



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL (PPGRHSA)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJEÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA EM ESCALA NACIONAL PARA
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CONSUMO DE ÁGUA
UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO**

Letícia Tábita Naitzel

Porto Alegre, 26 de maio de 2023

Letícia Tábita Naitzel

**PROJEÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA EM ESCALA NACIONAL PARA
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CONSUMO DE ÁGUA
UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO**

Dissertação de mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS como parte da exigência para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre, 26 de maio de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Naitzel, Leticia
PROJEÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA EM
ESCALA NACIONAL PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E CONSUMO DE ÁGUA UTILIZANDO
GEOPROCESSAMENTO / Leticia Naitzel. -- 2023.
122 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Segurança hídrica. 2. Brasil. 3.
Geoprocessamento. 4. Mudanças climáticas. 5. Cenários
futuros de clima e água. I. Fan, Fernando Mainardi,
orient. II. Título.

Letícia Tábita Naitzel

**PROJEÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA EM ESCALA NACIONAL PARA
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CONSUMO DE ÁGUA
UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO**

Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido em 26/05/2023, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador:

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Banca examinadora:

Prof. Dr. Juan Martín Bravo
(Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS)

Dr. Francisco Eliseu Aquino
(Departamento de Geografia / Centro Polar e Climático - UFRGS)

Dr. Saulo Aires de Souza
(Agência Nacional das Águas – ANA)

Porto Alegre, 26 de maio de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por todas as oportunidades recebidas, e também pelas portas fechadas, porque só elas me fizeram chegar onde cheguei com o amadurecimento emocional que tenho hoje;

Aos meus pais, que não mediram esforços para tornar isso possível, me apoiando desde as pequenas metas até os meus sonhos mais ousados;

Às minhas irmãs, que sempre estiveram comigo mesmo de longe;

Aos meus amigos, que sempre entenderam meus sumiços em períodos caóticos da pós-graduação, e sempre me deram forças para continuar quando desanimei;

A todos os colegas e professores que contribuíram para a minha pesquisa e meu desenvolvimento acadêmico durante esses quase dois anos de mestrado;

À banca examinadora, Juan Martín Bravo, Francisco Eliseu Aquino e Saulo Aires de Souza: obrigada por terem aceitado o convite e enriquecerem meu trabalho com seus conhecimentos;

E por fim, mas não menos importante, um agradecimento especial ao meu orientador, Fernando Fan, por toda a troca de conhecimentos, pelos *insights* e ideias bacanas, por sempre ter me entendido, respeitado e me apoiado durante períodos delicados que enfrentei na vida pessoal. Enfim, obrigada por ter contribuído imensamente na minha pesquisa de mestrado, sem a tua ajuda eu não teria chegado tão longe!

RESUMO

Projeta-se que diversos setores que dependem direta ou indiretamente dos recursos hídricos poderão ser afetados drasticamente nos próximos anos pelos impactos das mudanças climáticas, os quais têm evidentes influências antrópicas. A escassez hídrica já afeta entre um e dois bilhões de pessoas no mundo, cuja maioria vive em regiões áridas, onde a diferença entre demanda e oferta de água é a maior que se pode ter. Alterações dos padrões hidrológicos e aumento da intensidade e frequência dos eventos extremos bem com o declínio das chuvas poderão impactar os fluxos dos rios, causando problemas não apenas na oferta de água superficial, mas também no planejamento de infraestrutura e de alocação de água para atendimento de usos múltiplos, aumentando-se o conflito entre a irrigação e outros usos da água. Ou seja, a insegurança hídrica e todos os seus impactos nas mais diversas esferas que dependem de água é um tema cada vez mais importante no cenário mundial, especialmente pela intensificação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Entretanto, ainda há muita divergência em relação à definição de segurança hídrica, bem como em relação à sua mensuração. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi propor e testar a aplicação de um método para definir um Índice de Segurança Hídrica (ISH) no Brasil através da integração de indicadores das dimensões humana, ecossistêmica, econômica e de resiliência utilizando geoprocessamento, tanto para o período atual quanto para o futuro (2081-2100), considerando cenários de mudanças climáticas de Modelos Climáticos Globais do CMIP5. Após a definição dos indicadores e variáveis aplicáveis em cada dimensão, foi realizado o mapeamento de cada dimensão do ISH para o período atual e verificada a sua coerência e a sua representatividade em escala regional, dada a diversidade socioeconômica e ambiental do país. Para as projeções futuras, foram considerados diversos cenários de alteração de consumo per capita na dimensão humana. Além disso, na dimensão econômica, o consumo de água para agropecuária foi reajustado proporcionalmente com a mudança nas projeções futuras de evapotranspiração. Para as dimensões ecossistêmica e de resiliência, foram consideradas as alterações da vazão média calculadas por Brêda *et al.* (2020) sobre as vazões Q_{95} e Q_m . Os resultados do mapeamento do ISH para o período atual mostraram-se condizentes com a realidade e o contexto regionais, porém, quando aplicados os cenários de alteração de consumo de água e de mudança do clima nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, verificou-se uma baixa sensibilidade do ISH frente a essas mudanças, sendo que visivelmente não foi possível observar muita diferença entre o período atual e os períodos futuros. Provavelmente, isso esteja relacionado com a amplitude dos indicadores do ISH no Brasil, especialmente as vazões. Mesmo quando projetadas anomalias de mudanças climáticas de aumento de vazões no Nordeste (que apresenta as mínimas vazões no Brasil) e redução no Norte (onde são observadas as vazões máximas do país), as diferenças na disponibilidade hídrica superficial entre Semiárido e Amazônia ainda são muito grandes. Todavia, a análise dos resultados do ISH entre os biomas aponta para diferenças evidentes, em que o bioma Pantanal, que é a maior planície de inundação do mundo, apresentou os maiores valores mínimos de segurança hídrica, que são muito superiores aos valores encontrados nos outros biomas (com exceção da Amazônia, que também apresenta características de clima úmido). Dessa forma, pode-se dizer que a aplicação de métodos de geoprocessamento em uma escala continental, em que é observada uma grande variabilidade nas características climáticas, ambientais, políticas e socioeconômicas, traz resultados pouco sensíveis a mudanças futuras, sendo necessário, em trabalhos futuros, aplicar tais métodos em escalas espaciais menores, em que tais características são mais homogêneas, e os indicadores do ISH sejam selecionados de acordo com as especificidades locais.

Palavras-chave: segurança hídrica, geoprocessamento, Brasil

ABSTRACT

It is projected that several sectors that depend directly or indirectly on water resources could be drastically affected in the coming years by the impacts of climate change, which have evident anthropic influences. Water scarcity has already affected between one and two billion people in the world, the majority of whom live in arid regions, where the difference between demand and supply of water is the greatest it can be. Changes in hydrological patterns and the increase in the intensity and frequency of extreme events, as well as the decline in rainfall, could impact river flows, causing problems not only in the supply of surface water, but also in infrastructure planning and water allocation to serve multiple uses, increasing the conflict between irrigation and other uses of water. That is, water insecurity and all its impacts on the most diverse spheres that depend on water is an increasingly important topic on the world context, especially due to the intensification of the impacts of climate change on water resources. However, there is still much disagreement regarding the definition of water security, as well as its measurement. Thus, the aim of this study was to propose and test the application of a method to define a Water Security Index (WSI) in Brazil through the integration of indicators of the human, ecosystem, economic and resilience dimensions using geoprocessing, both for the current and future period (2081-2100), considering climate change scenarios from CMIP5 Global Climate Models. After defining the indicators and variables applicable to each dimension of the WSI, they were mapped for the current period and their consistency and representativeness on a regional scale were verified, considering the country's socioeconomic and environmental diversity. For future projections, several scenarios of change in per capita consumption in the human dimension were considered. In addition, in the economic dimension, water consumption for agriculture and livestock was readjusted proportionally with the change in future evapotranspiration projections. For the ecosystem and resilience dimensions, it was considered changes in mean flow calculated by Brêda *et al.* (2020) on the Q_{95} and Q_m flows. The results of the WSI mapping for the current period were consistent with the regional reality and context, however, when applying the scenarios of change in water consumption and climate change in RCP 4.5 and RCP 8.5, it was verified a low sensitivity of the WSI to these changes, and clearly it was not possible to observe much difference between the current period and future periods. This is probably related to the amplitude of the WSI indicators in Brazil, especially the flows. Even when projected climate change anomalies of increased flows in the Northeast (which has the lowest flows in Brazil) and reduction in the North (where the maximum flows in the country are observed), the differences in surface water availability between the Semiarid and Amazon are still very high. However, the analysis of the WSI results between the biomes points to evident differences, in which the Pantanal biome, which is the largest floodplain in the world, presented the highest minimum values of water security, which are much higher than the values found in the other biomes (with the exception of the Amazon, which also has characteristics of a humid climate). Thus, it can

be said that the application of geoprocessing methods on a continental scale, in which a great variability in climatic, environmental, political and socioeconomic characteristics is observed, brings results that are not very sensitive to future changes, being necessary, in future studies, apply such methods on smaller spatial scales, where such characteristics are more homogeneous, and WSI indicators are selected according to local specificities.

Key words: water security, geoprocessing, Brazil

SIGLAS E ABREVIações

ANA	Agência Nacional das Águas
AR5	Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>IPCC Fifth Assessment Report</i>)
AR6	Sexto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>IPCC Fifth Assessment Report</i>)
CMIP5	Fase 5 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>)
CMIP6	Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i>)
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization</i>)
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISH	Índice de Segurança Hídrica
MCG	Modelos Climáticos Globais
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MGB-AS	Modelo de Grandes Bacias adaptado para toda a América do Sul
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
RCP	Rota de Concentração Representativa (<i>Representative Concentration Pathway</i>)
SAR	Segundo Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>IPCC Second Assessment Report</i>)
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>)
SWAT	Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água (<i>Soil and Water Assessment Tool</i>)
UNEP	Nações Unidas para o Meio Ambiente (<i>United Nations Environment Programme</i>)
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (<i>United States Department of Agriculture</i>)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos Gerais.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos	4
3.1.1. Contexto mundial.....	4
3.1.2. Contexto brasileiro.....	7
3.2. Índice de Segurança hídrica (ISH)	17
3.2.1. Estudos sobre indicadores de segurança hídrica no mundo.....	17
3.2.2. Estudos sobre indicadores de segurança hídrica no Brasil	22
3.3. Segurança hídrica e mudanças climáticas.....	23
4. ÁREA DE ESTUDO	27
4.1. Consumo de água.....	28
4.2. Distribuição de água no território	29
4.3. Características climáticas	30
4.4. Pedologia	30
4.5. Sistemas aquíferos	31
4.6. Vegetação	32
4.7. Biomas	34
5. METODOLOGIA	36
5.1. Proposição de indicadores e seleção de variáveis	36
5.1.1. Dimensão humana	38
5.1.1.1. Volume de água consumido pela população	38
5.1.2. Dimensão econômica	40
5.1.2.1. Consumo de água pela agricultura irrigada	40
5.1.2.2. Consumo de água pela pecuária.....	40
5.1.2.3. Consumo de água pela indústria de transformação	40
5.1.3. Dimensão ecossistêmica.....	40
5.1.3.1. Quantidade de água adequada para usos naturais: vazão ecológica	41
5.1.4. Dimensão de resiliência.....	41
5.1.4.1. Reservação Natural (condição natural)	42
5.1.4.2. Reserva potencial explotável	42
5.2. Mapeamento dos indicadores e dimensões do ISH para o período atual	42
5.2.1. Dimensão humana	43
5.2.2. Dimensão econômica	43
5.2.3. Dimensão ecossistêmica.....	43
5.2.4. Dimensão de resiliência.....	44
5.3. Mapeamento dos indicadores e dimensões do ISH para o período futuro	44
5.3.1. Modelos climáticos globais.....	44

5.3.2. Cenários de emissão de GEE	47
5.3.3. Projeções futuras de cada dimensão do ISH	47
5.3.3.1. Dimensão humana	47
5.3.3.2. Dimensão econômica	48
5.3.3.3. Dimensão ecossistêmica	49
5.3.3.4. Dimensão de resiliência	49
5.4. Análise dos resultados de cada dimensão (período atual)	50
5.5. Mapeamento do ISH	51
5.6. Análise de sensibilidade	51
5.7. Limitações metodológicas	52
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6.1. ISH para o período atual.....	54
6.1.1. Mapeamento dos indicadores de cada dimensão.....	54
6.1.1.1. Dimensão humana	54
6.1.1.2. Dimensão econômica	55
6.1.1.3. Dimensão ecossistêmica	58
6.1.1.4. Dimensão de resiliência	60
6.1.2. Mapeamento do Índice de Segurança Hídrica	62
6.2. Análise de sensibilidade	65
6.3. ISH para o período futuro.....	67
6.3.1. Mapeamento dos indicadores de cada dimensão.....	67
6.3.1.1. Dimensão humana	67
6.3.1.2. Dimensão econômica	69
6.3.1.3. Dimensão ecossistêmica	70
6.3.1.4. Dimensão de resiliência	71
6.3.2. Mapeamento do Índice de Segurança Hídrica	72
6.3.2.1. Estatísticas por região	73
6.3.2.2. Estatísticas por bioma	75
7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
9. DISPONIBILIDADE DOS DADOS.....	99
10. APÊNDICES	100
APÊNDICE A: INFORMAÇÕES SOBRE PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO ISH.....	101
A1. Informações sobre a normalização dos arquivos <i>raster</i> de cada dimensão e do ISH.....	101
A2. Informações sobre os <i>rasters</i> normalizados conforme cálculo descrito anteriormente (APÊNDICE A1).....	103
A3. <i>Rasters</i> utilizados para o cálculo do ISH	104
APÊNDICE B: ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO	105
APÊNDICE C: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO POR REGIÃO DO BRASIL	106
APÊNDICE D: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR MACRORREGIÃO BRASILEIRA.....	107
APÊNDICE E: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO POR BIOMA BRASILEIRO	108
APÊNDICE F: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR BIOMA BRASILEIRO	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa esquemático destacando em laranja as regiões onde as secas devem piorar como resultado das mudanças climáticas. Esse padrão é semelhante independentemente do cenário de emissões; no entanto, a magnitude da mudança aumenta sob emissões mais altas.	7
Figura 2. Resumo das mudanças observadas no clima e outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul. FONTE: Adaptado de IPCC (2013).	8
Figura 3. Visão geográfica das mudanças médias anuais (em %) projetadas para o futuro distante (2081–2100) em relação aos dias atuais (1995–2014) no cenário intermediário de emissões SSP2-4.5 para (a) precipitação, (b) evapotranspiração superficial, (c) escoamento total e (d) umidade superficial do solo. O número no canto superior direito de cada mapa representa o número de MCG utilizado para a análise das projeções futuras.	10
Figura 4. Tendências nas vazões mínimas (a) e máximas (b) no Brasil, no período de 1980 a 2015. As regiões vermelhas indicam redução da vazão e as regiões azuis indicam aumento da vazão	11
Figura 5. Vulnerabilidade a inundações e deslizamentos de terra considerando as projeções futuras para o período de 2071 a 2100 no cenário RCP 8.5 do AR5	12
Figura 6. Resultados obtidos por Brêda <i>et al.</i> (2020) para diferentes variáveis climáticas projetadas por MCG do CMIP5, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2081-2100	15
Figura 7. Indicadores e métricas utilizados para calcular o ISH Urbano em Singapura e Hong Kong	19
Figura 8. Metodologia proposta por Babel <i>et al.</i> para cálculo do ISH.....	20
Figura 9. Interpretações do valor calculado para o ISH.....	20
Figura 10. Índice Global de Segurança Hídrica (GWSI) e seus componentes para os dias atuais, e fatores que afetam mudanças futuras na segurança hídrica	21
Figura 11. Dimensões propostas para o ISH da ONU (esquerda) e da ANA (direita).....	23
Figura 12. Indicadores propostos para cada dimensão do ISH da ANA	23
Figura 13. Limiares considerados para mudanças climáticas e perigos relacionados à água	25
Figura 14. Divisão política dos Estados do Brasil.....	27
Figura 15. Consumo médio <i>per capita</i> de água por macrorregião geográfica do Brasil	28
Figura 16. Isoietas médias anuais	29
Figura 17. Classificação do clima no Brasil segundo Köppen.....	30
Figura 18. Classificação dos solos no Brasil.....	31
Figura 19. Sistemas aquíferos no Brasil	32
Figura 20. Unidades fitoecológicas do Brasil.....	33
Figura 21. Biomas brasileiros.....	34
Figura 22. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.....	36
Figura 23. Municípios participantes da coleta de dados sobre água e esgoto do SNIS.....	39
Figura 24. Índice de Segurança Hídrica (a) calculado para todo Brasil pela ANA (ANA, 2019a) e (b) Urbano (ISH-U), disponível no Catálogo de Metadados da ANA (ANA, 2020)	50
Figura 25. Aplicações em SIG para obtenção do mapeamento do ISH	51
Figura 26. Mapeamento do indicador “Volume de água consumido pela população”	55
Figura 27. Mapeamento dos indicadores da Dimensão Econômica do ISH: Consumo de água (a) pela Agricultura, (b) pela Pecuária e (c) pela Indústria de Transformação	57
Figura 28. Mapeamento do indicador “Vazão ecológica” (Q ₉₅): (a) segundo Ribeiro (2020) e (b) após correção de vazões negativas.....	59

