	<p>* Cidade de Curitiba e sua Região Metropolitana</p>	<p>* Território santista, focando na parte urbana (área insular)</p>
	Dimensão temporal	<p>* Socioeconômica foi feita para um período atual (1960–2008). Informações de 1960 até 1990 e projeções climáticas até 2100 para a análise de dados climáticos</p>	<p>* Horizonte temporal de 2040 para suas análises futuras no que tange o cenário climático e 2020 para a análise de crescimento da população, para as análises pretéritas e atuais foram utilizados dados desde 1940 dependendo da análise realizada</p>
	Beneficiários	<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>	<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>

Fonte: elaboração própria

<p>* Estudo de vulnerabilidade – analisado as três dimensões: exposição; sensibilidade; e capacidade e de adaptação</p> <p>* Conceito de vulnerabilidade do AR4</p>	<p>* Avaliação integrada – estudo de vulnerabilidade – analisado risco, área afetada, impacto, setor vulnerável; e de adaptação</p> <p>* Conceito de vulnerabilidade Cutter (2003) (subentendido)</p>	<p>* Estudo de vulnerabilidade – analisado as três dimensões: exposição; sensibilidade; e capacidade e de adaptação</p> <p>* Conceito de vulnerabilidade do AR4</p>	<p>* Estudo de vulnerabilidade – analisado as três dimensões: exposição; sensibilidade; e capacidade e de adaptação</p> <p>* Avaliação de risco</p> <p>* Conceito de vulnerabilidade do AR4</p>
<p>* Análise centrada nos setores econômicos e seus recursos naturais</p>	<p>* Análise da questão das inundações e deslizamento de terra em seu território e na questão da saúde na RMSP</p>	<p>* Análise territorial, dando ênfase aos componentes socioeconômico e ambiental, agregando a questão da saúde</p>	<p>* Análise territorial, dando ênfase aos componentes socioeconômico e ambiental, agregando a questão da infraestrutura da cidade</p>
<p>* Território mineiro, analisado por área de planejamento</p>	<p>* Região Metropolitana de São Paulo</p>	<p>* Território fluminense, macrorregiões e municípios</p>	<p>* Cidade de Goiânia</p>
<p>* Horizonte temporal variado, dependendo da análise feita, indo de 1978 para análises pretéritas até 2100 para as projeções climáticas</p>	<p>* Horizonte dados de tendências climáticas até 2100, realizadas projeções para 2030 para a mancha urbana e avaliações de impacto de possíveis extremos climáticos para 2030–2050 tendo em vista o aumento de chuvas e o crescimento de GEE</p>	<p>* Horizontes temporais vulnerabilidade no presente (1961–1990) e vulnerabilidade de cenários climáticos para 2011–2040</p>	<p>* Horizonte temporal atual (2012) e projeções climáticas para 2020</p>
<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>	<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>	<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>	<p>* Governos locais e seus tomadores de decisão</p>

Tabela 7 – Síntese das

Informações Básicas	Nome do Estudo	Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba	<i>Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean Cities – Complete Report: Santos, Brazil</i>
	Data de Publicação	2014	2012
Processos	Etapas	<ul style="list-style-type: none"> * Levantamento de dados e informações de diferentes parâmetros para as análises ambientais e sociais * Utilização de cenários climáticos para obtenção de projeções futuras; * Caracterização da cidade considerando blocos temáticos; * Desenvolvimento de matriz de análise de risco * Gerenciamento de risco * Enumeração de políticas públicas * Análises de áreas prioritárias 	<ul style="list-style-type: none"> * Definição de escopo, que se deu por intermédio de visita de campo e um breve diagnóstico realizado pelos consultores da equipe * Realização de avaliação dos perigos relacionados com o clima focada em enchentes e deslizamentos de terra, da capacidade de adaptação urbana, social e econômica, da capacidade de adaptação institucional, e da vulnerabilidade relacionada com o clima * <i>Workshop</i> para a validação e recebimento de feedback de diferentes <i>stakeholders</i> e a elaboração do plano estratégico de fortalecimento institucional e de investimento em adaptação climática

informações de processo

Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais	Estudo de Vulnerabilidade da Região Metropolitana de São Paulo	Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente	Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia
2014	2011	2011	2012
<ul style="list-style-type: none"> * Discussão com o Comitê Técnico do PEMC * Realização de um diagnóstico abrangente de fatores social, econômicos, ambientais, climáticos * Identificação de setores e recursos mais sensíveis às MC * Identificação dos fatores climáticos * Definição dos fatores da vulnerabilidade: sensibilidade, exposição e capacidade de adaptação; * Identificação de indicadores para cada fator * Avaliação da vulnerabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> * Organização de uma equipe técnica * Construção de uma base de dados georreferenciados de diferentes informações * Realização do primeiro painel de discussão * Criação de dois de GTs * Geração de mapas temáticos para fomentaram as discussões * Geração de relatórios e propostas submetidos a uma plenária * Discussão em uma plenária * Produção de um relatório preliminar * Levantamento de diagnóstico da RMS e dos aspectos de vulnerabilidade * Levantamento de dados climáticos e realização de projeções * Elaboração de cenário de riscos e possíveis impactos para determinados fatores * Proposição de medidas de adaptação * Apresentação do relatório em plenária final 	<ul style="list-style-type: none"> * Definição de termo de referência para a contratação do estudo a partir da Lei nº 5.690/2010 * Levantamento de indicadores – social, ambiental e econômico, que refletem os três componentes da vulnerabilidade – para a construção dos índices * Levantamento do indicadores para a elaboração de cenários climáticos * Construção de um índice de vulnerabilidade municipal * Realização de reuniões mensais entre as equipes de coordenação para produção dos relatórios * Realização de dois <i>workshops</i> para a validação dos dados gerados * Realização de consulta pública 	<ul style="list-style-type: none"> * Análises prévias do cenário que a cidade se encontra, com base no setor censitário * Realização de projeções climáticas * Análises dos indicadores compostos – exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação * Cálculo Índice de Vulnerabilidade * Avaliação de risco

(continua)

	Engajamento dos stakeholders	* Participação ativa das partes interessadas no processo de definição dos níveis gravidade no processo da realização da matriz de risco	* Participação ativa das partes interessadas em diferentes momentos do estudo, respondendo questionários e participando de <i>workshop</i>
	Coordenação	* O estudo foi contratado pela ANTP em parceria com o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) e conduzido pelo SNC-Lavalin Projetos Ltda.	* O estudo foi contratado pelo Banco Mundial, por meio de sua Unidade de Gestão de Risco de Desastres e Setor Urbano da Região da América Latina e do Caribe e foi conduzida pela equipe da ICF-GHK em associação com <i>King's College London</i> e Grupo Laera

Fonte: elaboração própria

3.2 Processos

Alguns estudos apresentam todas as informações, apontando como foi o processo de definição de escopo, quais foram as fontes consultadas, qual foi a necessidade e a motivação de realização de grupos de estudo e *workshop*. Pontuando ainda as etapas de elaboração da avaliação, tais como: levantamento de dados, produção de diagnóstico da área e identificação de indicadores. O estudo de Santos, da RMSP e do RJ descreveram as etapas do processo e da avaliação. Os estudos de Curitiba, Minas Gerais e Goiânia não apresentaram como se deu o processo de elaboração, apontando somente as etapas da avaliação CCIAV realizadas para cada caso.

Com exceção do estudo de Goiânia, todos apresentaram a forma de engajamento dos *stakeholders* em algum momento da realização do estudo.

* O estudo menciona apenas a colaboração das instituições públicas consultadas para obtenção de informações	* Participação de quatro grupos principais de partes interessadas nos painéis: a equipe técnica, especialistas nacionais na área climática e afins, gestores e tomadores de decisão e especialistas	* O engajamento dos <i>stakeholder</i> se deu nos dois <i>workshops</i> realizados, nos quais apresentaram sugestões para melhoria do estudo assim como para futuros planos de adaptação	* Não é mencionado
* O estudo foi contratado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (Feam) e foi conduzido pelas consultoras Enviroconsult e EcoResources	O estudo foi coordenado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CSST/INPE) e pelo Núcleo de Estudos de População “Elza Berquó” da Universidade Estadual de Campinas (Nepo/Unicamp)	** O estudo foi contratado pela Secretaria de Estado do Ambiente do RJ coordenado pela Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)	* O estudo foi contratado pelo BID conduzido pela consultoria da <i>WayCarbon</i>

Apenas Curitiba apresenta a participação das partes interessadas na realização da avaliação. Os demais apontam apenas participação no processo de desenvolvimento do estudo. Destaque-se que o estudo de Minas Gerais vislumbra ainda participação maior dos *stakeholders* no momento que o PEMC for submetido para o público em geral.

Diferentes instituições estiveram à frente dos estudos. A coordenação foi realizada por bancos internacionais, agências nacionais, institutos de pesquisa e universidades. Essa diversificação demonstra que o conhecimento e a produção de estudos no campo das mudanças climáticas podem extrapolar, em muito, o campo acadêmico. A tabela 7 apresenta a síntese das informações desse componente da avaliação.

Tabela 8 – Síntese das

Informações Básicas	Nome do Estudo	Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba	<i>Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean Cities – Complete Report: Santos, Brazil</i>
	Data de Publicação	2014	2012
3. Entrada	Cenários, projeções e resoluções	<p>*Climático: global A1B e A2; regional: A2 e B2</p> <p>* Com resolução dos modelos globais da ordem de 300–400 km; modelos regionais de 10–50 km</p>	<p>* Climático: B1 e A2; regional para eventos extremos A1B</p> <p>* Com resolução do modelo de 1 km</p>
	Métodos e ferramentas de coleta e análise	<p>* Bancos de dados IPPUC e Águas do Paraná</p> <p>* Modelos climáticos: CGCM3 e para o regional HadRM3P, com os dados observacionais sendo retirados do <i>Climate Research Unit</i> (CRU);</p> <p>* Interpolações de dados</p> <p>* Modelo hidrológico HEC-HMS (<i>Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System</i>), versão 3.5</p>	<p>* Modelo climático: <i>Climate Wizard</i></p> <p>* Modelo regional para eventos extremos de precipitação: Eta-CPTEC/HadCM3</p> <p>* Projeções de elevação do nível do mar estimadas de acordo com NRC, 2010</p>

informações de entrada

Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais	Estudo de Vulnerabilidade da Região Metropolitana de São Paulo	Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente	Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia
2014	2011	2011	2012
<p>* Climático: regional A2 e B2</p> <p>* Dados de resolução não informados</p>	<p>* Climático: A1B</p> <p>* Projeção mancha urbana por meio de sensoriamento remoto</p> <p>* Com resolução do modelo regional de 40 km</p>	<p>* Climático: A1FI e A1T</p> <p>* Com resolução do modelo regional de 40 km</p>	<p>* Climático: A1B</p> <p>* Análise de planos futuros de desenvolvimento da região</p> <p>* Dados de resolução não informados</p>
<p>* Modelo climático: regional Precis</p>	<p>* Criação de banco de dados</p> <p>* Modelo climático: regional Eta-CPTEC</p> <p>* Eventos pluviométricos severos: Modelo <i>Hand</i> a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT)</p> <p>* Análise qualitativa para deslizamento de terra</p> <p>* Organização de Painéis de Especialistas</p>	<p>* Modelo climático: regional Eta-HadCM3</p> <p>* Para interpolação de dados: <i>software ArcView v.3.2</i></p> <p>* Tratamento de dados de precipitação e temperatura: <i>Inverse Distance Weighted (IWD)</i></p>	<p>Banco de dados Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet)</p> <p>* Modelo Climático: Eta-CPETEC/HAdCM3 e para definição de eventos extremos o Precis</p> <p>* Dados de temperatura foram espacializados utilizando as informações do sensor ETM Landsat em 2011</p>

(continua)

	Tratamento de incerteza	* As incertezas são consideradas e conduzidas nas projeções	<ul style="list-style-type: none"> * Realização da média de um conjunto de 15 modelos climáticos para a diminuir a incerteza relacionada com as projeções * Utilização de dois cenários para a diminuição das incertezas das projeções * Para reduzir a incerteza das variabilidades do clima são utilizadas médias de 30 anos * Consideração e tratamento das incertezas na escolha da medida de adaptação – a robustez
--	-------------------------	---	--

Fonte: elaboração própria

3.3 Entrada

Os cenários futuros e projeções foram descritas utilizando as projeções climáticas baseadas no *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) do IPCC (tabela 8).

Além das projeções e dos cenários climáticos, os estudos da RMSP e de Goiânia também fizeram uso de outras abordagens. O da RMSP projetou a mancha urbana, utilizando-se de imagens de sensoriamento remoto, enquanto Goiânia fez uma análise de planos futuros de desenvolvimento da região.

Ao longo das apreciações, observou-se que os modelos regionalizados foram os mais utilizados. Os estudos de Santos, da RMSP, do RJ e de Goiânia utilizaram o modelo baseado no *Hadley Center* e regionalizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE. Curitiba e MG utilizaram o modelo Precip e seus derivados. Goiânia utiliza ambos os modelos para diferentes análises.

* O texto não menciona como trata as incertezas	* As incertezas são consideradas e conduzidas nas projeções	* As incertezas são consideradas e conduzidas nas projeções e no momento de coleta de dados	* As incertezas são consideradas e conduzidas nas projeções e no momento de coleta de dados
---	---	---	---

Alguns estudos se diferenciaram por agregaram informações mais específicas às suas análises. Curitiba, por exemplo, fez análises com modelo hidrológico HEC-HMS. O estudo da RMSP utilizou o modelo digital de terreno *Hand*. Santos fez análises de projeções de elevação do nível do mar, de acordo com a metodologia prevista em *National Research Council* (2010).