Figura 29. Mapeamento dos indicadores da Dimensão de Resiliência do ISH: (a) Disponibilidade hídrica superficial (Vazão média, em m^3/s) e (b) Reserva Potencial Explotável (Vazão explotável, em $m^3/s.km^2$).....	61
Figura 30. Mapeamento geral do Índice de Segurança Hídrica para o período atual (2020) considerando as quatro dimensões analisadas: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência	62
Figura 31. Comparação entre (a) o ISH urbano (ANA, 2020), (b) o Índice de Segurança Hídrica para o período atual (2020) calculado no presente trabalho e (b) aquele estimado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2019a)	64
Figura 38. Análise de sensibilidade da dimensão econômica e do ISH frente a alterações no consumo de água pela indústria de transformação	65
Figura 39. Análise de sensibilidade das dimensões ecossistêmica e de resiliência frente a alterações na Q_{95} e na Q_m , respectivamente, e sensibilidade do ISH frente a essas alterações simultaneamente	66
Figura 32. Mapeamento da dimensão humana do ISH considerando diferentes cenários de consumo <i>per capita</i> de água	69
Figura 33. Mapeamento da dimensão ecossistêmica no período atual e futuro (RCP 4.5 e RCP 8.5), com a anomalia da evapotranspiração (em %) no futuro em relação ao período atual para ambos os cenários de emissão de GEE	70
Figura 34. Vazão Q_{95} atual e futura projetadas pelos MCG do CMIP5 (BRÊDA <i>et al.</i> , 2020), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5	71
Figura 35. Vazão média atual e futura projetadas pelos MCG do CMIP5 (BRÊDA <i>et al.</i> , 2020), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5	72
Figura 36. Mapeamento das anomalias do Índice de Segurança Hídrica no futuro em relação ao período atual para cada região brasileira, considerando diferentes cenários de consumo <i>per capita</i> de água no RCP 4.5 e RCP 8.5	73
Figura 37. Mapeamento das anomalias do Índice de Segurança Hídrica no futuro em relação ao período atual para cada bioma brasileiro, considerando diferentes cenários de consumo <i>per capita</i> de água no RCP 4.5 e RCP 8.5	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Proposta de indicadores e as respectivas fontes de informação	37
Quadro 2. Informações dos Modelos Climáticos Globais do CMIP5 utilizados na análise	46

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas causadas por atividades antrópicas estão diretamente relacionadas com a influência humana no aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis, os quais afetam diretamente o balanço hídrico dos ecossistemas aquáticos e os ciclos biogeoquímicos nas bacias hidrográficas (STOCKER *et al.*, 2013), as doenças transmitidas por vetores ou por veiculação hídrica e as respiratórias (BARCELLOS *et al.*, 2009), e a disponibilidade hídrica para produção de energia hidrelétrica (LIMA; COLISCHONN; MARENGO, 2014) e para produção agrícola (ALBERTO *et al.*, 2006; STRECK; ALBERTO, 2006). Além disso, o efeito das mudanças climáticas é observado em vários aspectos do ciclo hidrológico (MARVEL; COOK, 2022): desde o aumento do vapor d'água na atmosfera (SANTER *et al.*, 2007), alterações na intensidade e nos padrões globais de precipitação que não podem ser explicados por variabilidade climática interna ou forçantes naturais (SCHURER *et al.*, 2020; MARVEL *et al.*, 2017; MARVEL; BONFILS, 2013; ZHANG *et al.*, 2007), aumento dos eventos extremos de precipitação (DONAT *et al.*, 2016), redução da cobertura das geleiras e aumento do escoamento superficial em áreas montanhosas (JAVADINEJAD; DARA; JAFARY, 2020), mudanças no ciclo sazonal de evapotranspiração (BRÊDA *et al.*, 2020; MANKIN *et al.*, 2017) e aumento do risco de secas e estiagens em escalas regionais e globais (CHIANG; MAZDIYASNI; AGHAKOUCHAK, 2021; BONFILS *et al.*, 2020).

Dados os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, tanto pela alteração na precipitação futura (LUIZ-SILVA *et al.*, 2022; CERON *et al.*, 2021; REGOTO *et al.*, 2021; CUNHA *et al.*, 2019) e, conseqüentemente, na distribuição do escoamento superficial (LUIZ-SILVA *et al.*, 2019; SOUZA; AMORIM; REIS, 2022a), quanto pelo aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e inundações (BARTIKO, 2020; DO *et al.*, 2020; Debortoli *et al.*, 2017), a segurança hídrica tem sido um conceito emergente cada vez mais importante para a gestão adequada dos recursos hídricos disponíveis. O termo foi abordado pela primeira vez em 1996 pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, a qual definiu que o termo é composto por sete atributos: quantidade, qualidade, saúde, desenvolvimento econômico, acessibilidade, tempo e preferência (FAO, 1996). Porém, de acordo com as necessidades e situações peculiares de cada localidade, bem como escalas e disponibilidade de dados para mensurar a segurança hídrica, foram surgindo várias definições diferentes (OCTAVIANI; STADDON, 2021; GERLAK *et al.*, 2018; JOHNSON *et al.*, 2018), as quais incluem indicadores que vão desde a qualidade dos mananciais até atributos como a paz e a segurança nacional (BAKKER, 2012; UN-WATER, 2013).

Além das definições, surgiram diferentes formas de mensurar o grau de segurança hídrica de determinada localidade. Tais equações surgiram para calcular indicadores capazes de suprir uma necessidade de entender o quanto uma região está preparada para atender às demandas de água, seja para usos consuntivos ou não consuntivos (KISAKYE; VAN DER BRUGGEN, 2018; HAQUE; RAHMAN; SAMALI, 2016), ou até mesmo para mensurar a disponibilidade hídrica de ecossistemas após eventos climáticos extremos (EEKHOUT *et al.*, 2018; VEETIL; MISHRA, 2016). Jensen e Wu (2018), por exemplo, avaliaram o Índice de Segurança Hídrica Urbana em Singapura e Hong Kong considerando inclusive uma dimensão de Governança, cujos indicadores são planejamento estratégico, regularização dos usos de água e manejo de desastres naturais.

No Brasil, a segurança hídrica, apesar de ser abordada indiretamente na Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída a partir da promulgação da Lei Federal 9.433 em 1997, só teve sua definição divulgada de forma explícita após a crise hídrica de 2014 que atingiu o Sudeste brasileiro, especialmente a cidade de São Paulo (OTTO *et al.*, 2015). Após esse evento, a Conjuntura Nacional dos Recursos Hídricos definiu o termo como a condição que visa garantir quantidade e qualidade aceitável de água para abastecimento, alimentação, preservação de ecossistemas e demais usos, associados a um nível aceitável de riscos relacionados com a água para as pessoas, economias e meio ambiente (ANA, 2016). O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), criado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e pela Agência Nacional de Águas (ANA) no ano de 2019, apresenta um plano de investimentos em projetos no setor até 2035 para redução do risco de escassez de água. Dessa forma, a ANA realizou o mapeamento do índice de segurança hídrica para todo o Brasil considerando as quatro dimensões propostas pela Organização das Nações Unidas (UNESCO, 2019): humana, ecossistêmica, econômica e de resiliência.

Entretanto, frente aos impactos das mudanças climáticas que assolam o país, o propósito do presente estudo foi propor indicadores e calcular um índice de segurança hídrica para todo o território brasileiro, tanto para o período atual quanto para o futuro (2081 a 2100), avaliando como as projeções dos modelos climáticos globais do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afetam as dimensões de segurança hídrica propostos pela ONU (2019). Para tanto, foram considerados os dados de vazão e evapotranspiração do trabalho de Brêda *et al.* (2020), o qual considerou os futuros projetados pelos MCG da Quinta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Além disso, foram consideradas alterações no consumo de água (aumento e diminuição) para avaliar os impactos de uma alteração nos usos consuntivos da água. Essa análise é importante, pois possibilita avaliar quais são as regiões mais vulneráveis à insegurança hídrica não apenas atualmente, mas também em cenários futuros de clima, considerando os diferentes impactos que as mudanças climáticas ocasionarão em cada região do Brasil. Ter conhecimento a respeito dos locais que mais necessitam de atenção para não sofrerem com problemas de indisponibilidade hídrica permite aos órgãos responsáveis agir frente a tais questões. Entendendo-se a direção das projeções, é possível minimizar possíveis impactos (REYER *et al.*, 2017).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Propor e testar a aplicação de um Índice de Segurança Hídrica (ISH) para todo o Brasil utilizando ferramentas de geoprocessamento para integrar indicadores das dimensões humana, ecossistêmica, econômica e de resiliência, tanto para o período atual quanto para o futuro (2081-2100), considerando cenários de mudanças climáticas de Modelos Climáticos Globais.

2.2. Objetivos específicos

I. Propor indicadores para cada dimensão (humana, ecossistêmica, econômica e de resiliência) de acordo com a disponibilidade de dados e aplicabilidade para o contexto nacional, de forma a auxiliar o planejamento e gestão dos recursos hídricos nos mais diversos âmbitos;

II. Compreender a dinâmica espacial de cada dimensão proposta para o ISH (humana, ecossistêmica, econômica e de resiliência) no período atual e avaliar a sua representatividade em todo o território nacional para aplicação das projeções futuras nos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5;

III. Verificar se o Índice de Segurança Hídrica (ISH) proposto é sensível a mudanças nos indicadores de cada dimensão;

IV. Analisar as mudanças no ISH frente aos impactos causados pelas alterações climáticas nos períodos futuros, verificando se existem regiões e biomas do Brasil insensíveis a mudanças quando utilizados os indicadores de segurança hídrica propostos;

V. Analisar o impacto causado na segurança hídrica pela alteração do consumo de água da população brasileira para discutir a possibilidade de conscientização da economia e racionamento de água a partir dos indicadores propostos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos

Projeta-se que diversos setores que dependem direta ou indiretamente dos recursos hídricos poderão ser afetados drasticamente nos próximos anos pelos impactos das mudanças climáticas, os quais têm evidentes influências antrópicas (BONFILS *et al.*, 2020; MARVEL *et al.*, 2019). O abastecimento humano, por exemplo, deve ser afetado pela redução da disponibilidade e qualidade suficiente de água, bem como pelo aumento da demanda por aumento populacional. O declínio das chuvas poderá impactar os fluxos dos rios (IPCC, 2014), causando problemas não apenas na oferta de água superficial, mas também nas bacias hidrográficas geradoras de energia hidroelétrica (LIMA; COLISCHONN; MARENGO, 2014). Alterações dos padrões hidrológicos e aumento da intensidade e frequência dos eventos extremos devem afetar o planejamento de infraestrutura e de alocação de água para atendimento de usos múltiplos, aumentando-se o conflito entre a irrigação e outros usos da água. Até mesmo alterações nos padrões hidrológicos de derretimento da neve são responsáveis por colocar em risco a disponibilidade hídrica de mais de um sexto da população da Terra, que depende de geleiras e pacotes de neve sazonais para seu abastecimento de água (BARNETT; ADAM; LETTENMAIER, 2005). Nos tópicos a seguir, são abordados os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, tanto no contexto mundial quanto no contexto brasileiro.

3.1.1. Contexto mundial

Eventos extremos como secas, enchentes, furacões, ciclones, ondas de calor e frio estão cada vez mais frequentes e intensos no mundo, muito devido às mudanças climáticas, causando várias perdas de vida e prejuízos econômicos em todas as partes (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE, 2016). Um estudo do Instituto de Pesquisa de Políticas Públicas (IPPR, *Institute for Public Policy Research*) afirma que, desde 1950, o número de enchentes ao redor do mundo aumentou 15 vezes, eventos de temperaturas extremas 20 vezes, e os incêndios se tornaram sete vezes mais frequentes (LAYBOURN; BAXTER, 2019). A severidade dos eventos climáticos extremos depende fortemente do nível de exposição e vulnerabilidade a esses eventos, o que varia conforme fatores econômicos, sociais, geográficos, demográficos, culturais, institucionais e governamentais (IPCC, 2012). A influência das mudanças climáticas tende a ser cada vez mais evidente à medida que condições meteorológicas extremas atinjam áreas geográficas maiores. Mudanças na distribuição espacial das chuvas irão ampliar não só as diferenças entre regiões secas e

úmidas (SCHURER *et al.*, 2020), como também os eventos extremos de precipitação (DONAT *et al.*, 2016). Pequenos aumentos de temperatura podem alterar significativamente o tempo de escoamento superficial em áreas montanhosas devido ao degelo mais rápido ocasionado pelo aquecimento (AZIZ *et al.*, 2020).

O IPCC realizou várias pesquisas sobre os impactos econômicos gerais das mudanças climáticas desde o SAR até o AR5. O principal impacto é, sem dúvidas, o aumento da temperatura média global do ar na superfície, que atingiu seu quarto valor mais alto em 2018 se comparado a todo período desde 1880 (NASA; NOAA, 2019). Segundo um relatório especial do IPCC, um aquecimento acima de 2 °C em relação às condições pré-industriais levaria a centenas de milhões de pessoas na pobreza, destruiria os recifes de coral e deixaria alguns países incapazes de se adaptar às mudanças (IPCC, 2018). Os demais impactos são decorrentes desse último, afetando os mais diversos setores: agricultura, recursos hídricos, saúde humana, energia, produtividade dos ecossistemas terrestres e marinhos, silvicultura, biodiversidade e produtividade dos ecossistemas marinhos. Richter e Semenov (2005) e Zhang e Liu (2005) mostraram que poderá ocorrer um efeito negativo do clima sobre o crescimento de culturas, aumentando o risco de perdas de safras no mundo devido a eventos hidrológicos extremos.

Um estudo de Mengistu *et al.* (2021) avaliou os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da Bacia do Rio Nilo Superior, em que as projeções futuras estimadas demonstraram um aumento da temperatura média anual junto a uma diminuição da precipitação na maior parte da Bacia, o que deve afetar o seu regime hidrológico. Os resultados apontaram para um aumento de até 14% do escoamento superficial para o cenário RCP 8.5 em relação ao período de base, porém, estima-se que esse aumento não contribua para o aumento da produção total de água na Bacia, sendo projetado, inclusive, um declínio na produção de água que pode chegar a -22,7% nas projeções futuras desse mesmo cenário. Liu *et al.* (2021) usaram a Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água (SWAT, *Soil and Water Assessment Tool*) para estimar as mudanças projetadas no acúmulo de neve e no fluxo de água em quatro afluentes alpinos do Vale Central – Califórnia, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do CMIP5. Os resultados indicam um possível aumento no pico de vazão de 0,5 a 4 vezes em magnitude nas próximas décadas, e uma chegada desse pico 2 a 4 meses mais cedo devido ao degelo do ano anterior. Além disso, os autores projetam que o abastecimento de água superficial aumente no sul do Vale Central sob os cenários avaliados, mas o aumento da variabilidade temporal criará novos desafios para o gerenciamento do abastecimento, visto que as estações chuvosas tendem a ser mais úmidas, e estações secas, ainda mais secas.

A escassez hídrica já afeta entre um e dois bilhões de pessoas no mundo, cuja maioria vive em regiões áridas, onde a diferença entre demanda e oferta de água é a maior que se pode ter (STRINGER *et al.*, 2021). Somado a isso, tem-se as mudanças climáticas, que irão trazer impactos profundos no futuro. Byers *et al.* (2018) avaliaram esses impactos através da combinação de 14 indicadores nos setores de água, energia e terra para elaborar mapas de *hotspots* de risco multissetoriais, considerando aumentos de 1,5 °C, 2°C e 3 °C na temperatura média global. Os resultados apontam para situações preocupantes, em que, em apenas algumas décadas, milhões de pessoas (aproximadamente metade a população mundial no total) estarão vivendo em condições de estresse hídrico alto. Essas questões já são alvo de estudos em diversos países do mundo, como por exemplo na Austrália, em que Sahin *et al.* (2017) estudaram o potencial de uma infraestrutura de reservatório aliada a sistemas de dessalinização para suprir demandas de água no país. Além disso, de acordo com

Giovinazzi *et al.* (2016), o suprimento de água potável para consumo em hospitais é o segundo elemento de infraestrutura mais crítico para o funcionamento de um hospital, ficando atrás apenas do suprimento de eletricidade. Dessa forma, Bross *et al.* (2021) analisaram as melhorias que podem ser feitas em diversos hospitais de países com altos padrões de abastecimento de água e saúde tomando como exemplo os casos da Alemanha e Áustria. Ou seja, a água é um elemento vital nos mais diversos setores, e sua escassez vem sendo estudada nos mais específicos âmbitos para que riscos e perigos sejam minimizados.

Spinoni *et al.* (2020) analisaram a frequência, a severidade e as projeções das secas extremas no período de 1981 a 2100, nos cenários de concentração RCP 4.5 e RCP 8.5, para encontrar os *hotspots* das futuras secas meteorológicas no mundo. Os estudos concluíram que os índices de seca utilizados projetam secas mais frequentes e severas, especialmente sob cenário RCP 8.5, no sul da América do Sul, na região do Mediterrâneo, no sul da África, no sudeste da China, no Japão e no sul da Austrália. Segundo Spinoni *et al.* (2018), a frequência e severidade dos eventos de seca também devem ser mais intensos em toda a Europa, em ambos os cenários, especialmente na primavera e no verão. Jaguus *et al.* (2022), utilizando os mesmos índices, estudaram as mudanças de longo prazo nos índices de seca para a Europa Oriental e Central, cujos resultados apontam para uma tendência mais seca no verão (junho – agosto), especialmente nas regiões ao sul: República Tcheca, Eslováquia, Hungria, Romênia, Moldávia e sul da Polônia. Hari *et al.* (2020) apontam que aproximadamente 40 milhões de hectares da Europa Central podem ser afetados pela seca na segunda metade do século XXI, considerando o cenário RCP 8.5. No sul de Portugal, a disponibilidade e qualidade da água, especialmente em relação às necessidades hídricas para irrigação em uma região mediterrânea com escassez de água foram estudados por Rocha *et al.* (2020). Os autores utilizaram diferentes índices para avaliar os fluxos de entrada de água e as demandas para irrigação em dois reservatórios da região, concluindo que haverá um impacto negativo ocasionado pelas mudanças climáticas na disponibilidade de água em ambos os reservatórios, especialmente no cenário RCP 8.5. Até mesmo um estudo que utiliza outros métodos de reconstrução do clima pré-industrial, sem recursos de modelos climáticos, concluiu que condições anômalas de seca global estarão presentes em 80% dos anos do século XXI, ou seja, o mundo irá presenciar secas extremas de forma muito mais frequente do que aquela existente no contexto da variabilidade climática natural do passado (MARVEL; COOK, 2022).

A Alemanha é um dos países europeus mais afetados pelas mudanças climáticas, especialmente em relação à disponibilidade de água, devido a uma redução das chuvas e aumento das temperaturas que têm sido observados através de dados do Serviço Meteorológico Alemão (DWD, *Deutscher Wetterdienst*). Um relatório elaborado pela Agência Federal do Meio Ambiente da Alemanha em 2021 destaca, dentre os impactos climáticos com necessidade de ação muito urgente, as consequências da seca e da escassez de água para todos os consumidores de água e em todos os sistemas dependentes de água, frisando a necessidade de uma gestão integrada dos recursos hídricos para lidar com os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água (KAHLENBORN *et al.*, 2021). Além disso, alguns estudos também avaliam um aumento de demanda hídrica relacionado à mudança de comportamentos após a primeira onda da pandemia de Covid-19. Lüdtke *et al.* (2021) verificaram que esse consumo residencial pode ser 14,3% maior por dia, representando uma preocupação para as concessionárias de água caso esses novos costumes e rotinas comportamentais permaneçam pós pandemia.

A Figura 1, apresentada no oitavo capítulo do Sexto Relatório do IPCC do Grupo de Trabalho I, o qual trata sobre os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos, destaca as regiões onde a mudança no clima poderá provocar um aumento na severidade das secas (MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021). Esses eventos são influenciados por vários fatores, como temperatura, vegetação, uso da terra e gestão da água. Vale destacar que, nesse contexto, a seca antropogênica é governada principalmente pelos impactos conjuntos da variabilidade natural da água renovável, das mudanças climáticas e de decisões humanas (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2021). Com o aquecimento global, a evaporação aumenta, fazendo com que até regiões úmidas possam ser mais susceptíveis a secas. No mapa (Figura 1), pode-se observar que as regiões mais afetadas serão o Mediterrâneo, o sul e o leste da África, o sudeste da Austrália e da América do Sul, a América Central, o sul da Europa, e até mesmo a Bacia Amazônica, onde se espera que a precipitação diminuirá com temperaturas mais elevadas. Além disso, com um clima mais quente e um aumento da evaporação, o solo fica mais seco, causando estresse hídrico nas plantas e impactos na agricultura, o que pode resultar em insegurança hídrica. Ainda segundo o relatório do IPCC, se as emissões de gases de efeito estufa não forem reduzidas, projeta-se que cerca de um terço das áreas terrestres globais sofrerá pelo menos uma seca moderada até 2100. Portanto, é muito importante o planejamento para as secas, seja no gerenciamento dos recursos hídricos consumidos, seja na gestão dos usos da terra, pois a influência humana é tão essencial para a seca quanto a variabilidade natural do clima (VAN LOON, 2015).



Figura 1. Mapa esquemático destacando em laranja as regiões onde as secas devem piorar como resultado das mudanças climáticas. Esse padrão é semelhante independentemente do cenário de emissões; no entanto, a magnitude da mudança aumenta sob emissões mais altas.

FONTE: Masson-Delmotte *et al.* (2021).

3.1.2. Contexto brasileiro

De forma geral, há hoje um amplo consenso de que a temperatura aumentará em todo o século XXI. Essa convergência de resultados, entretanto, não se aplica aos cenários climáticos de precipitação, o que fica mais evidente nas escalas regional e local (IPCC, 2014). De acordo com o

Quinto Relatório do IPCC (AR5), ocorrerão mudanças no ciclo hidrológico em função da evolução dos padrões da precipitação (aumento da intensidade e da variabilidade), que poderão afetar significativamente a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios. Os principais impactos identificados nas regiões brasileiras indicam uma potencial intensificação das condições de aridez no centro da região Nordeste, assim como no sul da Amazônia, que passaria de clima tropical úmido para um clima tropical sub-úmido (ANA, 2016). Ainda, há relativo consenso em torno de aumentos da precipitação e do escoamento na região sul do país. Para o Sudeste e centro do país, os estudos não chegaram a tendências convergentes para precipitação. A Figura 2 apresenta os principais impactos das mudanças climáticas projetados para regiões da América Latina e do Caribe. Observa-se que, para o Brasil, são identificadas três regiões: a região 2 (Região Norte e Centro-Oeste do Brasil), a região 6 (Nordeste) e a região 7 (partes do Sudeste, Centro-Oeste e Sul).

Em todas essas regiões, conforme pode ser visto no mapa, há o consenso de que a temperatura irá aumentar no futuro, o que também é sugerido pelos MCG do Sexto Relatório do IPCC (AR6, *Sixth Assessment Report*), lançado em 2022. Na América do Sul como um todo, as projeções para temperatura do ar dos modelos climáticos do CMIP6 indicam aumentos de temperatura entre 2 °C e 3 °C aproximadamente, considerando o cenário SSP2-4.5 (IPCC, 2021). Já para as projeções de precipitação apresentadas pelo IPCC para o Brasil, não existe uma concordância entre os diferentes modelos climáticos sobre o sinal da mudança, ou seja, se as chuvas vão aumentar ou diminuir, tanto para os MCG do CMIP5 quanto do CMIP6. Entretanto, apesar dessas incertezas, em termos médios, as projeções dos modelos dessas duas gerações sugerem redução da precipitação em quase todo o Brasil, exceto na região Sul, onde há projeções de aumento.

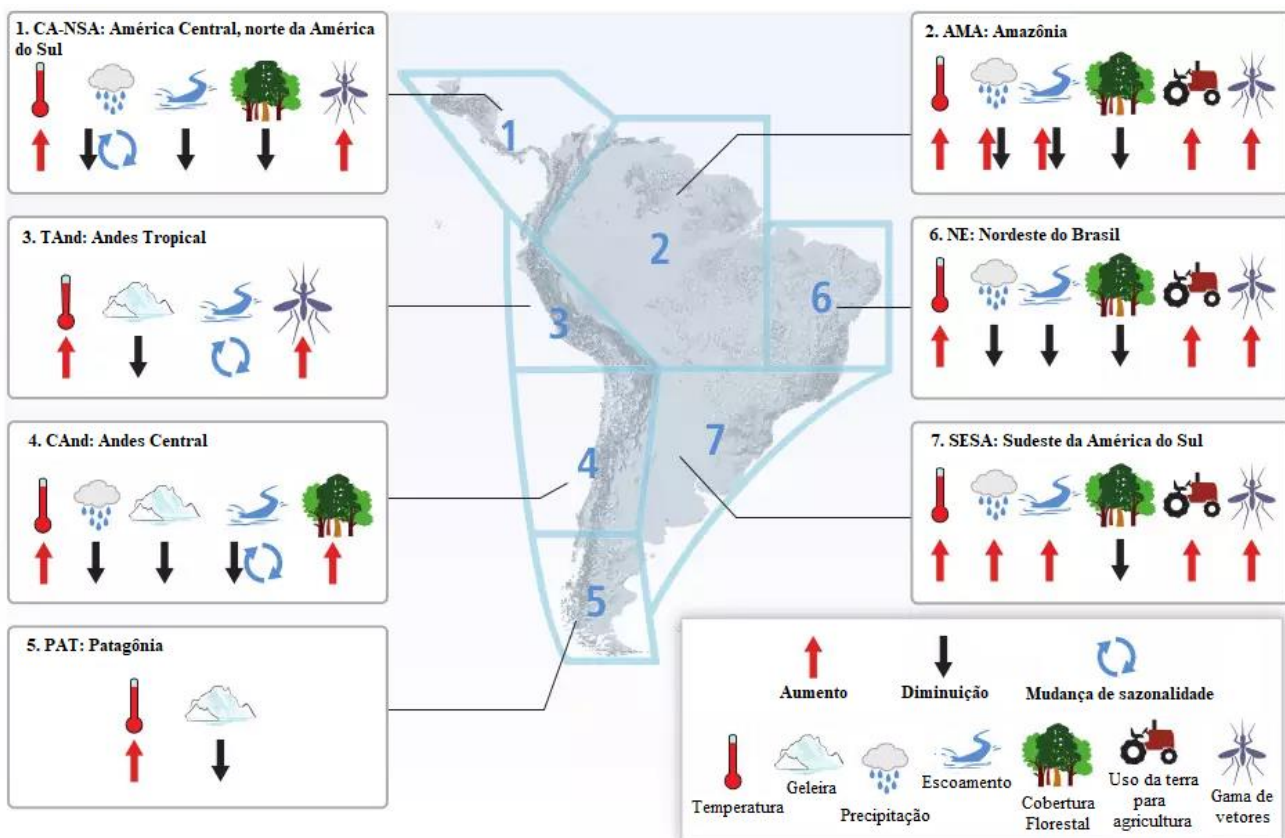


Figura 2. Resumo das mudanças observadas no clima e outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul. FONTE: Adaptado de IPCC (2013).

Vários eventos extremos ocorreram no Brasil desde o início deste século e merecem destaque, tais como o furacão Catarina em março de 2004; as secas históricas da Amazônia em 2005, 2010 e 2016, e as enchentes em 2009, 2012 e 2014 (MARENGO, 2014); as secas no sul do país em 2004, 2005, 2006 e 2012, e as enchentes de 2009, 2010 e 2011; e a seca de 2012 a 2017 no sertão do Nordeste, sendo a pior já registrada na história do Brasil. Segundo dados compilados pelo Grupo de Trabalho II do IPCC no AR6, grandes secas foram registradas no Brasil entre os anos de 2013 e 2020 (CARETTA *et al.*, 2022). Os reservatórios de Três Marias, Sobradinho, e Itaparica, localizados na Bacia do Rio São Francisco, chegaram a registrar 5% da sua capacidade de volume (MARTINS *et al.*, 2018). Além disso, ainda segundo esse trabalho, em dezembro de 2016, o Estado do Ceará registrou 39 (de 153) reservatórios vazios, sendo que outros 42 atingiram seu volume morto, provocando uma interrupção no abastecimento de água em mais da metade (96 de 184) dos municípios do Estado. A seca que atingiu o Sudeste em 2014 fez com que, em janeiro de 2015, o Cantareira, maior sistema de abastecimento de água utilizado em São Paulo, baixasse para um volume de água de apenas 5% da capacidade (OTTO *et al.*, 2015). Com essa redução, o número de pessoas atendidas caiu de 8,8 milhões de pessoas para 5,3 milhões de pessoas, e outros sistemas tiveram de assumir o abastecimento para o restante. A seca de 2019-2021 observada na Bacia de La Plata já é classificada entre os cinco principais eventos no sudeste da América do Sul desde 1950, trazendo impactos para diversos setores como agricultura, navegação, produção de energia e abastecimento de água para consumo (NAUMANN *et al.*, 2021).

O Grupo de Trabalho I do IPCC traz as mudanças de longo termo projetadas pelos MCG do CMIP6 para as variáveis climáticas relacionadas ao ciclo hidrológico no cenário intermediário SSP2-4.5, conforme apresentado na Figura 3 (ARIAS *et al.*, 2021). As áreas hachuradas com linhas diagonais representam locais com pouca concordância (inferior a 80%) dos modelos quanto ao sinal da mudança. Pode-se observar que, para a área do Brasil, não há muita concordância dos modelos quanto ao sinal das alterações de precipitação, evapotranspiração e vazão, com exceção da região austral do país. No Sul do Brasil, os modelos concordam que haverá um significativo aumento nas chuvas (chegando a 30%) e no escoamento (anomalias positivas chegando entre 20% e 40%) no futuro distante (2081 a 2100) em relação ao período histórico de 1995 a 2014. Para a evapotranspiração, essas mudanças não são tão visíveis, embora seja possível visualizar algumas regiões do sul do país em que há concordância dos modelos de que haverá anomalias positivas de ET chegando a 5%. A umidade superficial do solo é a única variável climática relacionada ao ciclo hidrológico cujas projeções futuras apresentam maior concordância dos MCG, especialmente na região Centro-Oeste e Norte, onde se localiza a Bacia Amazônica. Nessas regiões, espera-se uma diminuição da umidade do solo que pode chegar a 8% no futuro distante. De forma geral, essa figura mostra que, sem reduções drásticas nas emissões de gases de efeito estufa, o aquecimento global induzido pelo homem estará associado a mudanças generalizadas em todos os componentes do ciclo da água.