A resolução dos estudos em muito se diferenciam, variando de análises de 1 km a 400 km.

No que se refere a incertezas, pode se dizer que existem três principais fontes de incerteza na simulação de modelos climáticos: a variabilidade natural – imprevisibilidade da natureza do sistema; a incerteza do modelo – habilidade para modelar com precisão os complexos processos terrestres; e a incerteza do cenário. Alguns estudos buscaram diminuí-las.

O estudo realizado para a cidade santista explicitou, em seu texto, como trabalhou as incertezas nas avaliações nas projeções climáticas e na seleção

das medidas de adaptação. Os estudos de Curitiba e da RMSP reportaram terem considerado e conduzido as incertezas somente nas projeções climáticas. São Paulo ainda descreve ter feito esse processo de forma qualitativa. Goiânia apontou a mesma situação para as projeções climáticas e também para a coleta de dados. Os outros estudos sequer mencionam qual o tratamento dado às incertezas geradas em suas análises. A tabela 8 apresenta a síntese das informações deste componente da avaliação.

3.4 Saída

Como conhecimento produzido pôde-se notar, em todos os estudos, a elaboração de mapas e tabelas que colaboram para a melhor interpretação das informações de vulnerabilidade e que serão apresentados no subitem 3.5.

Foram feitos também diagnósticos das regiões, produção de banco de dados, identificação dos principais desafios das regiões, propostas de ação e políticas

Tabela 9 – Síntese das

Informações Básicas	Nome do Estudo	Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba	<i>Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean Cities – Complete Report: Santos, Brazil</i>
	Data de Publicação	2014	2012
3. Saída	Conhecimento produzido	<ul style="list-style-type: none"> * Mapas e tabelas com as análises de vulnerabilidade do sistema ambiental, social e construído * Propostas de políticas públicas, áreas prioritárias para serem desenvolvidas e uma análise de investimento 	<ul style="list-style-type: none"> * Plano Estratégico de Fortalecimento Institucional e de Investimento em Adaptação Climática * Mapas com os resultados da avaliação da vulnerabilidade apresentados para bairros, equipamentos urbanos e infraestrutura crítica

públicas. Santos ainda preparou um Plano Estratégico de Fortalecimento Institucional e de Investimento em Adaptação Climática.

Observou-se que os estudos de MG, do RJ e de Goiânia utilizaram indicadores para a composição de índices de vulnerabilidade e análise de risco – esta última, mais especificamente, para o caso goiano.

Os outros três estudos não utilizaram indicadores, mas mostram similaridades ao fazerem uma análise análoga para alguns fatores físicos, tais como análises de alterações no que se refere a enchentes, inundações e deslizamento/erosão terrestre.

Os casos paulistano e o do RJ, por exemplo, acrescentaram, em suas análises, avaliações relacionadas à questão da saúde. O estudo de Curitiba elaborou uma análise que tanto analisou as políticas públicas sugeridas ao final do estudo quanto procurou formas de conduzir as futuras ações a serem tomadas pelo governo.

informações de saída

Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais	Estudo de Vulnerabilidade da Região Metropolitana de São Paulo	Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente	Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia
2014	2011	2011	2012
<p>Mapas identificando as regiões de maior vulnerabilidades às MC</p> <p>* Tabela contendo principais desafios regionais em relação às MC</p> <p>* Definição de cinco eixos de intervenção prioritárias para a discussão no âmbito do PEMC e para definir estratégias de ação</p>	<p>* Banco de dados consolidando a informação em único local de acesso público</p> <p>* Mapas identificando as vulnerabilidades</p> <p>* Matrizes com o desencadeamento de propostas de ação para a região</p>	<p>* Mapa de vulnerabilidade às mudanças climáticas dos 92 municípios e das macrorregiões do ERJ</p> <p>* Identificação de <i>hotspot</i></p> <p>* Implementação de uma metodologia específica com <i>ranking</i> municipal de vulnerabilidade climática</p>	<p>* Mapas demonstrando as vulnerabilidades da cidade por setor censitário (2012 e em 2020) e distrital (2012)</p> <p>* Mapas de risco de: alagamento; deslizamento; erosão; incêndio; abastecimento</p>

(continua)

3. Saída	Métricas/indicadores	<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: mudança de temperatura e precipitação * Fatores Físicos: alteração do potencial de erosão, aumento da impermeabilização nas bacias e sub-bacias modeladas, evolução do escoamento superficial das águas pluviais decorrente dessa impermeabilização, e identificação do potencial e da extensão das áreas sujeitas a inundações * Políticas públicas avaliada segundo as três problemáticas: emissão de carbono e uso de energia; riscos climáticos e riscos de falta de recurso e do ecossistema 	<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: mudança de temperatura, precipitação e elevação do nível do mar * Fatores físicos: aumento projetado na exposição frente: enchente, inundação e deslizamento de terra nas áreas mais vulneráveis
	Lacunas e limitações	<ul style="list-style-type: none"> * Não foram identificados 	<ul style="list-style-type: none"> * Projeções futuras de precipitação extrema estão associados a um alto nível de incerteza devido a utilização de um único modelo climático regionalizado * Limiares de precipitação e inundação relevantes não estão disponíveis * Não existência de dados de maré das estações da baía de Santos aferidas corretamente * Não considera alguns fatores relevantes que afetam a elevação do nível do mar * Ausência de dados para avaliação do risco de deslizamento de terra

<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: aumento da temperatura e alteração no regime de chuvas * Índice de vulnerabilidade regional * Índice Sensibilidade: alteração nos fatores econômicos, sociais, ambientais e climáticos e * Índice Exposição: alteração no impacto econômico, social, ambiental e climático; * Índice Capacidade adaptação: alteração potencial institucional e Índice de Desenvolvimento Humano 	<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: mudança temperatura e precipitação *Vulneráveis ao risco de enchente e inundação: alteração características geomorfológicas, geológicas e hidrológicas presentes na RMSP, alteração nas intervenções antrópicas em seus cursos d'água e diversidade de formas de uso e ocupação de seus terrenos * Vulnerabilidade ao risco de deslizamento de terra: alteração na distribuição de chuvas, classes de declividade e categoria de uso do solo * Vulnerabilidade à doença respiratória: aumento na concentração de poluentes atmosféricos; * Vulnerabilidade à leptospirose: número de eventos de enchente 	<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: Índice de cenário climática (ICC) – anomalias climáticas (precipitação e temperatura) * Índice de Vulnerabilidade Global ponderado (IVGp) = índice de vulnerabilidade ambiental ponderado (IVAp) + IVSFp (índice de vulnerabilidade social da família ponderado + índice de vulnerabilidade da saúde ponderado (IVSp)) * ICC+ IVGp = índice de vulnerabilidade municipal ponderado (IVMp) 	<ul style="list-style-type: none"> * Mudança climática: mudança de temperatura e precipitação * Vulnerabilidade (decomposto pelos três componentes): indicador composto de exposição passada, sensibilidade e capacidade de adaptação * Risco: Vulnerabilidade; Perigo aos extremos climáticos (longas estiagens, aumento das temperaturas médias, redução das precipitações cumulativas anuais, precipitações breves e intensas) e exposição (população e valor econômico)
<ul style="list-style-type: none"> * Não foram mencionadas no relatório limitações gerais em relação à elaboração do estudo * Ressaltou-se apenas uma atenção especial necessária à questão da biodiversidade 	<ul style="list-style-type: none"> * Escalas dos modelos climáticos não são compatíveis com as escalas urbanas * Insuficiência de equipamentos meteorológicos * Necessidade da elaboração de modelos hidrológicos * Descontinuidade na séries históricas de dados climáticos * Insiplência de estudos relacionados ao processo de ocupação e produção dos espaços urbanos e sua eficiência climática 	<ul style="list-style-type: none"> * Utilização de dados desatualizados: exemplo dados do censo 2000, únicos disponíveis na época (já foi recentemente atualizado com dados do censo 2010) * Lacuna na obtenção de dados municipais * Dificuldade na interpretação de dados 	<ul style="list-style-type: none"> * Lacuna na obtenção de dados * Ausência de confiabilidade nas diferentes fontes * Influência nos resultados das projeções para 2020 – projeções geodemografias, econômicas e institucional inalteradas

(continua)

Conclusões e recomendações

* O estudo de Curitiba apresenta uma visão das vulnerabilidades da cidade associadas a erosão e inundações. Após serem feitas análises, como descritas anteriormente, foram produzidos mapas e tabelas que contribuem para a análise

* Sugestão de políticas públicas a ações prioritárias. Todo esse processo pode servir de ajuda ao tomador de decisão para uma melhor implementação de políticas de enfrentamento climático

* Recomenda-se que sejam feitos investimento no transportes públicos visando contribuir para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa

* O plano apresenta uma visão geral das medidas que a cidade pode implementar para melhorar a gestão do risco de desastres e planejamento de adaptação

* Santos possui inúmeras características de planejamento, políticas e institucional que favorecem a cidade no campo do enfrentamento às mudanças climática

* No entanto, necessidade de compreender as relações entre o desenvolvimento urbano convencional e a adaptação às mudanças climáticas é fundamental na redução da vulnerabilidade relacionada com o clima

Fonte: elaboração própria

É possível observar que muitos estudos climáticos apresentam algumas lacunas e limitações. Percebeu-se que a questão da aquisição de dados e da confiabilidade das fontes foram questões recorrentes e de grande importância para todos os estudos.

As conclusões e as recomendações dos estudos apresentaram uma grande similaridade no seu enfoque quanto à apresentação dos resultados. Apontaram as suas maiores vulnerabilidades e recomendaram ações futuras com intuito de complementar as análises ou, mesmo, incentivar a realização de outros estudos. A tabela 9 apresenta a síntese das informações desse componente da avaliação.

<p>* A análise dos desafios identificados para o estado por meio do estudo permitiu propor cinco eixos de trabalho prioritários para discussão no âmbito do PEMC de Minas Gerais e para a composição da estratégia de ações para a adaptação do estado às mudanças climáticas: recursos hídricos, agropecuária, biodiversidade, capacidade institucional e saúde humana</p>	<p>* Identificação dos impactos das MC na incidência de desastres naturais e na saúde, tendo como cenário de fundo a continuada expansão urbana</p> <p>* Projeções indicam aumento dos riscos de desastres naturais atingindo cada vez mais a população principalmente os mais vulneráveis</p> <p>* Uso de modelos mais apropriados para a elaboração de projeções possibilitando um maior conhecimento do processo de ocupação e produção dos espaços urbanos e sua eficiência climática</p>	<p>* Visão abrangente e multissetorial da vulnerabilidade municipal – dentro dos componentes da vulnerabilidade – do estado do RJ</p> <p>* Possibilidade de usar os indicadores como apoio para a tomada de decisão em diferentes setores dentro do estado</p> <p>* Buscou-se um equilíbrio entre a representatividade, o número de indicadores e a facilidade de manuseio destes</p> <p>* Recomenda-se maior divulgação do estudo nos municípios do ERJ e adequação do mesmo aos dados microrregional</p> <p>* Ampliação da abrangência do IVM com a inclusão de novos indicadores</p>	<p>* Aponta as áreas mais vulneráveis da cidade, destringindo as informações dentro de cada componente da vulnerabilidade e evidenciando as variações da vulnerabilidade de acordo com características socioeconômicas, de desenvolvimento das infraestruturas básicas e uso do solo</p> <p>* Desenvolvimento de metodologia transparente, eficaz, multidisciplinar e integrada que poderá servir de ajuda para a administração pública da cidade</p> <p>* Recomenda-se que o estudo, em um futuro recente, seja objeto de monitoramento contínuo com dados mais precisos</p>
---	---	---	---

3.5 Resultados e conclusões dos Impactos, adaptação e vulnerabilidade de mudanças

Nesta sessão, são apresentados os resultados mais proeminentes alcançados pelos estudos de vulnerabilidade e análise dos impactos das mudanças climáticas em cada uma das localidades dos estudos.

Como visto, são diferentes os motivos e as formas de análise entre um estudo e outro, no entanto, estes se assemelham em alguns pontos. Pode-se dizer que não só no que tange a escolha dos usos de cenários e modelos de projeção climática, mas também na adoção de algumas metodologias e até mesmo em alguns resultados apresentados.

De forma geral, aponta-se o aumento global na temperatura e redução de precipitação das diferentes regiões analisadas em cada estudo. Mesmo havendo uma divergência nos cenários e modelos utilizados.

Em todos os estudos, observa-se que foi possível atingir o objetivo proposto, alcançando tanto a análise de vulnerabilidade de suas regiões, como também, propondo uma base para a recomendação de políticas públicas. No entanto, alguns estudos enfrentaram a dificuldade de obtenção de dados. Essa ainda é uma grande lacuna nas diferentes regiões. É extremamente necessária a construção de um banco de dados robusto para diferentes temáticas.

Os estudos, seguindo as suas particularidades regionais, abordaram a análise de diferentes potenciais impactos. No entanto, observa-se uma concordância no que se refere a análise de deslizamento e inundações. Tendo em vista a magnitude e a recorrência de tais eventos em cidades de países em desenvolvimento é absolutamente pertinente a realização de estudos nessas temáticas. Observa-se também a necessidade de reforçar a análise de inundações costeiras para as cidades litorâneas.