Long-term water cycle variables changes for SSP2-4.5 (2081–2100 vs 1995–2014)

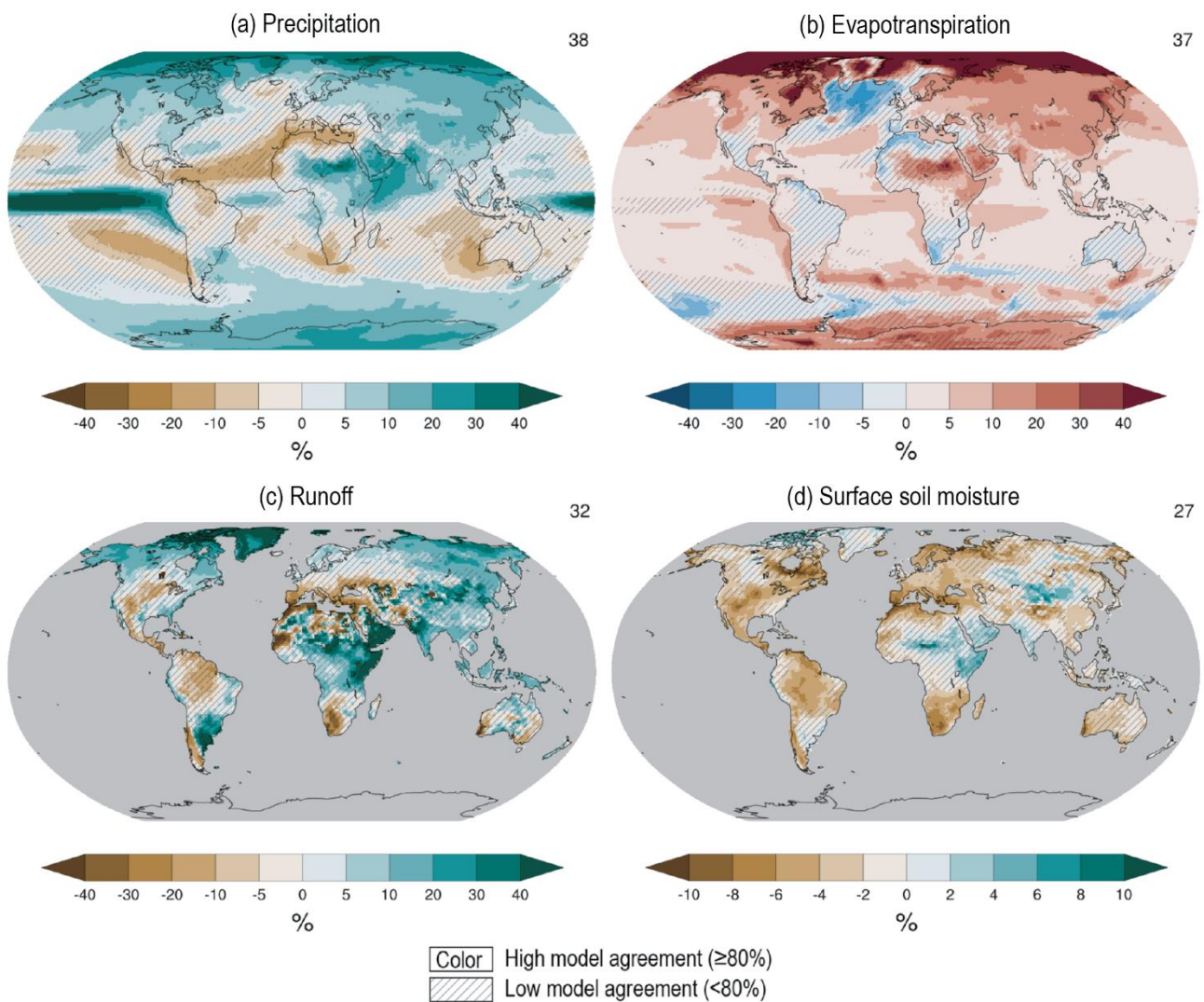


Figura 3. Visão geográfica das mudanças médias anuais (em %) projetadas para o futuro distante (2081–2100) em relação aos dias atuais (1995–2014) no cenário intermediário de emissões SSP2-4.5 para (a) precipitação, (b) evapotranspiração superficial, (c) escoamento total e (d) umidade superficial do solo. O número no canto superior direito de cada mapa representa o número de MCG utilizado para a análise das projeções futuras.

FONTE: Arias *et al.* (2021).

Chagas, Chaffe e Blöschl (2022) analisaram as tendências de vazões máximas e mínimas no Brasil para o período de 1980 a 2015, e os resultados são apresentados na Figura 4. Pode-se observar que, tanto para a região Sul quanto para a região Norte, existe uma tendência de aumento das vazões, especialmente as vazões mínimas. Os autores verificaram que as secas estão relacionadas com a diminuição de chuvas e o concomitante aumento do uso de água em zonas agrícolas, e que elas ocorrem principalmente na parte central do Brasil, abrangendo Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste (42% da área de estudo). Tal resultado corrobora com o trabalho de Cuartas *et al.* (2022), os quais analisaram dados de chuva e vazão em diversas bacias hidrográficas relevantes para a produção de energia elétrica ao longo do período de 2010 a 2021 e concluíram que eventos de secas hidrológicas têm sido mais frequentes e intensos recentemente. Além disso, na região de São Paulo, uma tendência negativa nas vazões (diminuição entre 30 e 40%) já havia sido identificada anteriormente

por Freitas (2020), que analisou dados das bacias que contribuem para o abastecimento de água para a região metropolitana do Estado, no período de 1976 a 2009, e verificou que essa diminuição advém principalmente da mudança de uso da terra, não em função de mudanças no clima.

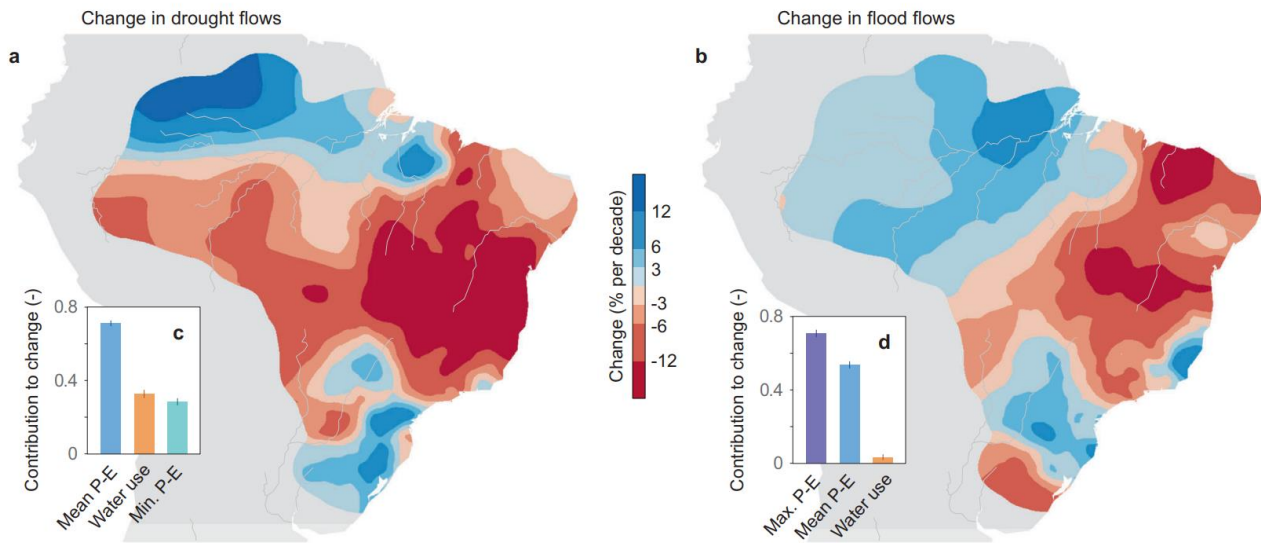


Figura 4. Tendências nas vazões mínimas (a) e máximas (b) no Brasil, no período de 1980 a 2015. As regiões vermelhas indicam redução da vazão e as regiões azuis indicam aumento da vazão
FONTE: Chagas *et al.* (2022).

Reduções de vazão no Rio São Francisco e aumentos de vazão na Bacia do Rio Paraná foram observados por Luiz-Silva *et al.* (2019), os quais analisaram séries temporais de precipitação e vazão em dez bacias hidrográficas relevantes para a produção de energia elétrica no Brasil, para o período de 1961 a 2006. Souza, Amorim e Reis (2022a) chegaram a resultados semelhantes quando analisaram séries temporais diárias de 855 postos fluviométricos no Brasil: um padrão regional de vazões decrescentes predominando na região Nordeste do Brasil, e de vazões crescentes na Bacia do Alto Paraguai, na Bacia do Paraná, na região Sul do Brasil e no Norte, principalmente na região da Amazônia. Fleischmann *et al.* (2023) verificaram que, na região amazônica, a área inundada durante as cheias aumentou 26% desde 1980.

Em relação aos eventos de cheias e inundações, um estudo de Bartiko (2020) mostra que tais eventos estariam se tornando mais frequentes e intensos em regiões úmidas (Norte, Sul e parte do Sudeste do Brasil), o que corrobora com o mapa apresentado na Figura 4(a). Nesse estudo, os autores avaliaram 738 estações fluviométricas no Brasil entre 1976 e 2015. Já Do *et al.* (2020), analisando séries de vazões observadas e simuladas por modelos hidrológicos globais no período de 1971 a 2005, encontraram regiões com evidências de aumento das vazões máximas, incluindo partes do Sul e Sudeste do Brasil, e outras regiões com evidências de reduções nas vazões máximas, incluindo o Nordeste e Centro-Oeste brasileiro e partes do Sudeste do Brasil. Tais dados são semelhantes aos encontrados em um estudo anterior (DO; WESTRA; LEONARD, 2017), em que os autores utilizaram dados de vazões diárias observadas em 9.213 postos fluviométricos de todo o mundo para verificar as mudanças históricas no risco de inundação em escala global. De forma geral, foram observadas reduções em um grande número de estações no oeste da América do Norte e nas regiões cobertas de dados da Austrália, e tendências crescentes em partes da Europa, leste da América do Norte, partes da América do Sul e sul da África.

Um estudo de Debortoli *et al.* (2017) propôs um índice para verificar os *hotspots* de vulnerabilidade a inundações e desastres de deslizamento de terra considerando as mudanças climáticas no cenário RCP 8.5 do CMIP5, para o período de 2071 a 2100. Para isso, os autores utilizaram um modelo regional Eta-20 km aninhado em dois modelos globais: Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, sendo os resultados apresentados na Figura 5. Pode-se observar que a maior vulnerabilidade no cenário futuro de ambos os modelos segue o mesmo padrão histórico apresentado (1961-1990), porém de forma mais intensa. As figuras do lado direito apresentam as anomalias de aumento de vulnerabilidade, em que se pode observar que as regiões de Santa Catarina, leste do Paraná, costa nordeste de São Paulo, grande parte do Pará, bem como trechos do Estado do Rio de Janeiro e do Maranhão tendem a ter um incremento nas possibilidades de inundações e deslizamentos de terra considerando o modelo HADGEM2-ES. Já para o modelo MIROC5, as regiões já consideradas de alta vulnerabilidade tendem a se tornar ainda mais vulneráveis, como a região serrana do Rio de Janeiro, porções da Serra da Mantiqueira, interior e sul de Minas Gerais e diversas localidades na costa brasileira. O Sul do Brasil é a região com os incrementos mais expressivos (chegando a 50%), passando de uma vulnerabilidade “baixa” para uma vulnerabilidade “alta” no final do século XXI.

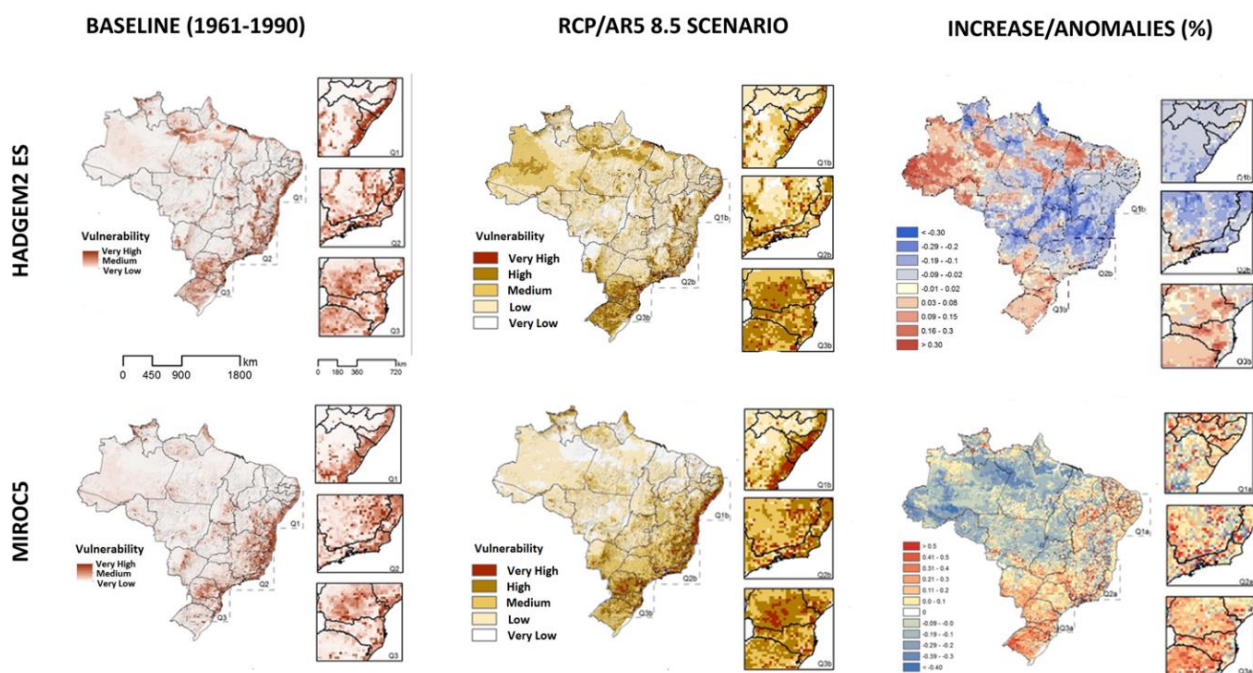


Figura 5. Vulnerabilidade a inundações e deslizamentos de terra considerando as projeções futuras para o período de 2071 a 2100 no cenário RCP 8.5 do AR5

FONTE: Debortoli *et al.* (2017).

Em relação ao aumento da temperatura do ar, pesquisas têm demonstrado que seus impactos são relevantes em vários setores, havendo estudos sobre como as mudanças climáticas afetaram a agricultura, a saúde e a geração de energia hidrelétrica no Brasil desde o início dos anos 2000. Assad *et al.* (2004) avaliaram os efeitos de um aumento da temperatura média do ar de 1 °C, 3 °C e 5,8 °C aliado a um incremento de 15% da precipitação na cafeicultura brasileira. O estudo levou em conta o cultivo de café arábica nos Estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Mantendo-se as

características genéticas e cultivares do café, os resultados apontam para uma redução de áreas aptas superior a 95% na maior parte das localidades caso o aumento de temperatura chegue a 5,8 °C. Scianni (2014) estudou o efeito das mudanças climáticas sobre a geração da energia hidrelétrica no Brasil, apontando para os riscos da indisponibilidade de água em quantidades satisfatórias para atender à demanda de energia elétrica. No trabalho, são usados modelos climáticos globais do IPCC e modelos hidrológicos que relacionam chuva e vazão para quantificar a energia assegurada nas principais bacias do país.

Segundo Nobre (2014), as perdas causadas por eventos extremos são cada vez maiores não apenas devido ao aquecimento global, mas devido ao constante e intensivo desmatamento da região amazônica. A circulação das células de Hadley explica a simetria na biodiversidade do mundo: grandes florestas na linha do Equador, e dois grandes desertos na linha dos trópicos. No Brasil, país continental cuja extensão vai além do trópico de Capricórnio, a tendência à desertificação é contrariada pela presença dos chamados “rios voadores” ou “rios atmosféricos” oriundos da Amazônia. Esse conceito, introduzido por Newell *et al.* (1992), diz respeito ao transporte de grandes quantidades de água (superiores ao valor transportado pelo Rio Amazonas) na forma de vapor, que cai na forma de precipitação, durante o verão, sobre o quadrilátero afortunado. Esse processo é o responsável por não haver um deserto na região centro-sul do Brasil, tornando-se tão importante a ponto de virar alvo de estudo por outros pesquisadores posteriormente (ARRAUT *et al.*, 2012; SPRACKLEN; ARNOLD; TAYLOR, 2012; MARENGO *et al.*, 2004). Não apenas a Floresta Amazônica é importante para atenuar os efeitos do aquecimento global, como também outras formações florestais, como é o caso da Mata Atlântica. Um estudo de Wanderley *et al.* (2019) analisou a relação entre a temperatura da superfície terrestre e áreas antropizadas em uma região de Mata Atlântica, concluindo que um aumento de 25% de área não florestada resulta em um aumento de aproximadamente 1 °C na região.