Em alguns casos, observa-se que, apesar de existir um histórico de estudos de análises de risco realizados, os resultados ainda não haviam sido incorporados às análises das questões das mudanças climáticas. Assim, ressalta-se a necessidade de ampliação do escopo e da realização constante de atualizações, visando incorporar diferentes fatores de risco aos novos estudos das regiões e de suas populações.

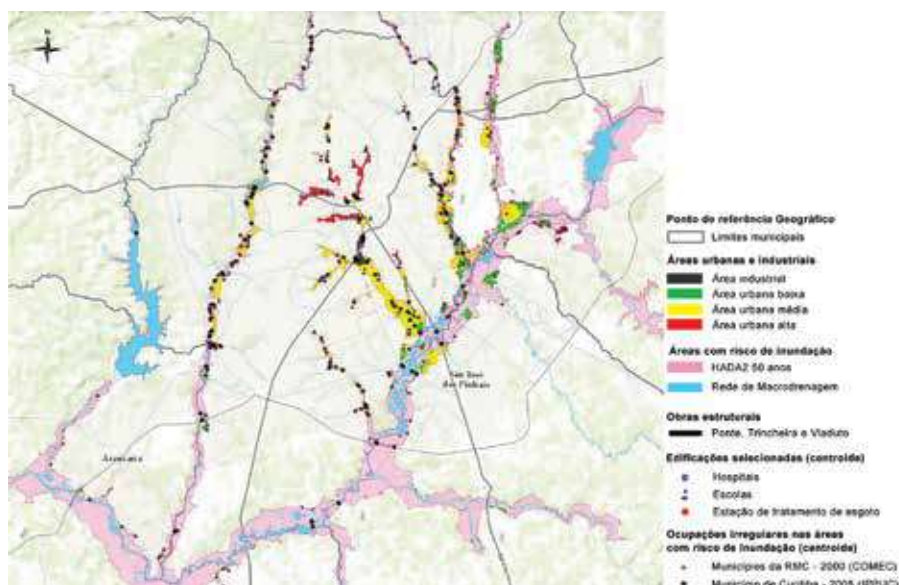
3.5.1 Avaliação de Vulnerabilidade Ambiental e Socioeconômica para o Município de Curitiba

Para a cidade de Curitiba, apontam uma tendência no aquecimento para as temperaturas registradas, variando entre 2 e 4 graus Celsius. No que tange a precipitação, ambos os modelos – global e regional – apontam para uma redução no delta de precipitação para o período do inverno. É importante destacar que, no próprio modelo global, observa-se uma divergência de padrões, não ocorrendo um arquétipo definido para os diferentes cenários do modelo.

Além das análises climáticas, foram constituídos mapas de vulnerabilidade da região que são reproduzidos neste estudo. Foram realizadas análises de vulnerabilidade levando em consideração: áreas urbanas e industriais mais suscetíveis a inundações (figura 4); estabelecimento de ensino mais suscetíveis a inundações (figura 5); estabelecimentos de saúde mais suscetíveis a inundações (figura 6); e populações com faixa etária de zero a 14 anos e acima de 60 mais suscetíveis a inundações (figura 7).

Observa-se a maior probabilidade de inundações nas zonas de média e baixa urbanização. O centro do município de Curitiba, por exemplo, não se mostra tão vulnerável. A região mais suscetível a enchentes é a região sudeste da zona metropolitana (figura 4).

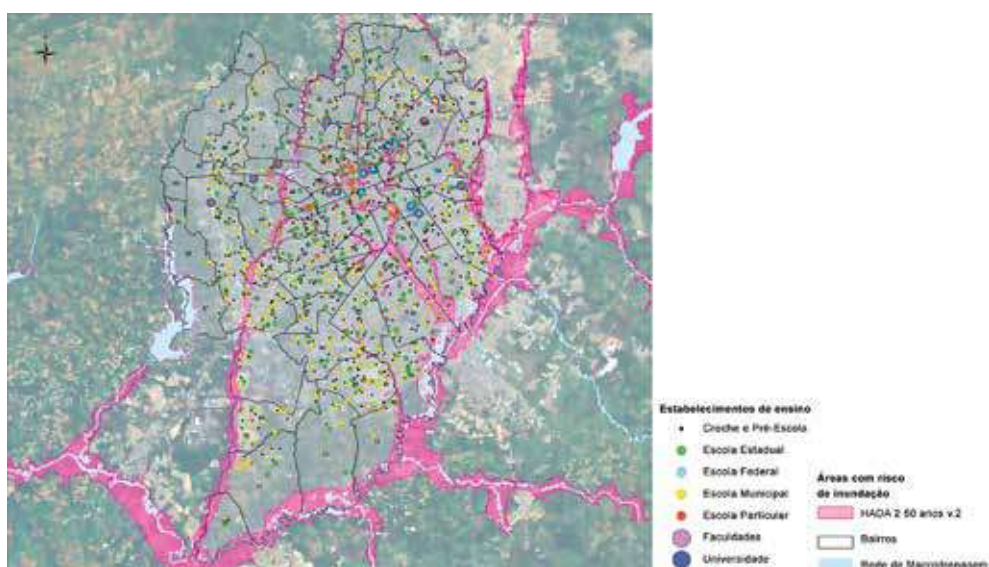
Figura 4 – Vulnerabilidade/fragilidade ambiental em face das inundações (Cenário Hada 2 – Recorrência 50 anos) – Curitiba



Fonte: IPPUC (2014a)

A figura 5 sobrepõe as informações de inundações e as localizações de estabelecimentos de ensino. Observa-se que todas as diferentes categorias estão suscetíveis a inundações em diferentes pontos. Sendo importante compreender a maior vulnerabilidade dos alunos de creches e escolas municipais, uma vez que a população infanto-juvenil pode depender de ajuda de terceiros em casos de inundações.

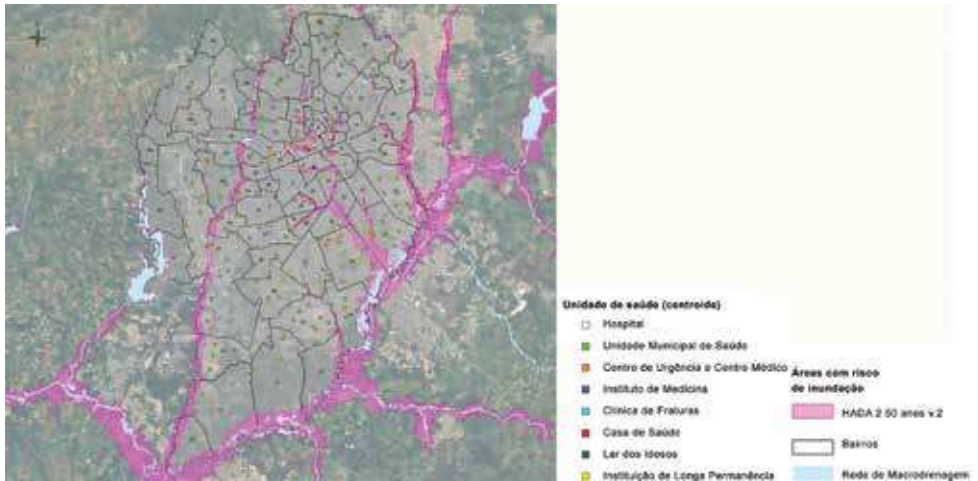
Figura 5 – Estabelecimentos de ensino e áreas de risco de inundação



Fonte: IPUUC (2014a)

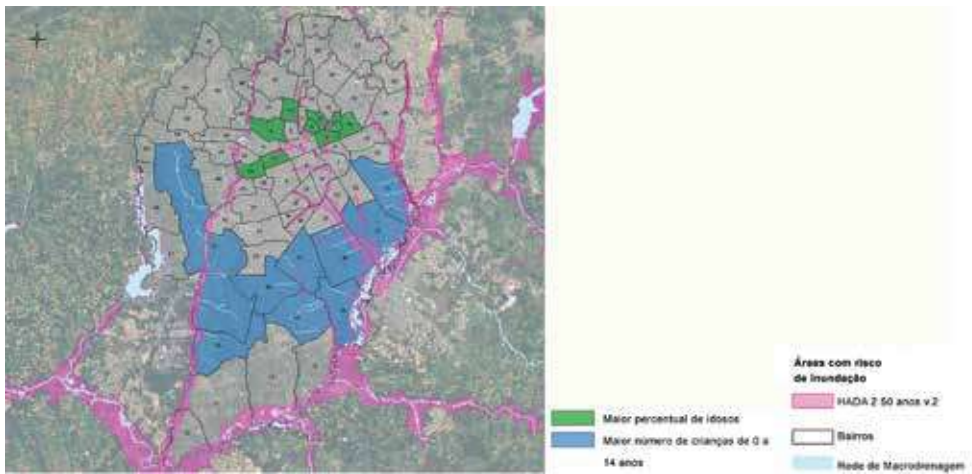
A mesma análise é feita, também, para os equipamentos de saúde (figura 6) e populações vulneráveis (crianças de zero a 14 anos e idosos acima de 60 anos) (figura 7).

Figura 6 – Estabelecimentos de saúde e áreas de risco de inundação



Fonte: IPPUC (2014a)

Figura 7 – Populações vulneráveis e áreas de risco de inundação



Fonte: IPPUC (2014a)

Os resultados apresentados pelo estudo são bastante ilustrativos, apontando as áreas de maior suscetibilidade, de acordo com cada parâmetro a ser analisado (ambiental, social e construído). A apresentação dessas informações de fato coopera com a tomada de decisão que pode melhor vislumbrar a ação a ser tomada e a localização para que esta deva ser direcionada.

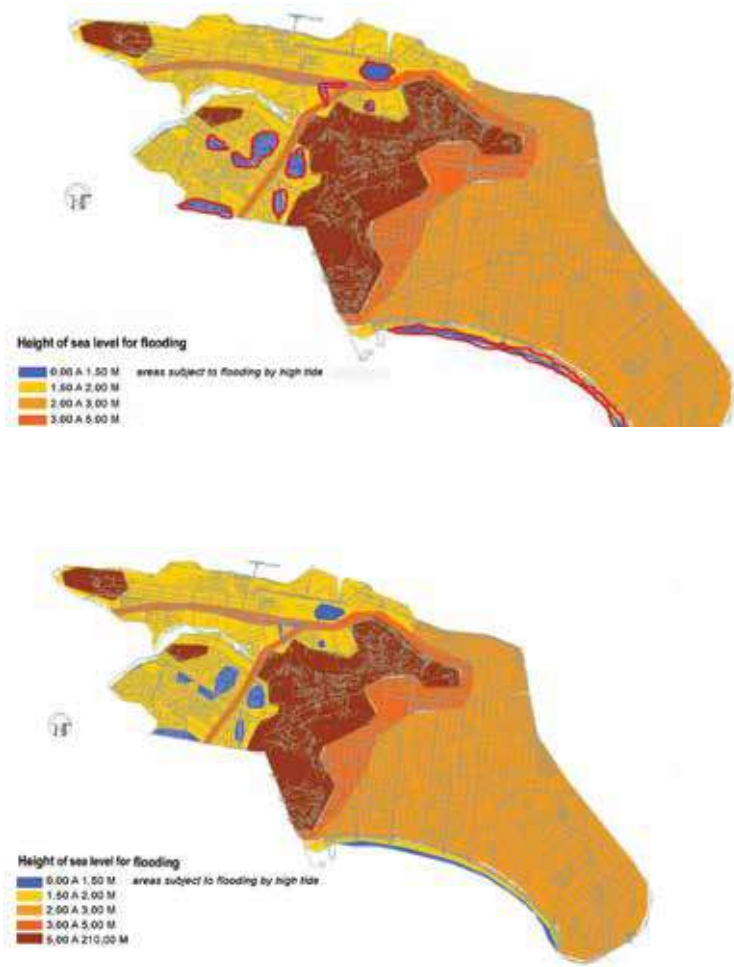
3.5.2 Climate Change Adaptation Planning in Latin America and Caribbean cities – Complete Report: Santos, Brazil

A cidade de Santos, apesar de ser considerada protegida de tempestades, apresentou nos últimos anos, casos de inundações costeiras e está inserida em um cenário de mudanças de temperatura e precipitação.

São previstas para 2040, em Santos, temperaturas mais quentes e uma pequena redução na precipitação, considerando-se dois cenários de emissões utilizados (B1 e A2). No que tange à precipitação mensal, é possível observar uma diminuição, particularmente durante os meses de verão. No entanto, a mudança prevista na precipitação varia muito de mês para mês. Em relação aos cenários adotados e a linha de base, observa-se desde um possível aumento de 4% até uma redução de 10% no cenário 1. No cenário 2, observa-se desde um aumento de 6% até uma redução de 9%.

Atualmente, a região noroeste de Santos sofre inundações durante as marés de primavera, o que é particularmente problemático durante a temporada de verão, quando as inundações são agravadas com a chuva. Já a região leste de Santos tem um complexo sistema de drenagem construído no início de 1900, que permite o movimento da água das marés e da chuva pelos canais, protegendo contra inundações. A figura 8 traz um mapa da situação atual no que tange ao perigo de inundações na cidade santista em comparação com as projeções realizadas para o ano de 2040 – em que é possível observar uma possível elevação do nível médio do mar local de aproximadamente 0,3 metros (os contornos em vermelho na figura da direita apontam as áreas mais vulneráveis ao aumento das inundações na década de 2040) (figura 8).

Figura 8 – Acima: locais em Santos sujeitos atualmente a inundações em diferentes níveis do mar. Abaixo: mudança projetada em áreas de inundação na década de 2040 com base no aumento do nível do mar de cerca de 0,3 m



Fonte: Prefeitura Municipal de Santos *apud* ICF-GHK (2012)

Ademais, os estudos mostram um possível agravamento nas inundações costeiras causadas por aumento anormal do mar na costa gerado por tempestades oceânicas. Ainda, quando houver a consonância desse evento com a maré alta, o impacto pode ser ainda maior. O estudo aponta que a costa noroeste, a porção sudoeste e a costa sul poderão sofrer um aumento de inundação costeira devido ao maior número de ocorrências de tempestades.

Os resultados por bairros vulneráveis a inundações e inundações costeiras corroboram a informação anterior e mostram que a região do sul de Santos poderá sofrer mais com o aumento na frequência de inundações.

Quanto aos deslizamentos de terra, atualmente é possível observar, no topo da figura 9, as regiões leste e noroeste de Santos como as mais suscetíveis à ocorrência deste evento. Já na parte de baixo da figura, observa-se as projeções para 2040 (figura 9).

Figura 9 – Parte superior: mapa de risco de deslizamento de terra 2012 de Santos, Parte inferior: mudança projetada em áreas propensas a deslizamentos de terra na década de 2040, tanto para o cenário 1 e 2, em que a linha vermelha representa a expansão das áreas sujeitas a eventos de deslizamento de terra



Legenda: R1: baixo risco para o desenvolvimento de processos de deslizamento de terra; R2: de médio risco; R3: alto risco; R4: risco muito elevado.

Fonte: IPT (2012) *apud* ICF-GHK (2012)

Como visto, poderá haver uma diminuição na frequência global de deslizamento de terra, mas um aumento na ocorrência de eventos extremos de deslizamento. Nos arredores montanhosos da cidade, a diminuição da precipitação mensal e sazonal pode levar a uma diminuição global de saturação do solo. No entanto, as projeções realizadas para os índices de deslizamento de terra sugerem um aumento do número desses eventos.

Sendo necessário observar com mais atenção os bairros situados na região montanhosa de Santos, que se apresentam como os mais expostos. Dos bairros expostos, os de baixa vulnerabilidade tendem a representar as áreas que não são tão povoadas nem tão concentradas com favelas como as outras áreas mais vulneráveis.

Ademais, as florestas e a cobertura vegetal terão um papel fundamental na preservação das propriedades dos solos. Caso o desmatamento ou a transformação da paisagem continuar na região, haverá de fato reduções na precipitação e perda na cobertura vegetal, assim a erosão do solo poderá ser agravada levando a uma maior incidência global de deslizamentos de terra.

Também foi realizada uma análise em relação a infraestruturas críticas da cidade de Santos. Os mapas foram divididos por deslizamentos, inundações e inundações costeiras. No geral, concluiu-se que haveria mínima infraestrutura crítica na maioria das áreas sujeitas a inundações e nenhuma infraestrutura crítica dentro de áreas propensas a deslizamentos. As infraestruturas mais vulneráveis aos riscos futuros estão localizadas ao longo da costa do litoral do Sudeste. Esta é uma área onde existem diques, mas suas paredes podem não ser fortes o suficiente para enfrentar a futura erosão das praias e elevação do nível do mar.

Apesar de alguns contratemplos, a cidade de Santos tem uma estrutura institucional robusta para a gestão do risco de desastres e riscos relacionados com o clima. Os sistemas da cidade para o gerenciamento de risco são considerados entre os melhores do Brasil, com um forte foco na preparação e redução de riscos. O foco na prevenção caracteriza a abordagem progressiva e adaptável ao planejamento de riscos.

Todas as avaliações realizadas no estudo forneceram a base a partir da qual foi possível identificar e priorizar um conjunto de investimentos de adaptação ao clima e intervenções estratégicas de fortalecimento institucional que podem ser vinculados ou incorporados nas prioridades existentes, planos setoriais e instrumentos de planejamento.

3.5.3 Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas do Estado de Minas Gerais

O estudo mineiro também apontou um aumento na temperatura, tendo a região norte do estado o maior acréscimo – região de Jequitinhonha-Mucuri, Norte, Noroeste, Triângulo e Alto Paranaíba. A região norte também é a que sofrerá maiores alterações na precipitação com uma queda prevista entre -9,4 e -17,3 mm nos meses de janeiro e fevereiro. Já a região centro-sul poderá experimentar um aumento no volume de chuva. Porém, de forma geral, há um aumento global de precipitação no estado.

O estudo realizou análises de vulnerabilidade desagregando a informação entre os diferentes componentes da vulnerabilidade descritos no AR4. No entanto, para melhor entendimento, escolheu-se reproduzir apenas o mapa de vulnerabilidade do estado de Minas Gerais por região de planejamento (figura 10).

Figura 10 – Mapa regional da vulnerabilidade de Minas Gerais frente às mudanças climáticas: sistema de avaliação e índice por região



Fonte: EnviroConsult/EcoRecursos/Feam *apud* Feam (2014)

Os autores também coletaram informações de simulações feitas pela Feam em relação a estimativas das consequências econômicas provenientes das mudanças climáticas (tabela 10). De forma geral, é possível dizer que: poderá haver uma redução de -0,5% do PIB em 2035 e de -1% do PIB em 2050, para o cenário A2-BR; e de -1,6% do PIB em 2035 e -2,6% em 2050, para o do cenário B2-BR.

Tabela 10 – Impactos no PIB associados às mudanças climáticas, 2035 e 2050, Cenários A2-BR e B2-BR (segundo o PIB setorial projetado sem mudanças climáticas para 2035 e 2050)

Setores	A2-BR		B2-BR	
	2035	2050	2035	2050
Agropecuária	-1,85%	-3,86%	-1,22%	-3,04%
Agricultura, silvicultura, exploração florestal	-2,03%	-4,65%	0,14%	-1,45%
Pecuária e pesca	-1,46%	-2,10%	-3,90%	-6,25%
Indústria	-0,73%	-1,15%	-2,23%	-3,49%
Serviços	-0,15%	-0,36%	-1,43%	-2,22%
Minas Gerais	-0,53%	-1,00%	-1,67%	-2,69%
Brasil	-0,28%	-0,51%	-1,48%	-2,26%

Fonte: Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas na Economia Mineira *apud* Feam (2014)

Observa-se que poderá haver também um impacto nas lavouras, pastos e nas florestas, como apontado na tabela 11.

Tabela 11 – Variações das superfícies de lavoura, pastos e florestas em Minas Gerais, conforme os cenários A2-BR e B2-BR

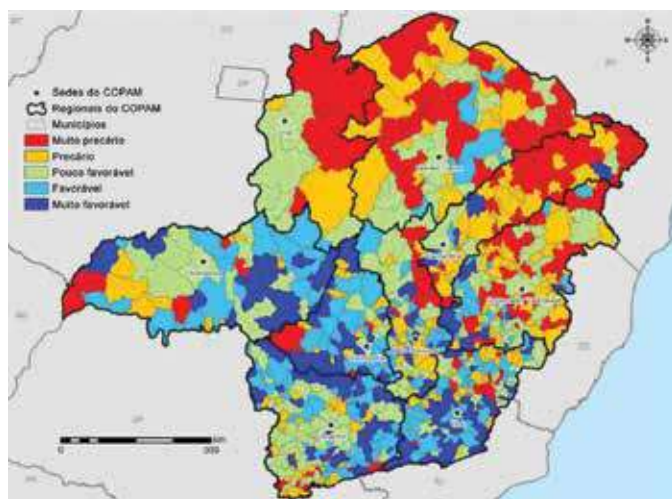
Horizonte	Cenário A2-BR			Cenário B2-BR		
	Lavoura	Pasto	Floresta	Lavoura	Pasto	Floresta
2010-2040	-3,1% (-191.918ha)	10,9% (2.752.852ha)	-34,7% (-2.560.941ha)	9,6% (472.412ha)	7,1% (1.807.355ha)	-30,1% (-2.279.768ha)
2040-2070	-1,0% (-47.241ha)	11,9% (3.016.484ha)	-40,2% (-2.969.243ha)	9,1% (448.792ha)	8,5% (2.147.027ha)	-35,2% (-2.595.818ha)
2070-2100	-5,0% (-255.890ha)	11,0% (2.778.207ha)	-34,2% (-2.522.117ha)	-18,0% (-886.757ha)	15,2% (3.842.848ha)	-40,0% (-2.956.901ha)

Fonte: Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas na Economia Mineira *apud* Feam (2014)

Foram feitas análises também para alguns setores, em específico: mineração, energia, transporte e turismo. Para o setor da mineração, o estudo assinala a insipiência das relações entre as mudanças climáticas e o impacto econômico no setor, mas é possível apontar a interferência das mudanças climáticas na atividade. Essa atividade está relacionada intrinsecamente com o recurso hídrico, assim os períodos mais extensos da seca poderão influenciar a operação, podendo gerar também uma competição pelo recurso com as regiões vizinhas às usinas. Da mesma forma, o setor elétrico, altamente dependente do recurso hídrico, poderá sofrer com as alterações hidrológicas – as secas – provenientes das mudanças climáticas – variações da temperatura e precipitação.

Da mesma forma, foi realizado um estudo para a saúde, levando em conta as doenças que estariam ligadas às mudanças climáticas de alguma forma – dengue, malária, febre amarela, tracoma e diarreia, apresentada na figura 11, em que regiões Norte, Noroeste e Jequitinhonha-Mucuri são as mais vulneráveis.

Figura 11 – Mapa das condições de saúde em Minas Gerais



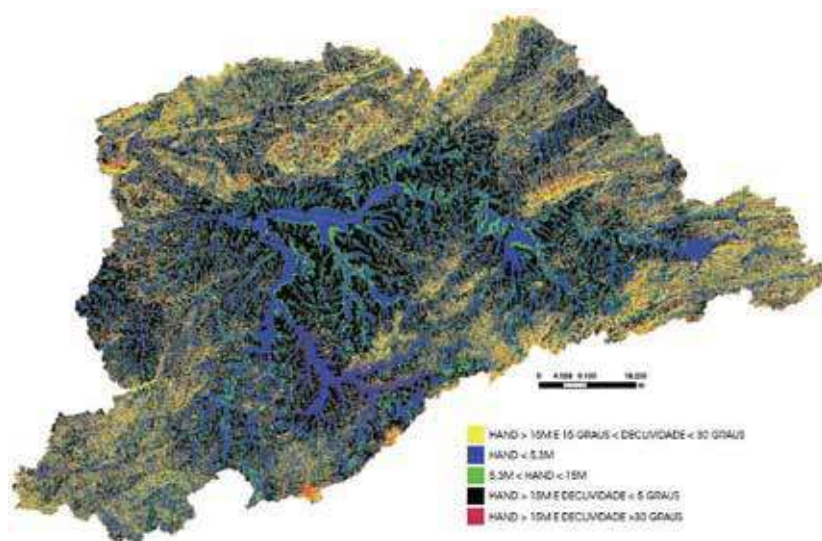
Fonte: ZEE (2007) *apud* Feam (2014)

3.5.4 Estudo Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças – Região Metropolitana de São Paulo

Os resultados do estudo da RMSP apontaram que os riscos de enchentes, de inundações e de deslizamentos de terra poderão aumentar. Uma questão que traz ainda mais cautela é o impacto dessas ocorrências na população, uma vez que a mancha urbana, em 2030, está projetada para aumentar e chegar ao dobro da atual (2011). Assim, o risco de desastres poderá atingir cada vez mais a população como um todo e, sobretudo, os mais pobres.

A figura 12 apresenta as áreas atuais suscetíveis a risco de enchentes, inundações e deslizamentos de terra identificadas, a partir da integração de dados de uso do solo, expansão urbana e o modelo *Hand*, citado anteriormente.

Figura 12 – Modelo *Hand* utilizado para identificação das áreas suscetíveis a inundações e deslizamento na RMSP



Fonte: processado com base no Modelo Digital do Terreno (MDT) da Emplasa fornecido pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM) apud Nobre *et al.* (2011)

A distribuição dessas áreas de risco na mancha urbana atual apresenta algumas características peculiares:

- a) na sua parte central predominam quase exclusivamente áreas de risco de inundação;
- b) as áreas de risco de enchentes propriamente ditas, associadas à ocupação por assentamentos precários de margens de córregos e em locais de drenagem restritas, e as áreas de risco de escorregamentos, por ocupação desordenada das encostas, concentram-se, sobretudo, nas regiões representadas pelas manchas de expansão urbana recente;
- c) concentrações significativas de áreas de risco de enchentes e escorregamentos ocorrem principalmente na Zona Sul do município de São Paulo e em sete subprefeituras e acontecem de forma mais espaçada em outras regiões.

De acordo com as análises dos dados climáticos pretéritos apresentados, concluiu-se que nas regiões Sudeste e Sul têm ocorrido um aumento nos volumes totais de chuva e nas precipitações intensas nos últimos 50–60 anos.

Na RMSP, o aumento na frequência de extremos de chuva acima de 50 mm/dia parece estar associado ao efeito da ilha urbana de calor. Essa última, por sua vez, é consequência da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera que podem explicar as mudanças do clima e os extremos no estado de São Paulo, principalmente na sua região metropolitana.