O desmatamento é uma ameaça ambiental, visto que reduz a reciclagem da umidade da vegetação para a atmosfera, além de reduzir o volume de água transportado por rios aéreos. Os impactos de um desmatamento total ou parcial da Amazônia podem ser sentidos tão longe quanto os EUA ou a China (LAWRENCE; VANDECAR, 2015), pois diminuiria a água na atmosfera, o que significa menos chuva e, conseqüentemente, maior dificuldade para o cultivo de alimentos. Somando-se as projeções de redução de precipitação e aumento do período de seca na maior parte da Amazônia (projetadas pelos modelos climáticos globais) às reduções de umidade projetadas como resposta ao desmatamento, existe, ao que tudo indica, uma suscetibilidade de “savanização” de parte da Amazônia (LOVEJOY; NOBRE, 2018; NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2007). Além disso, quando a floresta é sujeita a períodos atipicamente secos, aumenta o risco de ocorrência de queimadas que podem destruir grandes áreas de vegetação e liberar fumaça e vários outros poluentes atmosféricos, afetando não só a população, como também o início da estação chuvosa e a quantidade de chuva na região (MARENGO *et al.*, 2018; ANDREAE *et al.*, 2004). Durante a seca de 2016 na Amazônia, o número de incêndios cresceu 36% em relação aos 12 meses anteriores (ARAGÃO *et al.*, 2018). A nuvem de fumaça que atingiu a capital de São Paulo em agosto de 2019, que pode ser visualizada no Banco de Dados de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi o resultado de uma frente fria associada ao transporte de fumaça oriunda das queimadas na Floresta Amazônica (PRIZIBISZKI, 2019). Tal evento evidencia que as conseqüências geradas pelas queimadas na Amazônia podem se estender a centenas de quilômetros. E essas queimadas são resultantes não apenas da fragmentação florestal e do aquecimento global, mas são intensificadas principalmente por duas atividades antrópicas: a prática agrícola predominante na região, uma tradição milenar que

utiliza fogo e nem sempre é realizada de forma controlada, e o desmatamento realizado através de queimadas para expandir as fronteiras agropastoris, uma das principais preocupações para o aquecimento global nas últimas décadas. Ao que tudo indica, não estamos tão longe de um ponto de ruptura da estabilidade climática e ecológica das florestas tropicais da Amazônia, afetando o globo como um todo (MARENGO *et al.*, 2018).

As vazões dos rios são responsáveis por sustentar ecossistemas e usos d'água como abastecimento humano, irrigação, produção de energia e navegação (LAAHA *et al.*, 2013). Porém, recentemente a demanda por água aumentou dramaticamente, colocando mais pressão sobre os recursos hídricos disponíveis, o que aumentou a necessidade de gerenciamento do uso desses recursos, especialmente durante períodos de baixas vazões e sob efeitos de mudanças climáticas. Vários estudos envolvendo modelos climáticos globais foram realizados para avaliar os impactos das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas. Bravo *et al.* (2013) utilizaram projeções de MCG no Modelo de Grandes Bacias do IPH (MGB-IPH) para analisar os impactos das mudanças climáticas nas vazões da Bacia do Alto Uruguai. Como houve grande dispersão nas projeções de precipitação, metade dos resultados do modelo utilizado foram projeções de aumento de vazão do rio, e a outra metade foram projeções de diminuição de vazão.

Brêda *et al.* (2020), seguindo metodologia semelhante, utilizaram dados dos MCG oriundos do CMIP5 para analisar as mudanças na temperatura, precipitação, evapotranspiração, vazão de rios e índice de aridez em toda América do Sul, conforme pode ser visto na Figura 6. Os autores concluíram que há a tendência de aumento das descargas na Bacia do Rio Uruguai em ambos os cenários analisados (RCP 4.5 e RCP 8.5), e grande redução na vazão média anual nas Bacias de Orinoco, Tocantins e Amazonas. Buscando entender os fatores que possivelmente contribuem para uma aceleração do ciclo hidrológico, Brêda *et al.* (2023) analisaram os extremos de precipitação e vazão em toda a América do Sul, para grandes bacias (maiores que 1.000 km²). Os autores utilizaram o modelo hidrológico MGB com dados de quatro modelos climáticos, procurando analisar alterações potenciais nas vazões máximas. Eles mostraram que tanto a mudança das chuvas intensas como a mudança das condições antecedentes de umidade nas bacias hidrográficas influenciam nas vazões máximas, anulando ou amplificando os resultados de saída do modelo. Seguindo a mesma linha metodológica, Sorribas *et al.* (2016) já haviam analisado os efeitos das mudanças na vazão dos rios e nas inundações causadas na Bacia Amazônica através do modelo hidrológico-hidráulico MGB-IPH, utilizando projeções de modelos climáticos do CMIP5. Cenários futuros de modelos indicam um aumento na vazão média e máxima em grandes rios que drenam os Andes orientais no noroeste da Amazônia, e uma diminuição das descargas dos rios das bacias situadas ao leste do Amazonas.

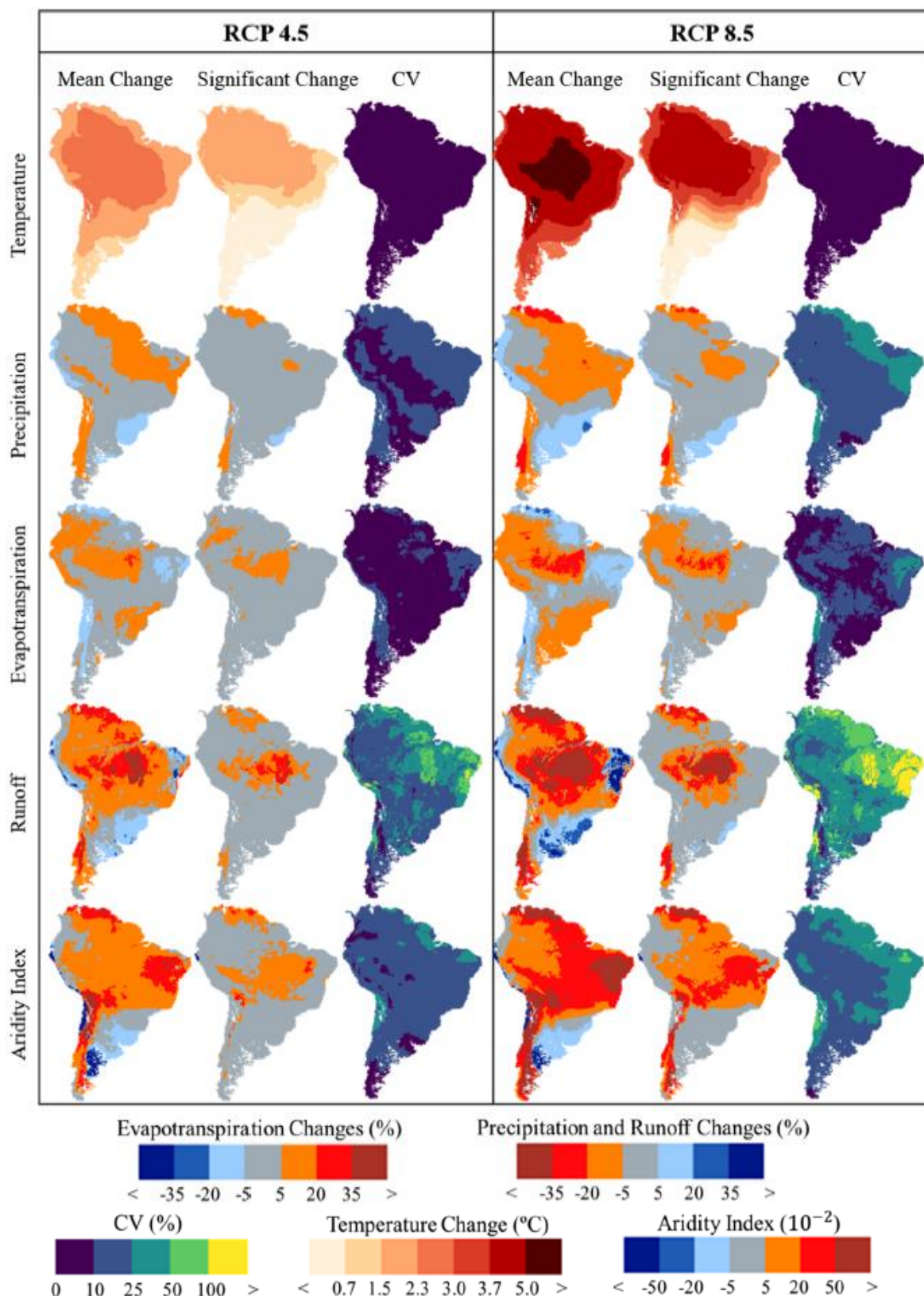


Figura 6. Resultados obtidos por Brêda *et al.* (2020) para diferentes variáveis climáticas projetadas por MCG do CMIP5, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2081-2100
 FONTE: Brêda *et al.* (2020)

Em relação às mudanças climáticas projetadas na precipitação, diversos estudos apontam para aumento da frequência de secas pela diminuição de chuvas. Cunha *et al.* (2019), por exemplo, analisaram dados de precipitação em todo o Brasil e estimaram o Índice Integrado de Secas (IDI,

Integrated Drought Index), para o período de 2011 a 2019, e observaram que, excluindo a região sul, as demais regiões brasileiras foram expostas aos eventos de seca mais severos e intensos dos últimos 60 anos. Ainda segundo os autores, a seca de 2015-2016 na Amazônia foi considerada a mais severa e generalizada dos últimos 100 anos. Eles ainda destacaram que a seca de 2014-2015 na região Sudeste gerou uma grave crise hídrica com alto impacto no abastecimento de água e na geração de energia hidrelétrica. Ceron *et al.* (2021), por sua vez, analisaram dados de chuva na Bacia do Rio da Prata, no período de 1981 a 2018, e concluíram que houve um aumento no número de dias consecutivos sem chuva na parte norte da bacia. Em contrapartida, na parte sul da Bacia houve um aumento da intensidade da chuva nos dias chuvosos, especialmente nos meses de setembro a fevereiro. Regoto *et al.* (2021) analisaram séries de dados de temperatura e precipitação para todo o Brasil, e observaram que há uma tendência de redução na precipitação na região Nordeste do Brasil, especialmente no verão e no outono, e uma tendência de aumento da umidade na região Sul, com uma redução no número consecutivo de dias sem chuva, especialmente na primavera. Luiz-Silva *et al.* (2022) analisaram dados de temperatura e precipitação e calcularam indicadores climáticos para a Bacia do Rio Xingu, observando tendências de aumento da precipitação na parte norte da Bacia e tendência de redução na precipitação na parte sul da Bacia, onde também foi detectada uma tendência de aumento do número de dias consecutivos sem chuva, indicando períodos de seca mais duradouros nas décadas seguintes.

Marengo *et al.* (2022) verificaram uma tendência de intensificação das secas nos anos mais recentes numa ampla região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, entre o Nordeste e o Norte do Brasil, não apenas pela expansão do agronegócio, mas também devido aos impactos das mudanças climáticas. Souza, Amorim e Reis (2022b) analisaram dados de precipitação de 2.456 postos pluviométricos do Brasil, procurando identificar tendências em diversos índices de precipitação associados com extremos hidrológicos de cheias e secas. Eles observaram padrões consistentes de aumento do número de dias consecutivos sem chuva no Nordeste do Brasil, e na Bacia dos Rios Tocantins e Araguaia. Na região Sul do Brasil, os autores identificaram tendências de condições mais úmidas. De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), em virtude do alto grau de vulnerabilidade das regiões Norte e Nordeste do Brasil, ressalta-se que as projeções mais preocupantes para o final do século são para os biomas Amazônia e Caatinga, cujas tendências de aquecimento na temperatura do ar e de diminuição nos padrões regionais de chuva são maiores do que a variação média global (PBMC, 2020). Em geral, além dos efeitos sobre as águas superficiais, a mudança climática deverá afetar as taxas de recarga de águas subterrâneas e os níveis dos aquíferos (ANA, 2016). No Nordeste, a diminuição das chuvas acarreta em menor quantidade de água penetrando no solo, podendo haver uma redução de até 70% na recarga dos aquíferos dessa região, com potencial de prejudicar o abastecimento de cerca de 20 milhões de pessoas que ali vivem (CEDEPLAR; FIOCRUZ, 2008). Em 2015, foram aprovados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com 169 metas, como parte da Agenda 2030. Neste estudo, destaca-se o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), com oito objetivos relacionados à importância de garantir a disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento básico para todos. Um estudo de Barbado e Leal (2021) constatou que a questão da água está permanentemente incluída nas agendas governamentais, mas no Brasil, apesar da implementação parcial das metas do ODS 6, ainda existem muitas lacunas e desafios para sua implementação plena.

3.2. Índice de Segurança hídrica (ISH)

A insegurança hídrica e todos os seus impactos nas mais diversas esferas que dependem de água é um tema bastante emergente, cada vez mais importante no cenário mundial, especialmente pela intensificação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, conforme supracitado. Por ser um assunto relativamente recente no contexto global, mas cada vez mais importante para orientar a gestão adequada dos recursos hídricos de forma a garantir a disponibilidade de água (JOHNSSON *et al.*, 2018), ainda há muita divergência em relação à sua definição, bem como em relação à sua mensuração. Dessa forma, os estudos apresentam índices de segurança hídrica cujos indicadores e variáveis variam de acordo com as especificidades locais e escala de abrangência, bem como de acordo com a disponibilidade de dados para estimar a segurança hídrica. Diversos pesquisadores desenvolveram índices para representar a segurança hídrica local/regional/nacional de acordo com tais aspectos, conforme é descrito no tópico 3.2.1. Porém, no Brasil, país de escala continental, que abrange os mais variados tipos de solo, vegetação, clima, condições sociais, econômicas e culturais, bem como uma grande lacuna na existência de dados em quantidade e de qualidade, o desafio de se encontrar um índice que seja representativo é bastante complexo. No tópico 3.2.2, essas questões são abordadas com maior detalhe, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento do índice de segurança hídrica pela Agência Nacional das Águas.

Vale destacar que existe uma diferença entre escassez hídrica e insegurança hídrica. O primeiro conceito diz respeito a uma incompatibilidade entre a demanda por água doce e sua disponibilidade, o que pode ser quantificado em termos físicos. Já a insegurança hídrica é um conceito mais amplo, que vai além da escassez física de água, abrangendo outros aspectos mais abstratos como acesso a água em quantidade e de qualidade, segurança contra eventos hidrológicos extremos (secas e inundações), e governança apropriada da água que garanta o acesso à água potável (SADOFF; BORGOMEIO; UHLENBROOK, 2020). Dessa forma, os níveis relativos de segurança hídrica em diferentes locais podem ser comparados usando métricas que representam aspectos críticos de segurança (GAIN; GIUPPONI; WADA, 2016), idealmente com limites para seguro/inseguro em uma escala relativa para comparação com a experiência local (YOUNG *et al.*, 2019). Por fim, pode-se dizer que a futura segurança hídrica dependerá não apenas da magnitude das mudanças climáticas em escala regional, que nem sempre é o fator dominante, mas também de fatores não climáticos, incluindo práticas agrícolas, demanda de água e governança hídrica (CARETTA *et al.*, 2022). Entretanto, como a mudança no clima provocará potenciais impactos na disponibilidade hídrica, nos eventos extremos e na qualidade de água, é necessário um planejamento para adaptação às mudanças.

3.2.1. Estudos sobre indicadores de segurança hídrica no mundo

Por ser um conceito emergente, ainda não há uma definição concreta do significado de segurança hídrica, havendo atualmente uma grande dificuldade em se universalizar o termo e criar medições equiparáveis para diferentes locais e/ou escalas (GERLAK *et al.*, 2018). A primeira concepção de segurança hídrica foi feita pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, a qual definiu que o termo é composto por sete atributos: quantidade, qualidade, saúde, desenvolvimento econômico, acessibilidade, tempo e preferência (FAO, 1996). Logo depois, no ano de 2000, a Associação Mundial para a Água (GWP, *Global Water Partnership*) definiu o conceito

incluindo outras características relevantes para a segurança hídrica: ecossistemas, sustentabilidade e riscos/perigos, e desconsiderou o desenvolvimento econômico, o tempo e a preferência em sua definição (GWP, 2000). Para esse Organização, as principais dimensões que caracterizam a segurança hídrica são a disponibilidade de água (abordando escassez hídrica), a segurança frente a inundações (abordando risco de inundação), a questão ambiental (abordando poluição da água) e o saneamento (abordando especialmente o tratamento de esgoto).

Em 2009, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) definiu a segurança hídrica como um termo composto pelos seguintes temas: qualidade, desenvolvimento econômico, ecossistemas, saneamento, comida e energia, recursos industriais e transporte (UNEP, 2009). Anos mais tarde, a Organização das Nações Unidas definiu a segurança hídrica como (ONU, 2014):

A capacidade de uma população de salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade para garantir meios de sobrevivência, o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico; para assegurar proteção contra poluição e desastres relacionados à água, e para preservação de ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política.

Ainda, na concepção da ONU, diversos aspectos são importantes para assegurar a garantia de água, tais como o acesso, em quantidade adequada e a um custo acessível, preservação de ecossistemas, fornecimento de água para atividades econômicas, coleta e tratamento de água para garantir a qualidade dos recursos, capacidade de lidar com riscos e perigos, e uma boa governança. Ou seja, à medida que diferentes necessidades e situações foram surgindo, outras considerações foram feitas para o tema de segurança hídrica, das mais variadas naturezas, envolvendo, inclusive, atributos como a paz e a segurança nacional (BAKKER, 2012; UN-WATER, 2013). Lautze e Manthritilake (2012), por exemplo, definiram como componentes essenciais de segurança hídrica: as necessidades básicas, a produção agrícola, o ambiente, a gestão de risco e a segurança nacional e independência. Segundo a revisão bibliográfica realizada por Gerlak *et al.* (2018), as características mais citadas em trabalhos que definem o conceito de segurança hídrica são acesso, ecossistemas, qualidade, quantidade, e riscos e perigos.

De forma geral, o conceito emergente de segurança hídrica ganhou maior relevância em torno de 2000, em termos do número de publicações que abordam o assunto (COOK; BAKER, 2012). Uma década depois, o interesse se tornou muito maior, sendo que a definição de segurança hídrica é muito (e cada vez mais) influenciada pela visão setorial, o que ocasiona a pluralidade das matérias que se relacionam ao tema. Além das definições, os índices criados para dar um valor estimável para a segurança hídrica também são diversos. Vörösmarty *et al.* (2010), por exemplo, analisaram a ameaça global à segurança hídrica humana e à biodiversidade usando quatro classes de estressores (indicadores): perturbação de bacias hidrográficas, poluição, desenvolvimento de recursos hídricos e fatores bióticos. Constataram que quase 80% da população mundial está exposta a altos níveis de ameaça à segurança hídrica e ressaltam a necessidade de se limitar as ameaças em sua origem, em vez de remediar os sintomas de forma dispendiosa, a fim de garantir a segurança global da água para os seres humanos e ecossistemas.

Veettil e Mishra (2016) desenvolveram uma estrutura de modelagem integrada utilizando SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e considerando fatores climáticos e antropogênicos para

investigar a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade de água superficial (BW, *Blue Water*) e subterrânea (GW, *Green Water*) e para quantificar a segurança hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Savannah, nos Estados Unidos. Eles verificaram que existe uma maior quantidade de água superficial para municípios localizados na parte alta da Bacia Hidrográfica do Rio Savannah, enquanto que a maior vazão de água subterrânea foi observada para municípios que apresentam áreas de agricultura intensiva e grandes massas de água (por exemplo, reservatórios).

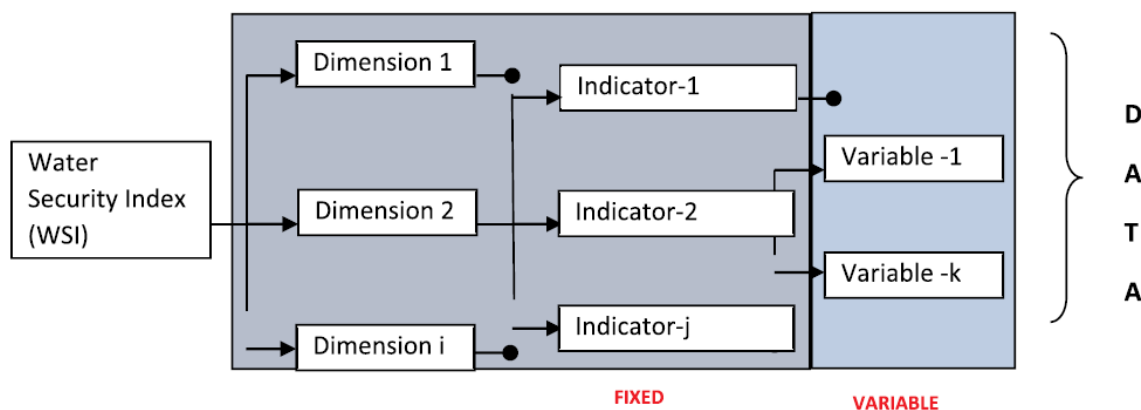
Em 2018, foi aplicado um projeto piloto de cálculo de Indicadores de Segurança Hídrica Urbana em Singapura e Hong Kong (JENSEN; WU, 2018). Os autores desenvolveram um conjunto de indicadores para auxiliar os gestores e políticos nas tomadas de decisão e evitar a escassez de água, em uma escala local (a nível de cidade), levando em conta a disponibilidade e qualidade de recursos hídricos e o acesso a eles, os riscos associados ao uso da água e a capacidade de gestão. A Figura 7 apresenta os indicadores e métricas utilizados para a mensuração da segurança hídrica, mas os autores reforçam que os indicadores têm maior probabilidade de ter impacto na formulação de políticas quando são válidos, críveis e relevantes para o contexto local.

Indices	Indicators	Sub-indicators	Metrics	Unit
Resources	Availability	Water resource availability	Renewable surface water + renewable groundwater + imported water, desalinated water, reclaimed water (as applicable) per year per capita	m ³ /yr/cap
		Water storage capacity	Total volume of water stored in water reservoirs (m ³) expressed as a multiple of average daily demand	No. days
	Diversity	Diversity of water sources	Contribution of alternative sources (all sources excluding the largest source) by volume to total available water resources	%
			Contribution of water transferred from another jurisdiction to total available water resources	%
	Quality	Raw water quality	Proportion of samples at intake point meeting locally applicable quality standard	%
Access	Capacity	Water supply capacity	Total water treatment capacity × (1 – NRW) per day/average demand per day	%
		Water supply coverage	Percentage of households with access to tap water supply	%
	Service sustainability	Cost recovery of water utilities	Operating expenditure/operating revenue	Ratio
	Affordability	Water tariff	Water utility bill for monthly demand of 15m ³ /average disposable household income	%
Risks	Flooding risk	Flood frequency indicator	Number of serious flooding events per year	No.
		Flood damage indicator	Economic loss caused by floods per year	Million \$
		Fatalities due to floods per year	No.	
	Public health risk	Access to sanitation	Proportion of households with a sewerage system connection	%
		Water contamination incidents	Number of water contamination incidents recorded by the utility e.g. “Boil water advisory” per year	No.
		Proportion of drinking water samples meeting WHO standards	%	
Governance	Strategic planning	Whether the government/institution have strategic planning towards water resources, taking in to account both supply and demand.	Proportion of households with continuous supply	%
		Disaster management	Whether the government/institution have policies towards water related disaster, i.e. flooding, water contamination management? Such as, early warning system, compensation scheme	*qualitative measurement Lickert scale 1–5
		Regulation	Whether there is comprehensive and transparent regulation on water utilities	*qualitative measurement Lickert scale 1–5

Figura 7. Indicadores e métricas utilizados para calcular o ISH Urbano em Singapura e Hong Kong
FONTE: Jensen e Wu (2018).

De forma análoga, porém mais flexível, Babel *et al.* (2020) desenvolveram uma estrutura para avaliação da segurança hídrica em escala local para que se tenha uma abordagem *bottom up*. Essa estrutura é composta por cinco dimensões (abastecimento de água e saneamento, produtividade da água, desastres relacionados à água, ambiente aquático e governança da água) e doze indicadores, sendo que cada indicador pode ser medido por diferentes variáveis (métricas). A ideia dos autores foi criar um índice de segurança hídrica que se adaptasse ao contexto específico de cada localidade, de acordo com os dados disponíveis em cada cidade, o que facilita a replicação da metodologia, porém dificulta a universalização da fórmula para comparação da segurança hídrica com outros locais. A Figura 8 apresenta a metodologia definida pelos autores, em que os indicadores são fixos, porém as

variáveis podem mudar de acordo com cada localidade. A Figura 9 mostra as classificações do índice de segurança hídrica calculado, sendo que as formas de cálculo variam conforme as variáveis selecionadas para a área de interesse, e os maiores valores são atribuídos para locais com excelente segurança hídrica.



i, j and k are the number of dimensions, sub- dimensions, and indicators respectively

Figura 8. Metodologia proposta por Babel et al. para cálculo do ISH
FONTE: Babel et al. (2020).

WSI	Condition	Description
< 1.5	Poor Water Security	The city is highly water insecure. It faces several water-related issues. There is a lack of proper institutional management and preparation for future water challenges.
1.5 - < 2.5	Fair Water Security	The city is water insecure from the perspective of some dimensions. It faces some water-related issues. The basin needs some improvement in the institutional management and preparation for future water challenges.
2.5 - < 3.5	Good Water Security	The city is reasonably water secure in terms of most dimensions. It faces relatively few water-related issues. The basin has some form of institutional management and has some plans to tackle future water challenges.
3.5 - < 4.5	Very good Water Security	The city is quite water secure in terms of most dimensions. It faces very few water-related issues. The basin has proper institutional management and good plans to tackle anticipated future water challenges.
≥ 4.5	Excellent Water Security	The city is highly secure in terms of all dimensions. It has no water-related issues. The basin has excellent institutional management and it is fully prepared to tackle the anticipated future water challenges.

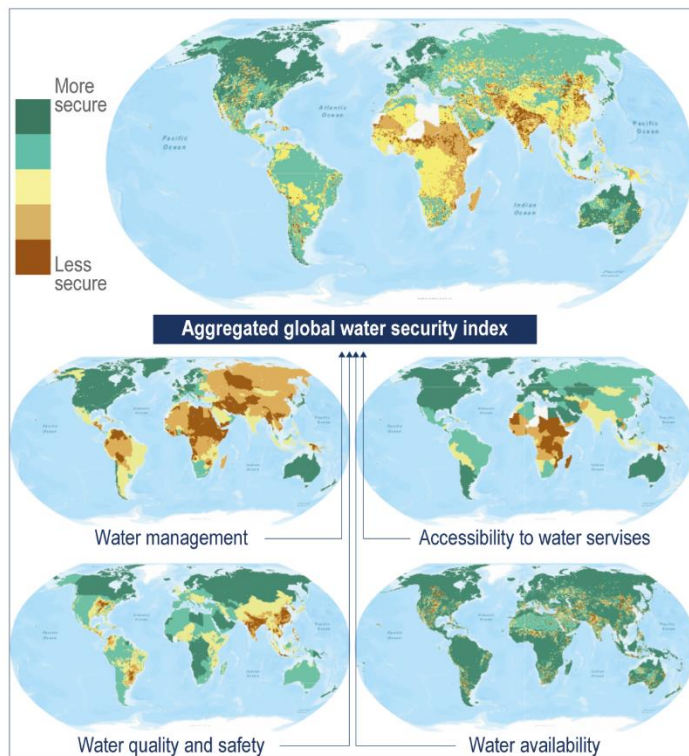
Figura 9. Interpretações do valor calculado para o ISH
FONTE: Babel et al. (2020).

Gain, Giupponi e Wada (2016) definem uma métrica do Índice Global de Segurança da Água (GWSI, *Global Water Security Index*) em uma escala de 0 a 1, combinando indicadores de níveis relativos de disponibilidade água doce (45%), acessibilidade aos serviços hídricos (20%), gestão da água (15%) e qualidade e segurança da água (20%), incluindo risco de inundação, que pode afetar a qualidade da água, além de ser um perigo físico direto. O Grupo de Trabalho II do IPCC (CARETTA et al., 2022), analisando o trabalho, elaborou uma síntese dos resultados obtidos pelos autores, a qual pode ser vista na Figura 10. Pode-se observar que existem problemas gerais de insegurança hídrica em todo o mundo, particularmente no sul da Ásia, norte da China, África e Oriente Médio, devido a altas densidades populacionais, muitas vezes associadas a baixa disponibilidade, acessibilidade, qualidade e governança de água. No entanto, muitas áreas com disponibilidade de água relativamente alta têm níveis relativamente baixos de segurança hídrica devido ao aumento do risco de inundação e à consequente deterioração da qualidade da água, como é o caso de grandes partes do sul e sudeste da Ásia (FARINOSI et al., 2018; WARD et al., 2017; BURGESS et al., 2010). Vale destacar que a insegurança hídrica também pode estar associada à má governança da água. Em 2020, pouco mais da metade (54%) da população mundial tinha acesso a saneamento gerenciado com segurança, o que representa um risco para a saúde humana (RITCHIE; ROSER, 2021).

Global Water Security Index

and its components for the present day, and factors affecting future change in water security

(a) Present-day



(b) Future

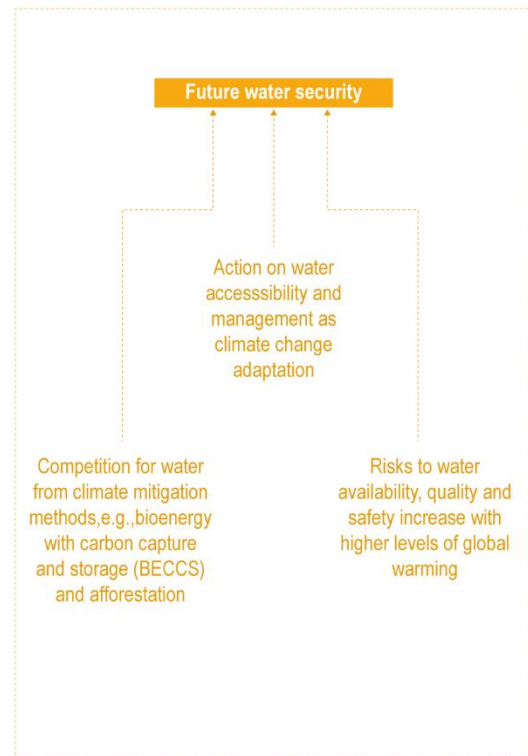


Figura 10. Índice Global de Segurança Hídrica (GWSI) e seus componentes para os dias atuais, e fatores que afetam mudanças futuras na segurança hídrica

FONTE: Caretta *et al.* (2022), adaptado de Gain, Giupponi e Wada (2016).

Na figura acima, é apresentado um mapa global de segurança hídrica (globo maior) formado pelos demais indicadores descritos anteriormente, cuja distribuição espacial dos resultados é apresentada nos globos menores. A eficácia relativa da gestão da água (*Water Management*) foi estimada a partir de um Índice de Governança Mundial em escala nacional, representado por seis componentes (voz e responsabilidade, estabilidade política e ausência de violência/terrorismo, eficácia do governo, qualidade regulatória, estado de direito e controle da corrupção) e por indicadores de estruturas jurídicas transfronteiriças e tensões políticas em escala de bacia hidrográfica. A acessibilidade relativa aos serviços de água (*Accessibility to water services*) levou em consideração os sistemas disponíveis de água potável e saneamento. Já a qualidade e segurança relativa da água (*Water quality and safety*) incluiu um Índice de Qualidade da Água e um Índice de Frequência de Inundações. Por fim, mas com o maior peso no cálculo da segurança hídrica, a disponibilidade relativa de água doce (*Water availability*) compreendeu um Índice de Escassez de Água, um Índice de Seca e a taxa de esgotamento das águas subterrâneas. Os dados dos componentes não se aplicam ao mesmo período de tempo, mas são geralmente aplicáveis às últimas décadas até 2010. As áreas brancas indicam que não há dados disponíveis para pelo menos um componente. Em relação aos fatores que podem afetar a segurança hídrica futura, os autores salientam o aquecimento global como um fator de risco para a disponibilidade hídrica futura, reforçando a importância das ações de adaptação às mudanças climáticas para garantir água em quantidade e qualidade.

3.2.2. Estudos sobre indicadores de segurança hídrica no Brasil

No Brasil, pode-se dizer que o tema de segurança hídrica foi abordado de forma implícita na Lei Federal 9.433 de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cujos objetivos são:

I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;

II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;

III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais;

IV - incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.

No entanto, somente a partir de 2014 este conceito ganhou mais evidência no país em função da crise hídrica vivenciada pelas principais capitais do Sudeste brasileiro, em particular a cidade de São Paulo (OTTO *et al.*, 2015). Dessa forma, o informe de 2014 da Conjuntura de Recursos Hídricos (ANA, 2015) publicado pela Agência Nacional das Águas aborda a questão da crise e da segurança hídrica, definindo-a como a condição que visa garantir quantidade e qualidade aceitável de água para abastecimento, alimentação, preservação de ecossistemas e demais usos, associados a um nível aceitável de riscos relacionados com a água para as pessoas, economias e meio ambiente. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos define a segurança hídrica como a garantia de disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade (CNRH, 2013).