As projeções futuras realizadas, de acordo com os modelos climáticos utilizados, apontaram que a temperatura média anual projetada indica aumento de 2°C a 4°C, aumento no número de dias quentes, diminuição no número de dias frios, aumento no número de noites quentes e diminuição no número de noites frias. Eventos com grandes volumes de precipitações pluviométricas deverão ocorrer com mais frequência no futuro, abarcando cada vez mais uma maior área geográfica da região.

Um resumo dessas projeções, dos resultados das análises dos dados climáticos realizadas e da respectiva confiabilidade atribuída, podem ser visualizados, de forma qualitativa, na figura 13.

Figura 13 – Sumário das projeções climáticas derivadas do modelo regional Eta-CPTEC 40 km para a RMSP

	Presente Observado	Presente Simulado	2030-43	Conf.	2051-60	Conf.	2080-90	Conf.
TEMP	➔	➔	➔	Alta	➔	Alta	➔	Alta
NOITES QUENTES	➔	➔	➔	Alta	➔	Alta	➔	Alta
NOITES FRIAS	➔	➔	➔	Alta	➔	Alta	➔	Alta
DIAS QUENTES	➔	➔	➔	Alta	➔	Alta	➔	Alta
DIAS FRIOS	➔	➔	➔	Média	➔	Alta	➔	Alta
ONDAS DE CALOR	Não observado	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Alta
CHUVA TOTAL	➔	➔	➔	Alta	➔	Alta	➔	Alta
PRECIP INTENSA	➔	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Alta
PRECIP > 95th	➔	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Alta
DIAS PRECIP > 10 MM	➔	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Alta
DIAS PRECIP > 20 MM	➔	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Média
DIAS SECOS CONSECUTIVOS	➔	➔	➔	Média	➔	Média	➔	Alta

Fonte: CPTEC/INPE (2010) *apud* Nobre *et al.* (2011)

Desse modo, os autores observam que novas áreas de risco poderão surgir e a vulnerabilidade se intensificará tanto em relação a inundações quanto deslizamentos em todo o território da RMSP. Considerando a área projetada para 2030, os riscos de enchente e inundação aumentarão, proporcionalmente, de acordo com os valores que se tem em 2008 e também em relação ao crescimento da mancha e mais de 20% da área total de expansão será suscetível e poderá ser afetada, como pode ser visualizado na tabela 14.

Tabela 14 – Projeção das áreas suscetíveis a risco de enchentes e inundações em 2030

Tabela 11: Projeção das áreas suscetíveis a risco de enchente e inundações em 2030				
Ano	Área urbana consolidada (km ²)	Área de risco (km ²)	Área de risco (%)	Varição (%)
2008	2345,28	552,34	23,55	
Período	Aumento da área urbana no período (km ²)	Área de risco (km ²)	Área de risco (%)	
2008-2030	1141,06	254,45	22,30	46,07
Ano	Projeção da área urbana total (km ²)	Área de risco total (km ²)	Área de risco (%)	
2030	3254,23	806,79	24,79	

Legenda: área de risco (km²) – significa o quanto foi medido em termos absolutos; área de risco (%) – significa a representatividade em termos percentuais; variação (%) – significa o quanto variou no período de 2008–2030.

Fonte: Nobre *et al.* (2011)

De forma similar, foram identificadas as áreas vulneráveis a deslizamentos em 2030, considerando as faixas de declividade mais acentuada (maiores que 15° e 30°) e utilizando o mesmo modelo *Hand*. Assim, concluiu-se que haverá um aumento de pouco mais de 2% de áreas vulneráveis a enchentes, em 2030, do que o existente na atualidade (2008) (tabela 15). O estudo também aponta que em torno de 11% das áreas de expansão poderão se constituir em novas áreas de risco de deslizamentos.

Tabela 15 – Projeção das áreas suscetíveis a risco de deslizamentos em 2030

Tabela 12: Projeção das áreas suscetíveis a risco de deslizamento em 2030				
Ano	Área urbana consolidada (km ²)	Área de risco (km ²)	Área de risco (%)	Varição (%)
2008	2345,28	21,21	0,90	
Período	Aumento da área urbana no período (km ²)	Área de risco (km ²)	Área de risco (%)	
2008-2030	1141,06	48,67	4,27	229,47
Ano	Projeção da área urbana total (km ²)	Área de risco total (km ²)	Área de risco (%)	
2030	3254,23	69,88	2,15	

Legenda: área de risco (km²) – significa o quanto foi medido em termos absolutos; área de risco (%) – significa a representatividade em termos percentuais; variação (%) – significa o quanto variou no período de 2008-2030.

Fonte: Nobre *et al.* (2011)

3.5.5 Mapa de Vulnerabilidade da População do Estado do Rio de Janeiro aos Impactos das Mudanças Climáticas nas Áreas Social, Saúde e Ambiente

No que tange às análises climáticas e aos cenários aplicados, de acordo com as anomalias projetadas para o ERJ, considerando-se os cenários A1FI e A1T para o período 2010–2040, observa-se uma tendência geral de redução da precipitação e aumento da temperatura. Há, entretanto, variações geográficas desse padrão, bem como diferenças relacionadas à intensidade das anomalias, de acordo com os cenários avaliados.

De forma mais específica, com relação à temperatura, em ambos os cenários há uma clara tendência de um aumento positivo das anomalias para todo o ERJ, mas de forma menos intensa, porém, nos municípios da região Norte. As variações de anomalias no cenário A1T enquadram-se no intervalo de 0,34 a 1,69°C, ao passo que, no cenário A1FI, situam-se entre os extremos de 1,39 e 2,26°C.

Sobre a precipitação, somente no cenário A1T são registradas anomalias positivas, as quais se concentram em municípios da região Norte. Nas demais regiões, são verificadas apenas anomalias negativas, indicando uma redução no volume de chuvas. No cenário A1FI, as anomalias de precipitação variam de 74,89 a 108,98 mm anuais, ao passo que, no cenário A1T, os extremos são 102,58 e 510,24 mm anuais.

Ademais, os resultados do estudo do Rio de Janeiro são apresentados, de acordo com os índices de vulnerabilidades definidos – geral (IVGp); ambiental (IVAp); social da família (IVSFp); e da Saúde (IVSp) – e, em seguida, serão reproduzidas os principais de cada.

A começar pelo IVGp, este é composto pelos índices relativos ao ambiente – Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVAp), Índice Social da Família (IVSFp) e Índice da Saúde (IVSp) – e apresentou os maiores valores (0,82 a 1,00) em seis municípios, de diferentes regiões: Parati, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Magé e Campos dos Goytacazes. Cinco municípios na parte oriental da Região da Baixada Litorânea tiveram os valores mais baixos do IVGp (figura 14).

Com relação ao IVAm,⁵ os índices mais altos foram verificados nos municípios do Rio de Janeiro, de Parati e de Angra dos Reis, seguidos por um grupo de municípios contíguos, distribuídos desde a Região Metropolitana até o Norte Fluminense (figura 15).

Embora não tenha sido verificado um padrão regional claro para os valores do IVSFp,⁶ os mais altos indicadores (0,84 a 1,00) estão nas regiões Noroeste e Norte (Varre-Sai, Porciúncula, Cardoso Moreira, São Francisco do Itabapoana e São José de Ubá) e na região Serrana (Trajano de Moraes). Cabe destacar que Niterói obteve o índice de IVSFp mais baixo e São Francisco do Itabapoana, o mais alto.

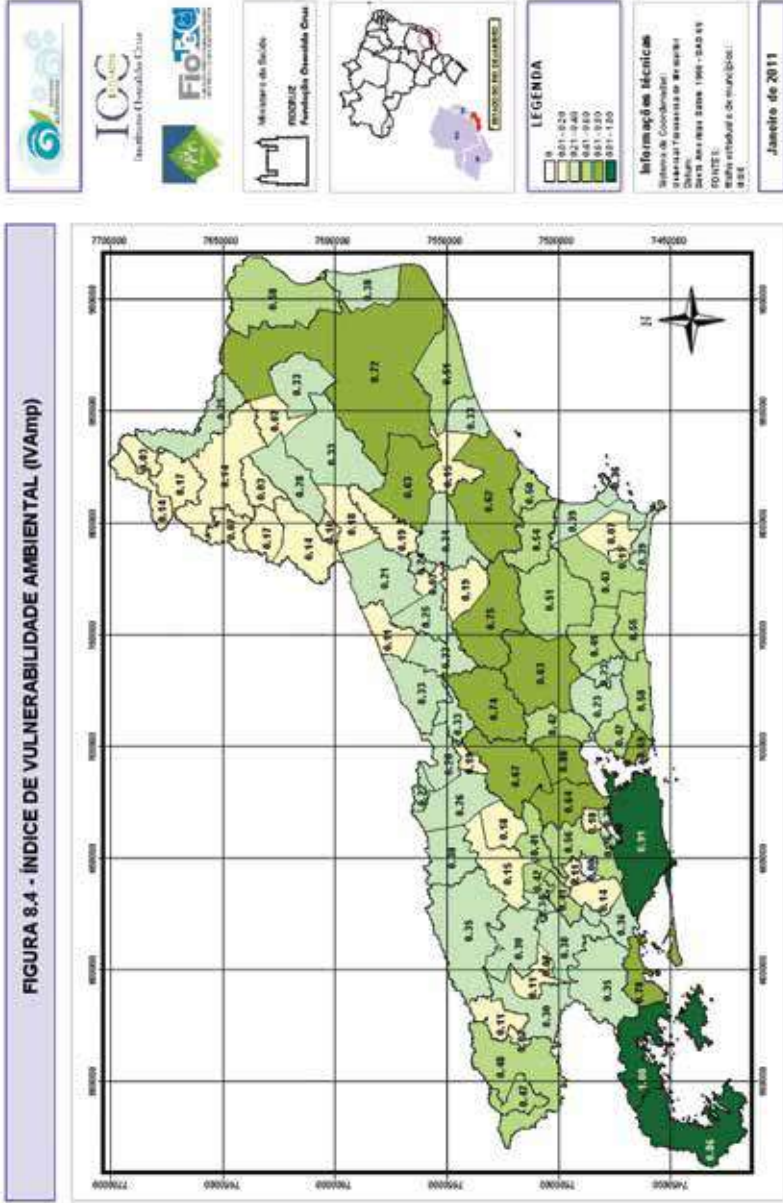
Quanto ao IVSp, também não se constatou um padrão espacial claro para os valores mais altos, aparecendo, em primeiro lugar, os municípios do Rio de Janeiro (1,0) e de Campos dos Goytacazes (0,92), seguidos por um grupo de municípios com valores variando entre 0,62 e 0,77 localizados em várias regiões, com exceção da Médio Paraíba e Centro-Sul. No Rio de Janeiro e em Campo dos Goytacazes, os componentes do IVSp com valores mais altos foram os relativos à dengue, assim como em Angra dos Reis, Duque de Caxias, Magé, e à leptospirose em outros, como Maricá, Niterói e Porciúncula.

Para o pior cenário climático aplicado, o índice sintético de vulnerabilidade municipal (IVMp-A1FI) apontou um conjunto de municípios da macrorregião Metropolitana e seu entorno como o mais suscetível de sofrer maiores impactos do clima no futuro. Esse conjunto de informações agregadas permite a identificação desse *hotspot* metropolitano, mas os indicadores parciais também podem ser utilizados para a orientação de políticas setoriais, sejam de saúde, socioeconômicas ou de proteção ambiental.

⁵ Composto de quatro indicadores: (1) Indicador de Cobertura Vegetal (ICV); (2) Indicador de Conservação da Biodiversidade (ICB); (3) Indicador de Linha de Costeira (ILC); e (4) Indicador de Eventos Hidro meteorológicos Extremos.

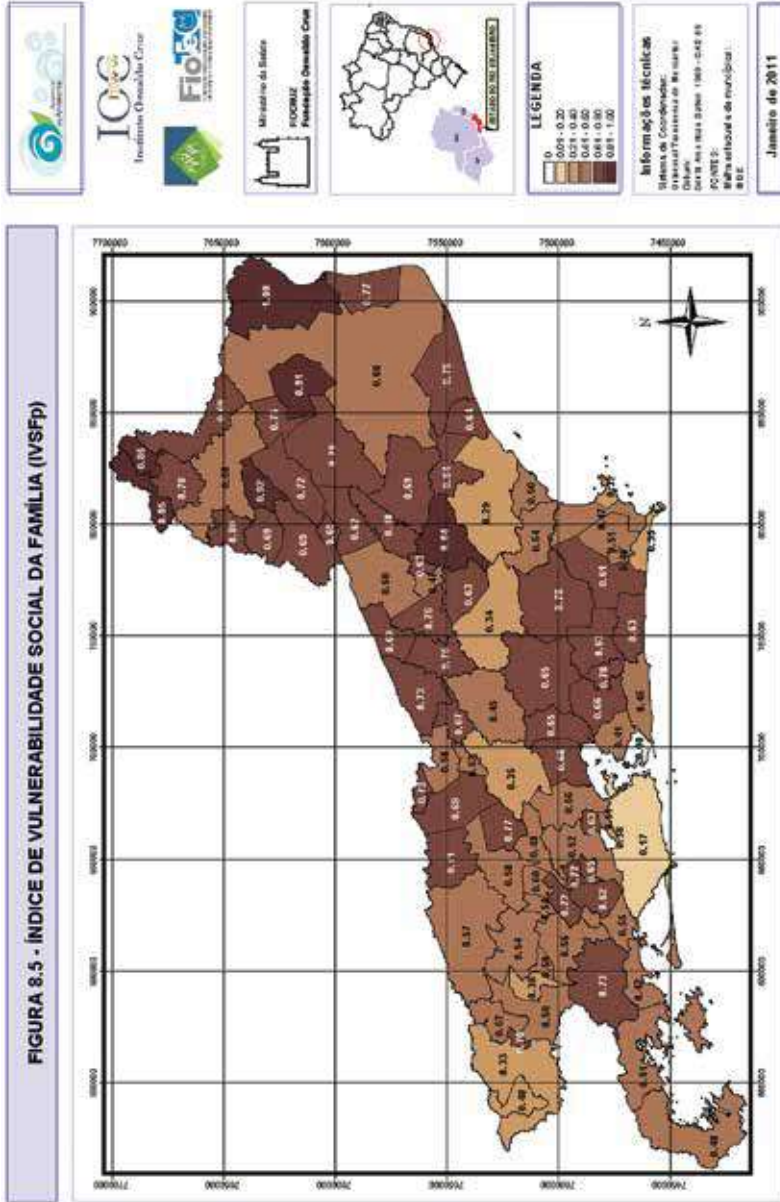
⁶ É importante lembrar que esse índice engloba cinco dimensões: Estrutura Familiar, Acesso ao Conhecimento, Acesso ao Trabalho, Disponibilidade de Recursos (Renda), Desenvolvimento Infante-Juvenil e Condições Habitacionais.