Em 2019, a ANA elaborou o Índice de Segurança Hídrica, concebido no âmbito do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) para retratar as diferentes dimensões da segurança hídrica dentro do território brasileiro (ANA, 2019a). Tal índice utilizou as quatro dimensões de segurança hídrica propostas pela UNESCO (2019) como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água:

- disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas (**dimensão humana**);
- garantia de água para a prática das atividades econômicas (**dimensão econômica**);
- água em quantidade e qualidade, de forma a priorizar a conservação dos ecossistemas aquáticos (**dimensão ecossistêmica**);
- nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias (**dimensão de resiliência**).

A Figura 11 apresenta a comparação entre as dimensões do ISH da ONU e aquele proposto pela ANA. Cada dimensão é composta por um ou mais indicadores, capazes de quantificar aspectos a ela pertinentes. Os indicadores, por sua vez, são formados por uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis, sendo classificados em cinco faixas de gradação, normalizadas com a atribuição dos números naturais de 1 a 5, em ordem crescente do nível de segurança hídrica. A exceção é o indicador de segurança das barragens de rejeito, que varia de 1 a 3.

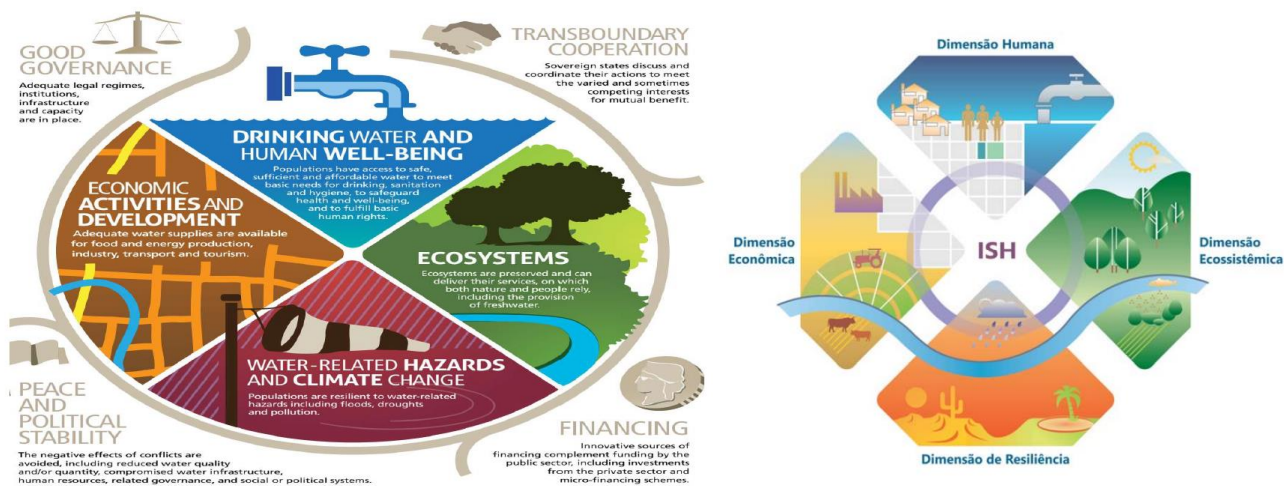


Figura 11. Dimensões propostas para o ISH da ONU (esquerda) e da ANA (direita)
FONTE: UNESCO (2019) e ANA (2019a).

A Figura 12 apresenta os indicadores considerados pela Agência Nacional das Águas para o cálculo do ISH. Vale ressaltar que as classes e os pesos foram atribuídos segundo a visão de especialistas e testes de aderência à realidade, tendo por base o papel que cada um dos aspectos considerados desempenha na representação da segurança hídrica. Ou seja, é um índice difícil de ser replicado, visto que conta com definições arbitrárias a respeito de alguns critérios e pesos definidos.

Indicadores do ISH	
Dimensão	Indicador
Humana	Garantia de água para abastecimento
	Cobertura da rede de abastecimento
Econômica	Garantia de água para Irrigação e Pecuária
	Garantia de água para atividade Industrial
Ecológica	Quantidade adequada de água para usos naturais
	Qualidade adequada de água para usos naturais
	Segurança de barragens de rejeito de mineração
Resiliência	Reservação artificial
	Reservação natural
	Potencial de armazenamento subterrâneo
	Variabilidade pluviométrica

Figura 12. Indicadores propostos para cada dimensão do ISH da ANA
FONTE: ANA (2019a).

3.3. Segurança hídrica e mudanças climáticas

Frente ao impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos, muitos estudos foram desenvolvidos com o intuito de estimar a segurança hídrica em projeções futuras de clima. Gosling e Arnell (2013) utilizaram 21 modelos climáticos globais (MCG) do CMIP3 em quatro cenários de emissão e dois períodos futuros para estimar a segurança hídrica em 1.339 bacias hidrográficas distribuídas no mundo através de dois índices: o Índice de Aglomeração de Água (WCI, *Water Crowding Index*) e o Índice de Estresse Hídrico (WSI, *Water Stress Index*). Através desses índices, os autores estimaram que 1,6 (WCI) e 2,4 (WSI) bilhões de pessoas estejam atualmente vivendo em

bacias hidrográficas expostas à escassez de água e concluíram que a maior parte do mundo verá um aumento na exposição à escassez de água devido às mudanças climáticas ao invés de um declínio, mas isso não é consistente em todos os padrões de mudanças no clima.

Haque, Rahman e Samali (2016) analisaram o desempenho de um sistema de captação de água da chuva sob a mudança das condições climáticas no futuro em cinco locais da região de Sydney, na Austrália. O estudo mede a segurança hídrica com enfoque no atendimento às demandas de água em quantidade e qualidade para a população utilizando a metodologia dos tanques de armazenamento. Os resultados apontam para um aumento, no futuro, da porcentagem de dias que um tanque de água da chuva permaneceria completamente vazio (12% nas condições climáticas futuras em comparação com 8% no histórico). Além disso, os autores verificaram que o desempenho de um sistema de captação de água da chuva será mais afetado na estação seca do que na estação chuvosa.

Outro estudo, realizado a nível local para o distrito de Kabarole, na Uganda, analisou os efeitos das mudanças climáticas na segurança hídrica e economia de água em sistemas de captação de água da chuva (KISAKYE; VAN DER BRUGGEN, 2018). Dessa forma, pode-se dizer que a metodologia apresentada no trabalho considera apenas aspectos quantitativos da água para consumo humano (água disponível para a população, em tanques de armazenamento) para calcular o índice de segurança hídrica. Além disso, o estudo apresenta uma discussão acerca das projeções dos MCG, que divergem a respeito da precipitação futura, porém, de forma geral, os modelos concordam que a estação seca será mais seca, e a estação úmida será mais úmida.

Eekhout *et al.* (2018) examinaram o efeito das mudanças climáticas na segurança hídrica através da aplicação de um modelo hidrológico distribuído (SPHY), que é acoplado a um modelo de erosão do solo (Morgan–Morgan–Finney), e é executado em uma escala de tempo diária. O modelo foi aplicado à Bacia Hidrográfica do Rio Segura, altamente regulada por reservatórios. Os resultados mostram que um aumento na intensidade de precipitação leva a uma redistribuição de água dentro da Bacia (entre a água superficial e subterrânea), em que o armazenamento de água no solo diminui e a vazão do reservatório aumenta, aumentando-se a erosão do solo e reduzindo a segurança hídrica. Portanto, os autores salientam a importância de medidas de adaptação às mudanças climáticas, que devem ter como objetivo aumentar a capacidade de retenção de água do solo (água verde) e manter a capacidade de armazenamento dos reservatórios (água azul), beneficiando a agricultura de sequeiro e irrigada.

Chanapathi, Thatikonda e Raghavan (2018) aplicaram o modelo SWAT para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da Bacia do Rio Krishna, tanto na produção de água quanto no escoamento superficial. Os autores utilizaram os MCG do CMIP5 para fazer uma validação e então utilizaram o modelo que melhor representou o passado para fazer as análises futuras, chegando ao modelo climático CNRMCM5, o qual projetou que 7%, 5% e 25% dos eventos ocorrerão sob excesso de chuva (> 25%), chuvas extremas (> 50%) e eventos de seca moderada, respectivamente, no cenário RCP 4.5. No cenário RCP 8.5, esses valores mudam para 17 %, 10% e 17%, respectivamente.

Um trabalho de Yin *et al.* (2022) estimou a capacidade de produção de água em uma resolução espacial de 1 km no norte da China durante as últimas duas décadas com base na estrutura Budyko. Além disso, o estudo quantificou a sensibilidade da mudança na produção de água frente às

mudanças climáticas para diferentes tipos de vegetação. A variação dos coeficientes de sensibilidade na vegetação natural mostrou que em regiões com diminuição da precipitação, a variação na capacidade de produção de água também diminuiu, enquanto em regiões com aumento de precipitação de 0 a 8 mm/ano, a capacidade de produção de água diminuiu primeiro e depois aumentou com a precipitação. Os resultados sugerem que gramas e arbustos seriam mais benéficos para a segurança hídrica regional na revegetação do norte da China, enquanto o reflorestamento forneceria proteção para o ambiente regional contra eventos de chuvas extremas.

Octavianti e Staddon (2021) revisaram um total de 107 artigos cujo tema era a segurança hídrica, e encontraram 80 métricas diferentes para estimar o ISH. Dessas metodologias, doze traziam em seus atributos as mudanças climáticas. Um dos estudos citados é o de Aboelnga *et al.* (2019), que avalia o índice de segurança hídrica urbana considerando quatro dimensões: água potável e seres humanos, ecossistema, mudanças climáticas e perigos relacionados à água, e fatores socioeconômicos. Para cada um desses aspectos, os autores trazem tabelas com valores, que variam de 1 (menor segurança) a 5 (maior segurança), a serem aplicados para mensurar o ISH, como por exemplo, a tabela de limiares considerados para mudanças climáticas e perigos relacionados à água, apresentada na Figura 13.

Variable	1	2	3	4	5	References
Greenhouse Gas (GHG) emissions emitted from the system	>3.5	3.5–2.5	2.5–1.5	1.5–0.5	<0.5	[91]
Number of potable water contamination incidents (diarrhea)	≥1000	800–500	500–100	100–30	≤30	[92]
Number of deaths due to flood over 3 years	≥1000	800–500	500–100	100–30	≤30	Authors
No. of droughts						
Surface area of flood-prone area in relation to total surface area	>20	20–15	15–10	10–5	<5	Authors
Average annual precipitation	<100	100–300	300–500	500–700	>700	Authors
Average annual temperature	>40	35–40	30–35	25–30	<25	Authors

Figura 13. Limiares considerados para mudanças climáticas e perigos relacionados à água
FONTE: Aboelnga *et al.* (2019).

Como pôde ser observado nos trabalhos descritos acima, grande parte da literatura que explora os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica se concentra na quantificação da escassez física de água, conforme já discutido no Sexto Relatório do IPCC (CARETTA *et al.*, 2022). Além disso, o AR6 destaca que ainda não é possível quantificar a contribuição da mudança climática antropogênica aos níveis atuais de escassez de água em escala regional, devido a diversos fatores. Primeiramente porque não é possível prever a demanda de água futura, a qual é um resultado direto das mudanças socioeconômicas. Um estudo de Greve *et al.* (2018), por exemplo, analisa que a demanda global de água para uso doméstico, industrial e agrícola deve aumentar de 20 a 30% até 2050, dependendo do cenário socioeconômico. O segundo fator é que as projeções futuras da disponibilidade hídrica decorrem de diferenças na evapotranspiração e precipitação, variáveis climáticas que estão sujeitas a uma incerteza muito elevada quando se trata de padrões regionais de mudanças climáticas (UHE *et al.*, 2021) e da influência das respostas da vegetação ao CO₂ elevado na transpiração (BETTS *et al.*, 2015). Entretanto, apesar desses fatores, alguns estudos afirmam que, em

escala global, os fatores humanos são o fator dominante da futura escassez de água (GRAHAM *et al.*, 2020), mas em escala regional não é possível afirmar o mesmo.

A ideia do presente trabalho foi gerar um índice de segurança hídrica que não apenas conecta usuários e usos interdependentes; mas também alcançar uma abordagem abrangente e global do tema, incluindo os impactos relevantes das mudanças climáticas, cada vez mais evidentes. De forma geral, pode-se dizer que a segurança hídrica é definida não apenas pela disponibilidade física de recursos de água doce em relação à demanda de água, mas também pelos fatores sociais e econômicos (por exemplo, planejamento e gestão de água, capacidade institucional para fornecer serviços de água, políticas econômicas sustentáveis, “boa governança” da água). Porém, poucas são as ferramentas e abordagens quantitativas e integradas (envolvendo o físico e o socioeconômico) para análise espacial da segurança hídrica a nível global (GAIN; GIUPPONI; WADA, 2016).

Portanto, o objetivo dessa pesquisa foi abordar essas lacunas de conhecimento através de uma metodologia de mapeamento da segurança hídrica que permita identificar as áreas mais vulneráveis e, por conseguinte, estabelecer metas e prioridades para assegurar a disponibilidade adequada e confiável de recursos hídricos, a qualidade aceitável para fornecer serviços provenientes da água para toda a atividade social e econômica de uma maneira ambientalmente sustentável e mitigar os riscos relacionados com a água, tais como inundações, secas e poluição. Afinal, segundo Lautze e Manthritilake (2012), é necessário ir além das definições qualitativas para fazer um conjunto finito de critérios, nos quais a segurança hídrica passa a ser determinada e avaliada com foco nos resultados do ISH, os quais são extremamente importantes na tomada de decisão para otimizar a gestão dos recursos hídricos.

4. ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho envolve o mapeamento do Índice de Segurança Hídrica (ISH) para todo o Brasil, considerado um país de escala continental que faz fronteira ao norte com a Venezuela, Guiana, Suriname, Guiana Francesa e Oceano Atlântico; ao sul, com o Uruguai; a oeste, com Argentina, Paraguai, Bolívia e Peru e, ao noroeste, com a Colômbia, sendo seu litoral banhado pelo Atlântico, conforme apresentado na Figura 14. Os únicos países sul-americanos que não são vizinhos políticos do Brasil são Chile e Equador. O país abrange uma área de 8.544.416 km², o que lhe dá o título de quinto maior país do mundo, depois da Rússia, da China, do Canadá e dos Estados Unidos.

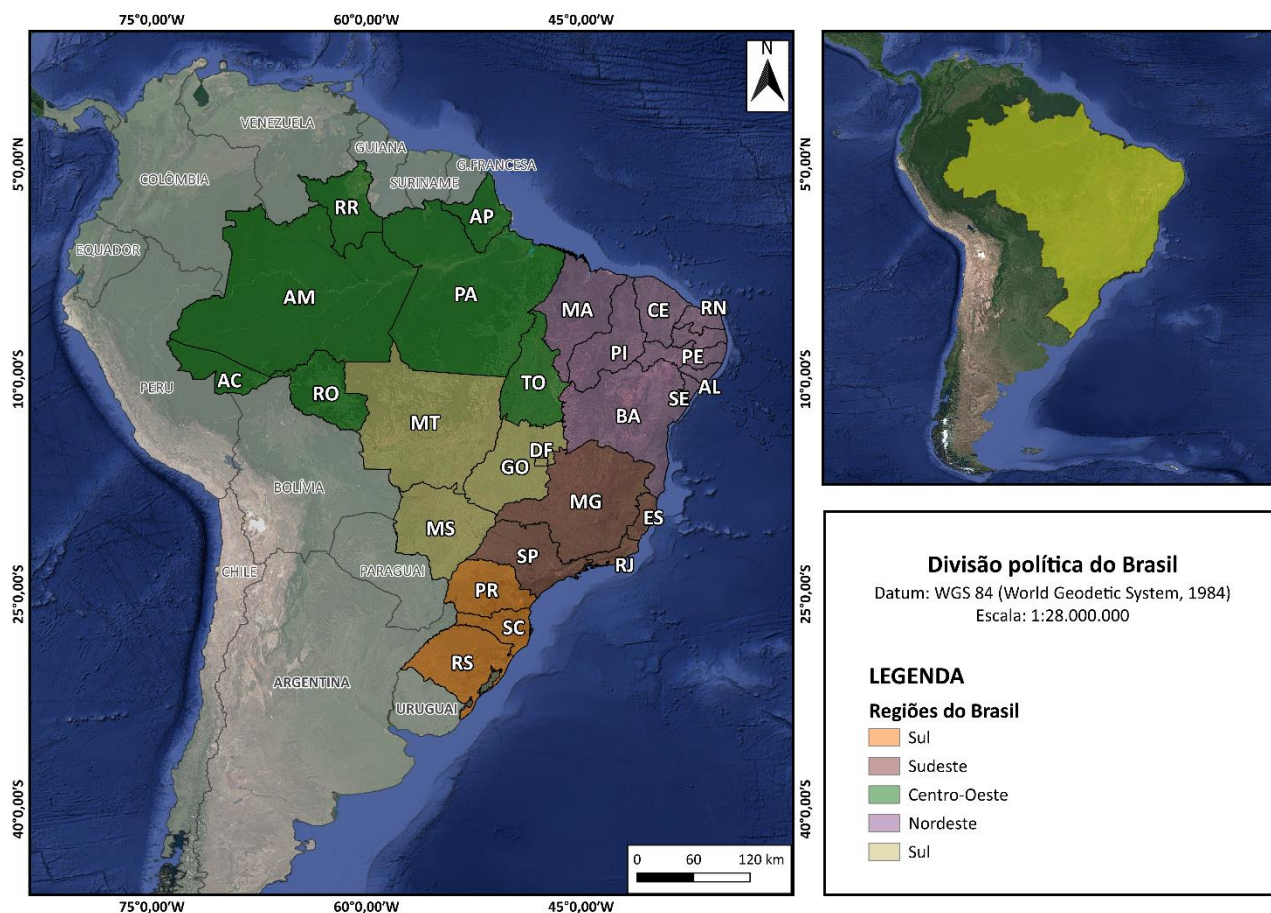


Figura 14. Divisão política dos Estados do Brasil

O Brasil é dividido em cinco regiões administrativas, de acordo com suas características climáticas e fisiográficas: Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Conforme levantamento mais recente do IBGE, referente ao ano de 2018, a estrutura territorial brasileira é composta por 5.568 municípios, 1 Distrito Federal (Brasília), 1 Distrito Estadual (Pernambuco) e 26 Estados. Por ser um país de extensão continental, o Brasil abrange uma ampla diversidade de solos, de características climáticas, de sistemas aquíferos e de consumo e distribuição de água, indicadores estes que estão diretamente relacionados com o tema de segurança hídrica. Dessa forma, esses assuntos são descritos detalhadamente nos tópicos a seguir.