Figura 15 – Índice de Vulnerabilidade Ambiental



Fonte: Barata *et al.* (2011)

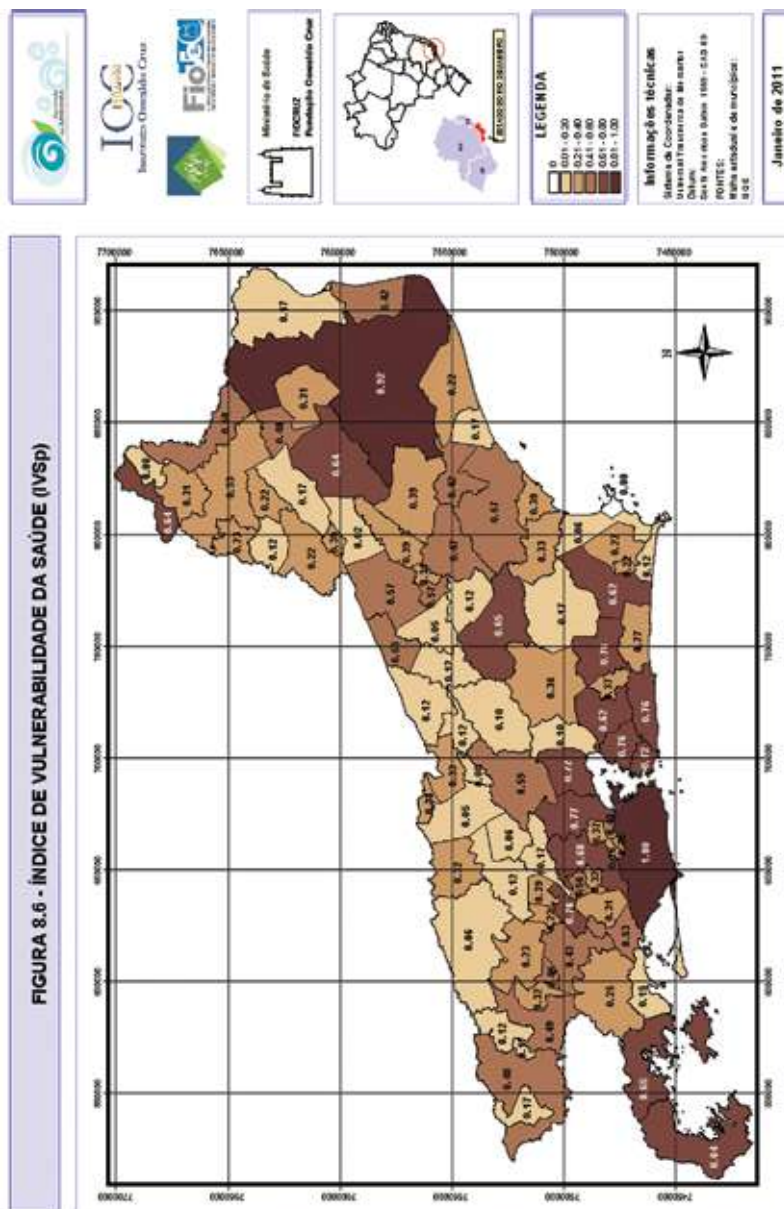
Figura 16 – Índice de Vulnerabilidade Social da Família



Fonte: Barata *et al.* (2011)

Modelagem Climática e Vulnerabilidades
 Setoriais à Mudança do Clima no Brasil

Figura 17 – Índice de Vulnerabilidade Saúde



Fonte: Barata *et al.* (2011)

3.5.6 Relatório de Vulnerabilidade e Desenvolvimento Sustentável de Goiânia (Relatório Final – Contrato de Serviços Técnicos de Consultoria nº 1/2012)

Para o estudo goiano, foram realizadas análises similares ao dos outros estudos. Observa-se que, corroborando com outros estudos para a mesma região, tal como Marengo *et al.* (2009), há previsão de um aumento da temperatura e estiagens mais longas, assim como uma redução no volume de precipitação.

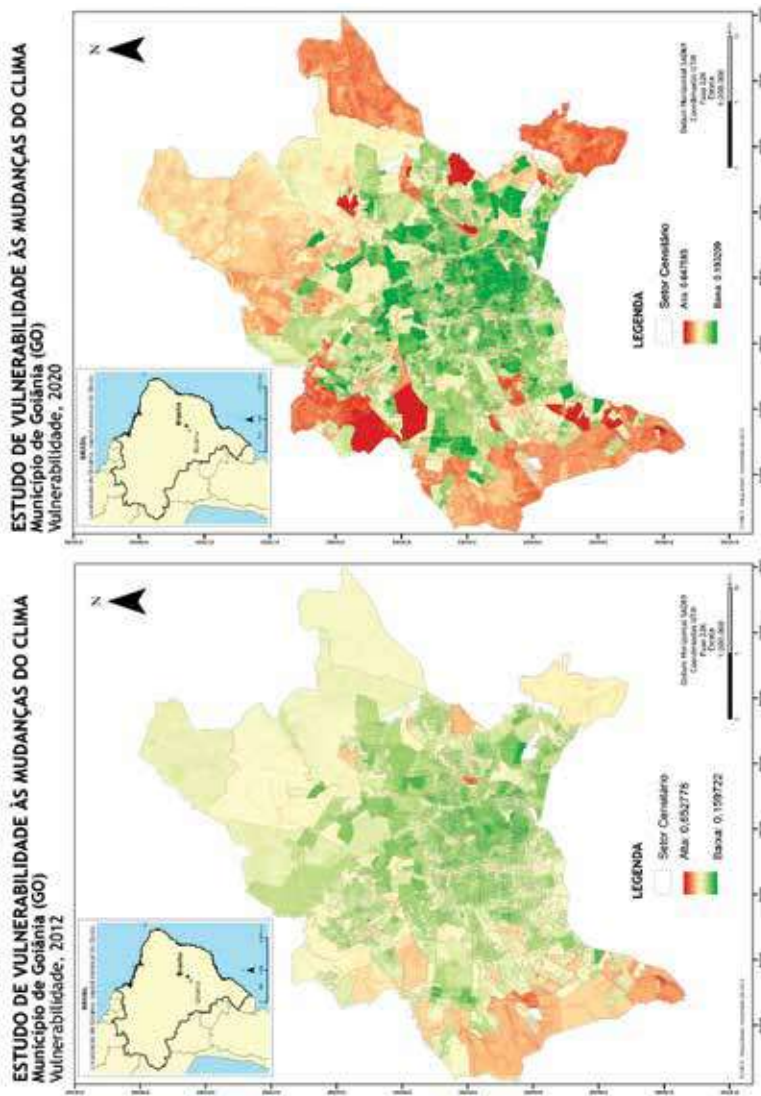
Para as análises de temperatura, o estudo goiano, teve como base Luiz (2012), que descreve uma correlação entre o crescimento urbano e a elevação da temperatura média do ar (figura 18). As elevações de maior significância de temperatura se deram nos meses das estações: primavera, outono e inverno – os resultados encontrados (de 1,9°C–2,4 °C entre 1961 e 2008) são maiores que a média global, mas que isto pode ser em decorrência da localização da estação metrológica em área urbana. Destaque-se que estes dados deveriam ser recolhidos e essa incerteza deveria ser mais bem trabalhada.

Os mapas de risco basearam-se nas projeções climáticas que apontaram longas estiagens, aumento de temperaturas médias e redução na precipitação cumulativa, o que pode ocasionar um problema de abastecimento de água dado a menor captação nas principais bacias da cidade e a incêndios nas zonas rurais.

Os mapas de maior abrangência são os mapas de vulnerabilidade por setor censitário para a vulnerabilidade atual (2012) e mostra que há uma variação dentro do perímetro municipal, sendo as áreas periurbanas e rurais as mais vulneráveis. A zona urbana não apresenta grande vulnerabilidade, com exceção de uma pequena área. No entanto, o estudo não identifica a razão dessa área ser mais vulnerável (figura 18 – esquerda).

O estudo também realizou uma projeção, buscando entender a vulnerabilidade da cidade de Goiânia para o ano de 2020 (figura 18 – direita). O mapa apresenta as mesmas zonas identificadas anteriormente como sendo as zonas mais vulneráveis para a cidade. É importante lembrar, que, como demonstrado nos itens anteriores, a projeção da vulnerabilidade para 2020 apresentou algumas limitações.

**Figura 18 – Vulnerabilidade 2012 e simulação da vulnerabilidade em Goiânia em 2020 –
Suporte informativo: setor censitário**



Fonte: WayCarbon (2012)

Foram realizados mapas de vulnerabilidade para alagamento, deslizamento, processo de erosão e risco de incêndio.

A análise para alagamento mostra um risco médio e alto de alagamento por setor censitário (figura 19 – superior esquerda) e isso se deve, principalmente, pelo aumento da impermeabilização do solo nas zonas urbanas e pela elevada ocupação, assim como pela fragilidade do sistema de drenagem.

Já para o mapa de deslizamento, observa-se a incidência de risco alto e médio de ocorrência, sendo a espacialização realizada de acordo com os distritos (figura 19 – página seguinte). Esse mapa foi elaborado a partir da realização de um trabalho de campo que privilegiou a zona urbana, esta por ser mais densamente habitada e possuir maior valor. Portanto, esse resultado apresenta grandes lacunas para uma análise geral. Houve registros de deslizamentos principalmente nessa área.

A análise para o processo de erosão é apresentado por nível distrital (figura 19 – página seguinte), e observa-se que zona rural possui uma alta probabilidade de sofrer este processo, no entanto, o risco é dado como baixo devido à baixa densidade populacional. Nas zonas urbanas, onde a densidade populacional é alta, apesar de não ter um alto índice de áreas erodidas, o perigo é maior.

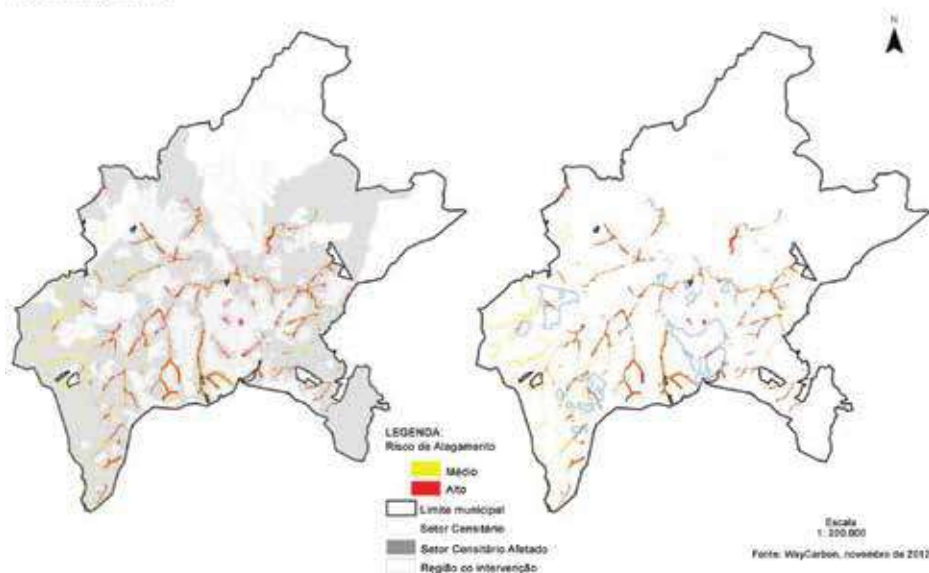
A partir da análise de risco de incêndio, verifica-se que as áreas rurais e periurbanas apresentam um risco mais elevado de ocorrência. Isso se deve ao fato da existência de vegetação e pastagem e destas estarem sujeitas a diferentes processos que contribuem. No entanto, assim como a análise de erosão, os autores apontam para a zona urbana como o registro mais alto de risco de incêndio e isso se deve ao seu valor econômico e à sua densidade da população.

Com o levantamento de informações pretéritas e a construção do mapa de risco de falta de abastecimento de água, pôde-se observar que a zona sul/sudoeste do município de Goiânia é mais vulnerável (figura 20).

Figura 19 – Mapa do risco de alagamento, deslizamento e erosão no município de Goiânia

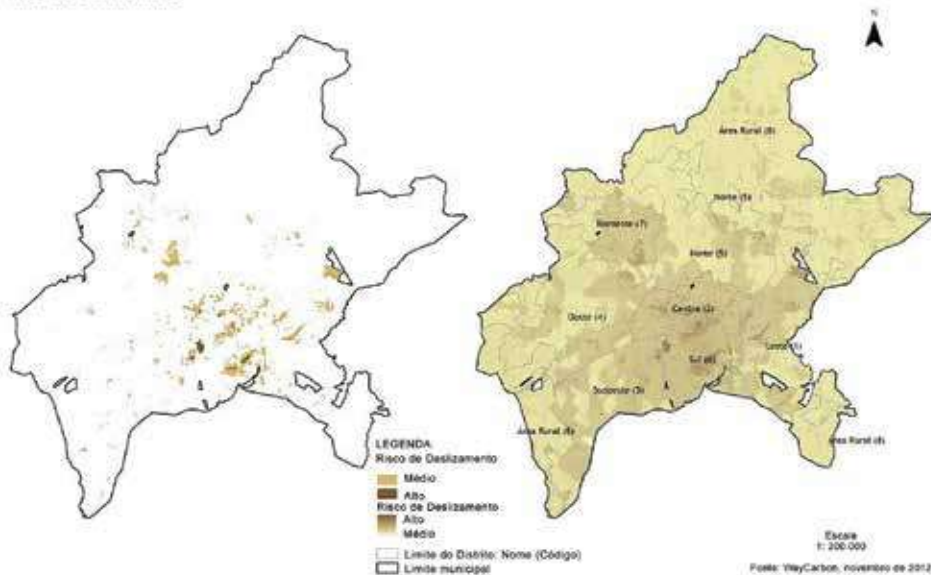
ESTUDO DE VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA
Município de Goiânia (GO) - Setor Censitário

Risco de Alagamento

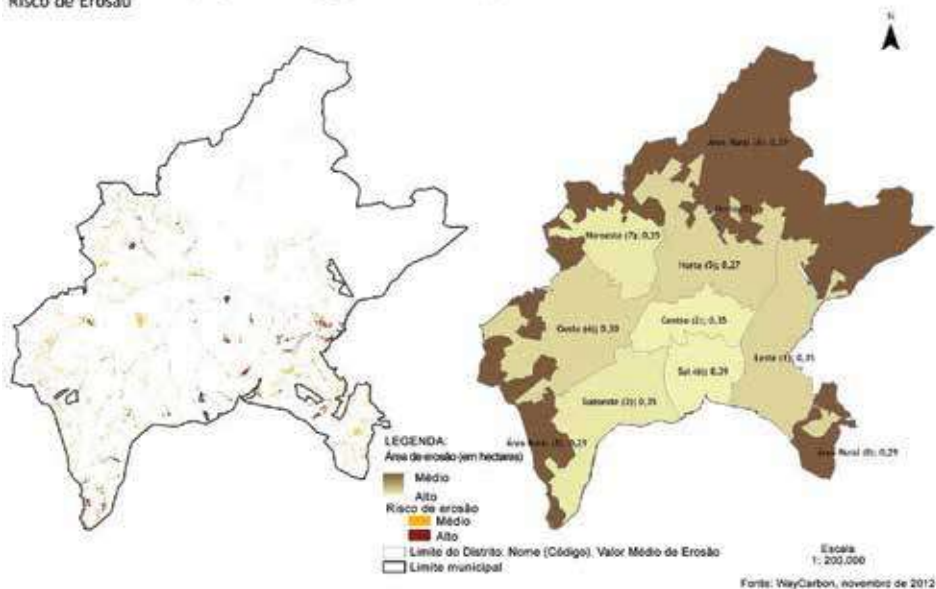


ESTUDO DE VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA
Município de Goiânia (GO) - Distrito (Região Administrativa)

Risco de Deslizamento

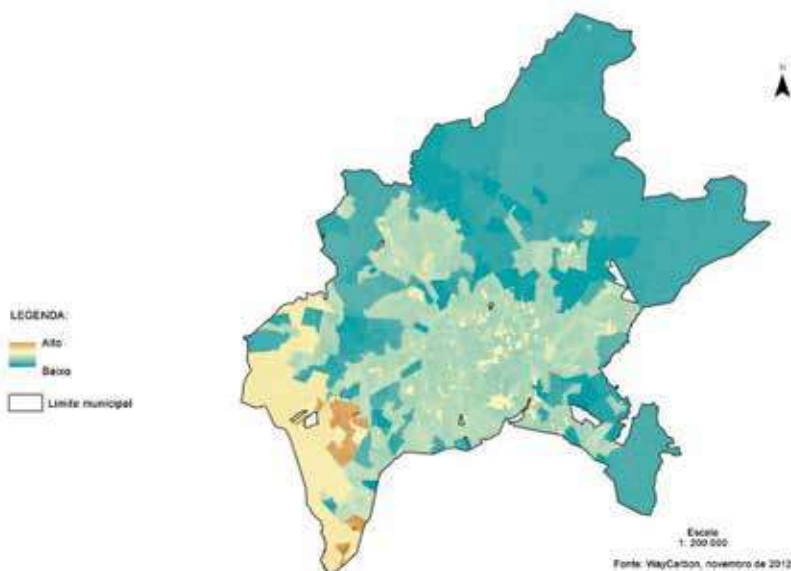
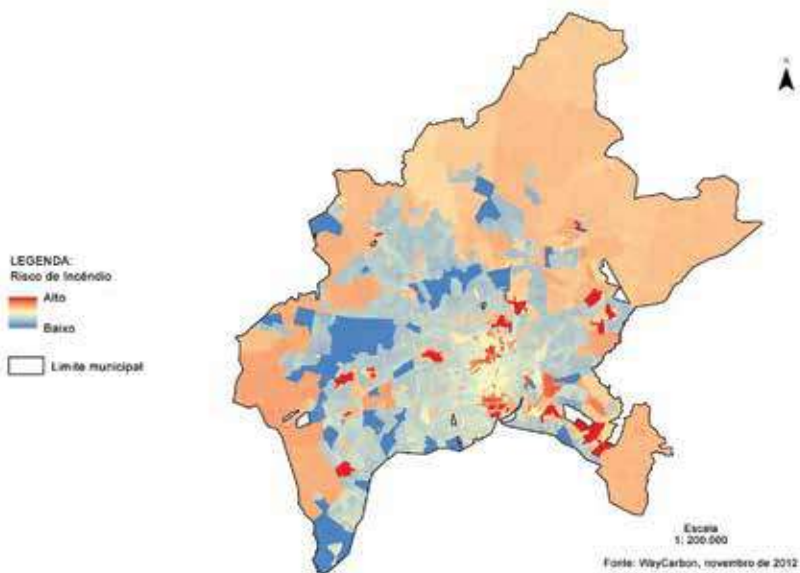


ESTUDO DE VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA
Município de Goiânia (GO) - Distrito (Região Administrativa)
Risco de Erosão



Fonte: WayCarbon (2012)

Figura 20 – Mapa do risco de incêndio no município de Goiânia e mapa do risco de falta de abastecimento de água no município de Goiânia



Fonte: WayCarbon (2012)

4 Discussão

De acordo com o referencial teórico, há diversas metodologias para o desenvolvimento de estudos de vulnerabilidades às mudanças climáticas e, conseqüentemente, há diferentes metodologias para avaliar e comparar os estudos e seus respectivos resultados. Essas diferenças dizem respeito principalmente aos pressupostos conceituais, à abrangência da análise, à escala adotada, ao público-alvo e aos focos de interesse levados em consideração. No entanto, existem questões-chave que possibilitam elaborar estruturas de análise e comparação de estudos.

A metodologia criada por Hammill *et al.* (2013) definiu uma estrutura de análise e comparação baseada em quatro componentes da avaliação de vulnerabilidade: concepção, entrada, saída e processo de condução. Em linhas gerais, a **concepção** aborda de que modo a vulnerabilidade é tratada conceitualmente; a **entrada** aborda os dados, ferramentas e incertezas; a **saída** diz respeito aos produtos e resultados com suas respectivas métricas; e o **processo de condução** diz respeito a parceiros, níveis de participação, coordenação e etapas dos estudos. Para o presente trabalho, foi realizada customizações, sem abandonar as demais metodologias e incorporar as características nacionais, de forma a ampliar o escopo da análise e permitir comparar estudos de avaliação de CCIAV no país.

Destaca-se a sua utilidade para categorizar as principais questões que devem ser consideradas na concepção de uma avaliação de vulnerabilidade: definir e focar a análise; verificar necessidades e lacunas de informação; identificar especialistas e outras partes interessadas a serem consultados; pensar sobre como o processo será coordenado e os resultados apresentados e comunicados; e entender semelhanças e diferenças na forma como a vulnerabilidade e a adaptação estão sendo conceituadas e avaliadas.

A descrição dos indicadores e das metodologias usados nos estudos brasileiros sobre a vulnerabilidade, os impactos e a adaptação de cidades, regiões e estados às mudanças climáticas permitiu alcançar as conclusões a seguir apresentadas.

No que se refere ao item **concepção metodológica**, observa-se que os objetivos e as motivações de cada projeto se diferenciaram. Alguns, por exemplo,

mais endereçados em identificar e avaliar como podem ser afetados pelas mudanças climáticas. Outros voltados ao fortalecimento da capacidade de adaptação local e aumento da resiliência urbana.

Quanto à parte conceitual, dois estudos adotaram a avaliação integrada como base de análise, enquanto os restantes fizeram uma avaliação de vulnerabilidade. O enfoque também foi diversificado, uma vez que alguns se basearam mais nos aspectos socioeconômicos enquanto outros enfatizaram os aspectos físicos e ainda outros incluíram a temática da saúde. Destaque-se que é preferível que se realize uma análise a mais completa possível, agregando diferentes questões sejam elas ambientais, econômicas ou sociais. Dessa forma, é possível ter um panorama completo, no entanto não se descarta a realizações de análises compartimentadas desde que esta seja bem trabalhada e justificada.

Observa-se que a abrangência territorial também foi bastante diferenciada, variando de áreas urbanas a regiões metropolitanas ou estado, assim como a dimensão temporal e a resolução dos estudos também se diferenciam. Apesar das escolhas serem de forma a satisfazer as necessidades locais, sabe-se que muitas vezes a limitação se dá por falta de dados para todas as regiões. Ademais, a diversificação não favorece a replicação ou comparação de diferentes experiências.

Apesar dessa miríade ao se analisar o objetivo e a quem se endereçou o estudo, todos tiveram como beneficiários os governos e os tomadores de decisão públicos ou privados, e essa comunicação acabou sendo realizada com a publicação dos relatórios. Reforce-se que, uma vez produzidos esses diferentes estudos, é de extrema importância que sejam de fato observados pelos governos e pelos tomadores de decisão.

No item da metodologia denominado **processo** – que envolve principais passos, engajamento de *stakeholders* e coordenação –, observa-se uma maior coerência na abordagem metodológica de todos os estudos, apesar das particularidades. Todos conceberam processos semelhantes, considerando definição de escopo, levantamento de dados e informações, escolha e utilização de modelos/cenários climáticos, definição de áreas prioritárias e produção de *workshops* temáticos para validação dos resultados. Muitas das formas de abordagens são inerentes às lacunas

de dados no país. Além disso, as escolhas pelos modelos/cenários climáticos seguem a tendência de vertentes científicas com a realização de *downscaling* (a regionalização dos modelos), seja dinâmico ou estatístico. Ademais, observou-se a utilização das informações e dos modelos regionais desenvolvidos por órgãos nacionais. Tais escolhas fomentam o aperfeiçoamento e desenvolvimento de modelos nacionais, bem como e possibilitam uma maior divulgação no campo internacional. Como também permitem a comparabilidade e replicação de dados em outros locais.

Como visto no subitem que trata do engajamento de *stakeholders*, o envolvimento da academia, instituições públicas, privadas, organizações não governamentais, dentre outras, é uma via de mão dupla que favorece não só o desenvolvimento do estudo, mas também àqueles que depois se utilizaram dele. Destaca-se a importância de assegurar que essa “parceria” e esse engajamento sejam realizados com frequência e que, de fato, espera-se que haja a utilização das informações, como explicitado anteriormente.

No item **entrada**, que engloba as escolhas para os cenários climáticos/projeções, os métodos e ferramentas de coleta/análise de dados e o tratamento de incerteza, observou-se uma tendência na utilização de determinados dados e análises, o que facilitou a comparabilidade dos estudos neste quesito. Os cenários climáticos mais usados nos estudos foram os cenários globais do IPCC. Sobre os métodos e as ferramentas de coleta e análise, foram adotados diversos bancos de dados. Essa etapa, por muitas vezes, é uma das mais complexas, dada a escassez de dados, em alguns casos, aliada à falta de padronização. Quanto ao tratamento de incertezas – um fator que por si só já traz uma bagagem de dúvidas muito grande –, observa-se que a maior parte dos estudos não soube como tratar a questão e nem comunicar a existência delas. Nesse âmbito, as incertezas identificadas não se limitaram a questão climática, mas também na própria coleta de dados. Observa-se que tal problemática é recorrente em muitos estudos, devendo, portanto, o tratamento de incertezas e a aquisição de dados serem melhor amadurecidos em todas as instâncias.

No item **saída**, que considera conhecimento produzido, métricas/indicadores, lacunas/limitações e observações/recomendações, os estudos avaliados em muito se diferenciaram. O conhecimento produzido envolveu, em sua maioria, mapas

e tabelas com análises de vulnerabilidade dos sistemas ambiental, social e econômico como propostas de políticas públicas, identificação de áreas prioritárias para investimento em adaptação climática, quadros com principais desafios, bancos de dados e matrizes com propostas de ações. Os estudos, por conta de suas particularidades, se utilizaram de métricas diferentes. Tais discrepâncias são grandes empecilhos para a compreensão, de forma conjunta, dos estudos, ou seja, a comparabilidade se torna o maior desafio, caso seja de interesse do tomador de decisão compreender o que está sendo feito em outra região. No entanto, essa mesma vastidão de metodologias, coletas de dados e uso de indicadores permite uma maior gama de opções, possibilitando que diferentes exemplos possam ser extrapolados para diferentes regiões.

As lacunas e limitações apontadas envolvem: a necessidade de utilização de outros modelos climáticos para confirmação de hipóteses; a falta de informação sistematizada sobre precipitação, marés, inundações, deslizamento e erosão em alguns locais; a inadequação das escalas dos modelos climáticos em relação às escalas das áreas estudadas; a insuficiência de equipamentos meteorológicos; a necessidade da elaboração de modelos hidrológicos; a descontinuidade nas séries históricas de dados climáticos; a carência de informação sobre processo de ocupação dos espaços urbanos; a desatualização dos dados; a dificuldade na interpretação de dados; a ausência de confiabilidade nas diferentes fontes. A inclusão desse item na análise é de grande valia para o próprio estudo e para estudos futuros, uma vez que apontam com grande embasamento os próximos passos para o desenvolvimento mais aprofundado e(ou) mais especializado do conhecimento necessário para o enfrentamento de uma questão por uma determinada região. Ademais, as escolhas do tomador de decisão se baseiam em dados mais palpáveis, melhor embasados e mais diretos.

Observa-se que estes estudos são estudos pioneiros no campo da vulnerabilidade no Brasil. Assim, destaca-se a importância deles, mas ao mesmo tempo, a necessidade de aperfeiçoamento das metodologias utilizadas, como também da sua melhor apresentação e de seus resultados.

Algumas recomendações feitas a seguir, certamente, podem servir como crítica e incentivo para uma revisão dos estudos aqui apontados, mas podem também serem extrapoladas para estudos futuros.

Explicitar a abordagem conceitual de vulnerabilidade e adaptação adotadas pelos estudos

Apesar de esse exercício acadêmico parecer desnecessário, é de suma importância para evitar tomadas de decisão erradas.

No caso dessa análise, foi possível observar que nem todos os estudos apresentaram com clareza qual era a abordagem conceitual para vulnerabilidade e(ou) para adaptação. Em alguns casos, foi necessário subentender qual a abordagem utilizada, após a leitura completa do texto, ou seja, uma questão que deveria ser explícita e explicada logo no início não foi contemplada em nenhuma parte do texto.

Criar condições para que o estudo tenha efeito multiplicador

Para que o estudo seja utilizável em outros contextos, é importante que estejam claras todas as hipóteses assumidas, todas as limitações e falta de dados, a metodologia adotada, assim como todas as ponderações feitas para indicadores e fatores escolhidos, uma vez que estes procedimentos envolvem julgamentos de especialistas e podem variar de um estudo para outro. Havendo a clareza dessas questões, por mais que não se possa realizar uma replicação completa, pelo menos uma acomodação entre diferentes estudos pode ser realizada.

Para os estudos analisados, muitas desses elementos que são colocadas como essenciais para o efeito multiplicador da informação não foram verificadas. Observou-se que a maior parte não apresentava, de forma detalhada, a sua metodologia. Muitas vezes não foram apresentadas as etapas que foram seguidas, muito menos em qual metodologia se basearam para desenvolver o estudo ou, até mesmo, se a metodologia proposta era inovadora.

Assim, essas metodologias não se mostram passíveis de serem reproduzidas facilmente, ou seja, a pretensão elucidada nos diferentes estudos de divulgar a sua metodologia e atingir outras cidades brasileiras acaba não sendo possível, uma vez que a comunicação de tais informações é falha.

Muitas vezes, isso ocorre por uma característica peculiar do estudo de vulnerabilidade e adaptação não ser feito, utilizando um método único, mas sim uma aplicação de diversos métodos de forma conjunta. Dessa forma, é imprescindível que

seja claramente explicado esse processo, possibilitando serem observadas, inclusive, as conexões entre os diferentes métodos.

A existência de uma vasta gama de métodos e metodologias é um desafio, em particular, para a própria execução de avaliação. Ademais, não existe uma melhor prática, para que esta seja sempre reproduzida. Cada estudo contará com peculiaridades que deverão ser consideradas. Portanto, é necessário que se verifique, constantemente, os passos que estão sendo tomados. A análise crítica em cima de sua própria metodologia escolhida é fundamental, bem como documentar os desafios enfrentados, seus sucessos e fracassos.

Além disso, a análise da escala local é um tanto complexa, tendo em vista que muitas das informações necessárias para a elaboração de mapas, por exemplo, não estão espacializadas em nível local. Da mesma forma, outras informações necessárias para a realização de projeções não são contempladas, tal como cenários socioeconômicos que acompanhem as projeções climáticas, assim os dados ficam congelados e não traduzem de forma correta a situação. É importante destacar que esse tipo de projeção é delicado e de difícil realização. Uma solução é a projeção por períodos não tão distantes.

Comunicar sobre apoio à tomada de decisão, se for o caso

Em caso do estudo de vulnerabilidade se orientar para a tomada de decisão em políticas de adaptação, deve ser prevista uma etapa para criar prioridades nas opções de adaptação. Se o estudo se dirigir para estratégias de desenvolvimento, políticas e planos, alguns dados apropriados devem ser identificados desde o início do projeto na própria metodologia, de modo a não necessitar se produzir uma lista de opções ao final do trabalho, o que não seria de muita utilidade.

Adicionalmente, no caso do estudo ser voltado para a orientação do problema é importante ter clareza quanto à natureza do que está sendo abordado e entender quais as relações de causa e efeito, bem como o contexto institucional e de governança no qual o problema se situa.

Controle de qualidade dos dados e informes sobre limitações

A ausência de dados não é rara, são diferentes os estudos que encontram esse obstáculo no momento de concepção. No entanto, a melhor abordagem é

a clareza, mesmo em caso da necessidade da utilização de dados com interrupções e falhas nas fontes e nas séries de informações, é preciso transparência quanto a essas limitações, reportando claramente todos os problemas e dúvidas.

É importante destacar que existem outras limitações que vão desde a aquisição de dados, como mencionado anteriormente, até a comunicação do relatório para o público alvo, passando pela escolha metodológica.

Como já mencionado, é de suma importância que a comunicação com o público alvo e outros interessados seja clara. Tanto a linguagem utilizada quanto a forma de apresentação do estudo se não feitas de forma apropriada podem apresentar limitações.

Para o caso desta análise, observou-se que alguns relatórios estavam falhos, tanto na questão da linguagem e da estrutura apresentada quanto da própria reprodução de dados, tal como gráficos, figuras e tabelas com baixa qualidade. Além de não prender a leitura do interessado, o repasse de informações cruciais para o tomador de decisão poderá ser prejudicado. Ademais, outras formas de divulgação dos estudos podem ser incorporadas.

Uma outra limitação encontrada foi o acesso a alguns relatórios. A comunicação dos resultados do estudo deve fazer parte integrante do processo de avaliação. A necessidade de propagar o conhecimento é crucial para a localidade estudada e para a difusão do conhecimento para o público interessado, seja este a comunidade científica ou outros tomadores de decisão.

Uso de múltiplos modelos de circulação global

É desejável que não seja usado somente um modelo de circulação climático uma vez que pode haver uma variância entre os diferentes modelos e estes devem ser considerados para uma análise científica sólida.

Os estudos analisados são bastante limitados nessa questão. Isso se dá pelo fato de existirem poucos modelos regionalizados em escalas apropriadas para o nível local. Esse é um cenário que tende a se alterar, tendo em vista que novos modelos já estão sendo regionalizados. Dessa forma, é importante que as próximas avaliações os incorporem e que os estudos já realizados sejam atualizados com esta nova configuração. O mesmo é válido para os cenários climáticos.

Considerar que não é trivial juntar informações qualitativas e quantitativas

É importante levar em conta opiniões de *experts* sobre resultados apresentados. No entanto, sabe-se da dificuldade de se adquirir essas informações. Ainda mais, o processo de junção de análises quantitativas e qualitativas é um processo a parte que deve ser conduzido de forma consistente.

Comunicar incertezas

Devido à propagação de incertezas já existentes nos modelos e projeções, estas devem ser explicitadas.

Os estudos, de forma simples, comunicam suas incertezas apontando-as como integrantes das projeções. No entanto, não são bem explicadas, principalmente, no que tange à forma que são tratadas.

Observa-se ainda que o tratamento da consideração das incertezas para a avaliação do risco não é feita de forma clara. Mais uma vez, reforça-se a necessidade de comunicar, de forma clara, todos os passos do processo.

Por fim, destaca-se que este estudo é uma primeira tentativa de reunir em um único documento os estudos realizados de avaliação de CCIAV em território brasileiro e produzidos em parceria com os gestores locais. Assim, com a realização de novos estudos, é necessário que se faça uma atualização desse panorama, bem como agregar novas informações de outros estudos visando ao aperfeiçoamento da metodologia aplicada.

Além de ser a primeira tentativa a fazer esta análise de CCIAV, também é realizada a avaliação dos resultados encontrados e a investida em observar as similaridades ou diferenças entre eles. É importante ressaltar a importância que estes estudos têm não só para as suas localidades, mas para todo o país, uma vez que colaboram com o processo de compreensão das vulnerabilidades frente às mudanças climáticas e como se dará o processo de adaptação. É sabido que as cidades são os grandes influenciadores no processo de enfrentamento das mudanças climáticas e todo processo iniciado já se traduz em algo benéfico para essas cidades, mesmo sendo estes ainda os primeiros passos para algumas.

Com uma análise panorâmica e, como dito anteriormente, alguns pontos de análise foram priorizados, tendo em vista a particularidade tanto de fatores ambientais como sociais e econômicos de cada localidade.

Referências

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 29 set. 2014.

CARMIN, J.; NADKARNI, N.; RHIE, Christopher. **Progress and Challenges in Urban Climate Adaptation Planning: Results of a Global Survey**. Cambridge, MA: MIT, 2012.

CARTER, T. R.; MÄKINEN, K. Approaches to climate change impact, adaptation and vulnerability assessment: towards a classification framework to serve decision-making. **MEDIATION Technical Report**, Helsinki, Finnish Environment Institute (SYKE), n. 2.1, 70 p., 2011.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Estudo de Vulnerabilidade Regional às Mudanças Climáticas**. Plano de Energia e Mudanças Climáticas (PEMC). Belo Horizonte: Feam, 2014.

HAMMILL, A. *et al.* **Comparative analysis of climate change vulnerability assessments: Lessons from Tunisia and Indonesia**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2013. 40 p.

ICF GHK. **Climate Change Adaptation Planning in Latin American and Caribbean Cities** – Complete Report: Santos, Brazil. Londres: ICF GHK, 2012.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [FIELD, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK: Cambridge University Press; New York, NY, USA: IPCC, 2014. p. 1-32.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v.29, n. 15, Published online in Wiley InterScience, 2009. Disponível em: <www.interscience.wiley.com>. DOI: <10.1002/joc.1863>.

NOBLE, I; HUQ, S. Adaptation Needs and Options. In: IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [FIELD, C. B. *et al.* (Eds.)]. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. 55 p.

NOBRE, C. A. *et al.* **Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas**: Região Metropolitana de São Paulo. Sumário Executivo, jun. 2010. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/publicacoes/2010/SumarioExecutivo_megacidades.pdf>.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. In: ASSAD, E.D.; MAGALHÃES, A.R. (Eds). **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2014. 414 p.

PRESTON, B. L. *et al.* Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. **Sustainability Science**, v. 6, p. 177-202, 2011.

PROVIA – GLOBAL PROGRAMME OF RESEARCH ON CLIMATE CHANGE VULNERABILITY, IMPACTS AND ADAPTATION. **PROVIA Guidance on Assessing Vulnerability, Impacts and Adaptation to Climate Change** – Consultation document. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2013. 198 p.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change**. Bonn, Germany: UNFCCC Secretariat, 2008. 228 p.

Agradecimentos

Este estudo contou com apoio do MCTI e do GEF (Global Environment Facility) para o subsídio de elaboração da Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção do Clima (UNFCCC).

Agradecemos a Flavia Carloni e Maria Silvia Muylaert, que participaram na elaboração do Projeto Pnud BRA/10/G32, que serviu de base para o presente artigo.



*Empoderando vidas.
Fortalecendo nações.*



Ministério das
Relações Exteriores



Ministério da
Ciência, Tecnologia e Inovação



ISBN 978-85-88063-30-3