4.1. Consumo de água

Segundo dados divulgados pelo IBGE, para o ano de referência de 2017, o consumo total de água, que corresponde à água utilizada menos a água que retorna para o meio ambiente, foi de 329,8 trilhões de litros. Os principais responsáveis pelo consumo de água foram: agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura (97,4%), que tem como destaque a agricultura de sequeiro (não irrigada); indústria de transformação e construção (1,0%); e água e esgoto (0,8%).

Segundo dados do relatório de Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) para os anos de 2013 a 2017 (TEIXEIRA *et al.*, 2018), no Brasil, o uso *per capita* de água pelas famílias foi de 116 litros diários. Entre as grandes regiões, o Sudeste registra o maior uso *per capita*, com 143 litros, enquanto o menor uso é registrado no Nordeste, com 83 litros por habitante/dia. Entretanto, em 2020, o consumo médio *per capita* de água foi de 152,1 L/hab.dia, registro 1,2% menor em relação ao ano de 2019 (SNIS, 2022), o que se deve a um aumento da população (2,7% maior em 2020 com relação a 2019) superior ao aumento do volume de água consumido (1,5% maior em 2020 comparado ao ano anterior). A Figura 15 apresenta os dados de consumo de água por região, segundo informações divulgadas pelo SNIS para o ano de referência de 2020.

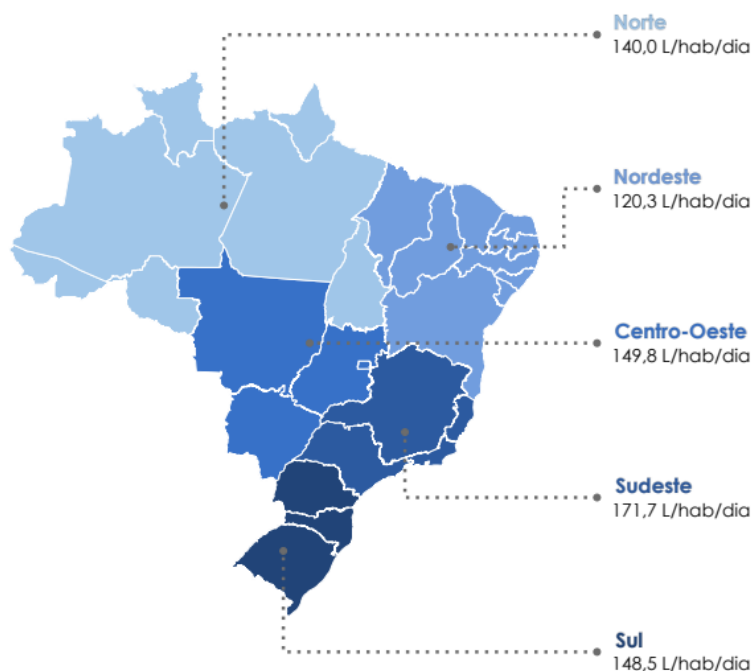


Figura 15. Consumo médio *per capita* de água por macrorregião geográfica do Brasil
FONTE: SNIS (2022).

Pode-se observar que a região Sudeste apresenta o maior consumo *per capita* do país (171,7 L/hab.dia) e supera o indicador nacional (152,1 L/hab.dia) em 12,9%. Já o menor consumo médio *per capita* de água é no Nordeste brasileiro (120,3 L/hab/dia). Essa região concentra 23,9% da população brasileira atendida com abastecimento de água, enquanto que seu volume de água consumido representa 18,5% do volume consumido no Brasil. Essa diferença percentual contribui com o baixo consumo *per capita* na região. Apesar disso, o consumo *per capita* nos Estados que integram essas macrorregiões atende à demanda mínima diária de água de 110 L/hab.dia indicada pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

4.2. Distribuição de água no território

O Brasil é considerado um país riquíssimo em termos hidrológicos, pois detém cerca de 50% do total dos recursos da América do Sul e 11% dos recursos mundiais. Porém, a distribuição desse volume não é uniforme no território e durante o ano, havendo eventos extremos de excesso de água na Amazônia e limitações de disponibilidade no Nordeste (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001). Aproximadamente 71,1% do total de vazão gerado no Brasil é oriundo da Amazônia, região com menos de 7% da população nacional, enquanto apenas 3% é gerado na região Nordeste. Além disso, outros problemas têm agravado a escassez dos recursos hídricos: o aumento da temperatura global, elevando os índices de evaporação, o desmatamento das nascentes, a poluição, o crescimento das cidades, o aumento das demandas para consumo humano e irrigação e a má gestão dos recursos hídricos (pela falta de cuidado no uso da água disponível). A variabilidade de precipitação anual do País é apresentada nas isoietas da Figura 16, cujos dados foram calculados a partir das normais climatológicas de 1977 a 2006, provenientes da rede hidrometeorológica nacional e compilados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, sendo disponibilizados na sua *homepage* no âmbito do projeto Atlas Pluviométrico do Brasil.

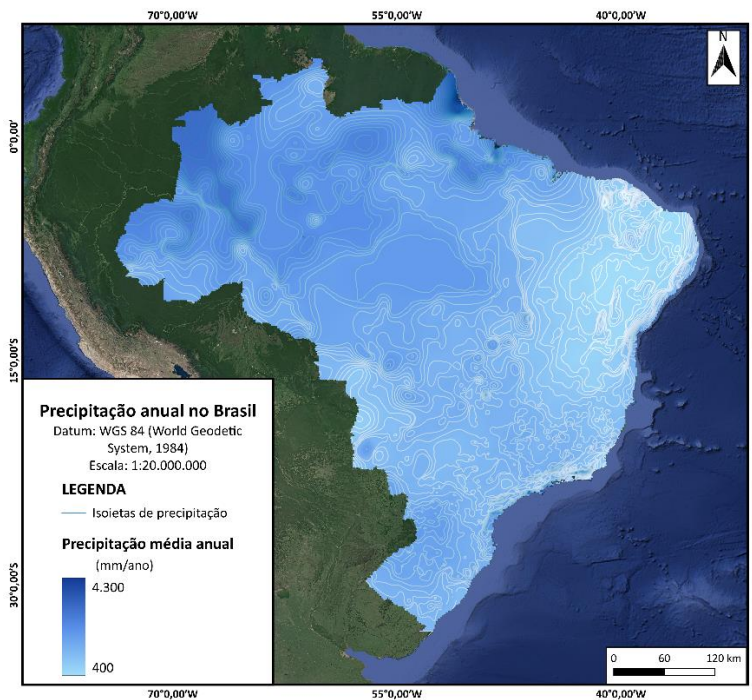


Figura 16. Isoietas médias anuais
FONTE: Adaptado de CPRM (2005).

Dadas as dimensões do País, a variabilidade climática anual e sazonal no território brasileiro é significativa, sendo essa a maior condicionante da disponibilidade hídrica (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001). No mapa, observa-se que as precipitações são superiores a 1.000 mm anuais em todas as regiões, com exceção de parte do Nordeste, onde a precipitação média anual chega a valores inferiores a 500 mm. O Norte do Brasil apresenta os valores mais elevados, com destaque para a Amazônia, que apresenta precipitação superior a 2.000 mm na maior parte de seu território.

4.3. Características climáticas

A localização de 92% das terras do País entre os dois trópicos, aliada às relativas baixas altitudes do relevo, explica a predominância de climas quentes, com temperaturas médias anuais acima dos 20° C. Ocorrem no País os seguintes tipos de clima: equatorial, tropical, tropical de altitude, tropical atlântico, semiárido e subtropical, conforme apresentado na Figura 17.

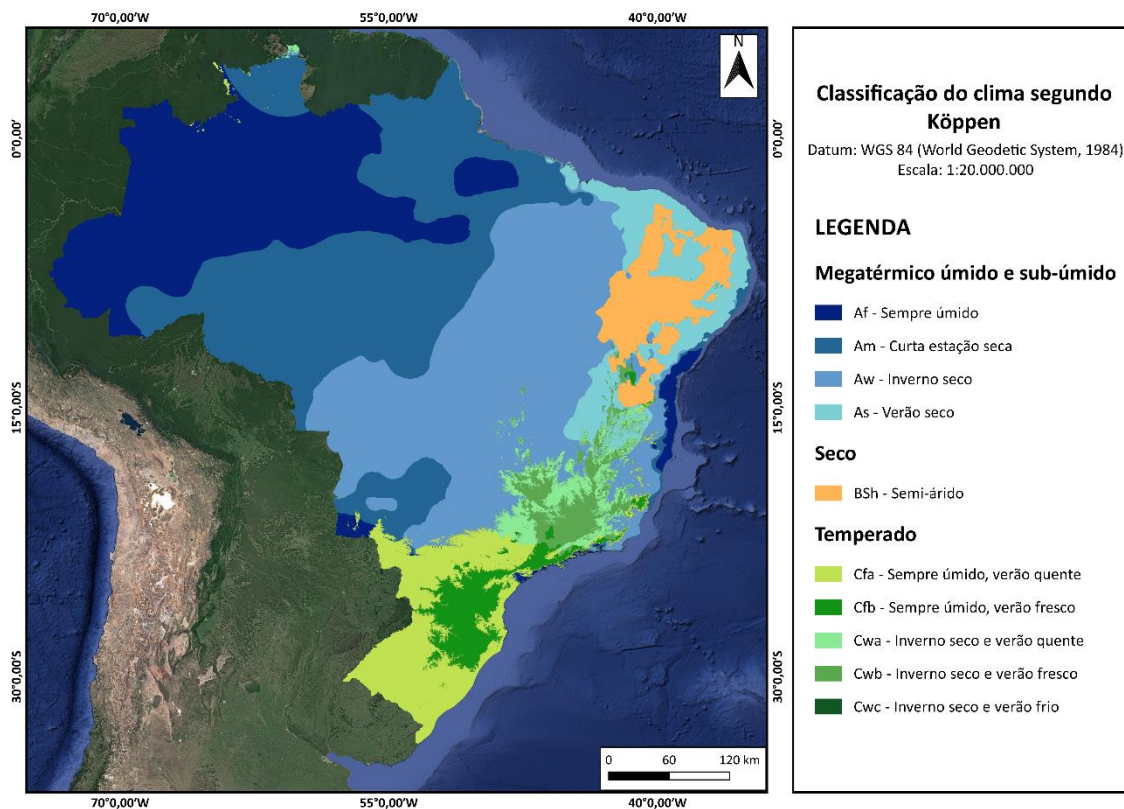


Figura 17. Classificação do clima no Brasil segundo Köppen
FONTE: Adaptado de Alvares *et al.* (2013).

4.4. Pedologia

O Brasil possui uma grande diversidade de solos em sua extensão continental, decorrente da ampla diversidade de pedoambientes e de fatores de formação do solo. As 13 classes de solos contidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) apresentam uma grande variabilidade de suas características químicas, físicas e morfológicas, o que, somado aos usos e práticas de manejo aplicadas, condicionam a sua sustentabilidade. De forma geral, no Brasil, predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, os quais, juntos, formam aproximadamente 70% do território nacional. As classes de Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% da área e são solos profundos,

altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, com alta saturação por alumínio. Já as classes dos Neossolos, Luvisolos, Planossolos, Nitossolos, Chernossolos e Cambissolos são caracterizados por serem solos de média a alta fertilidade, em geral pouco profundos em decorrência de seu baixo grau de intemperismo. A Figura 18 apresenta o mapa da distribuição dos diferentes tipos de solo no território brasileiro (EMBRAPA, 2020).

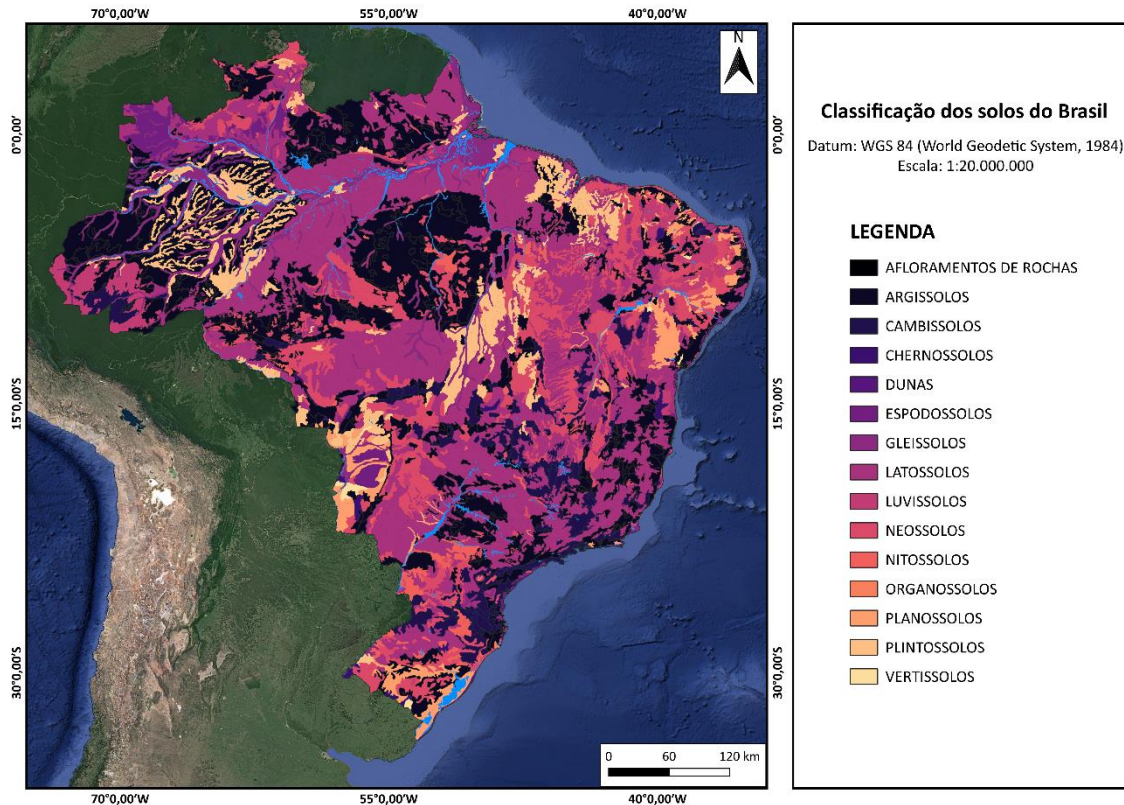


Figura 18. Classificação dos solos no Brasil
FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2020).

4.5. Sistemas aquíferos

Sistema Aquífero é um conjunto de unidades aquíferas contínuas e ligadas hidráulicamente. Os sistemas aquíferos podem ser análogos aos grupos de rochas. O mapeamento das Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil, em escala 1:1.000.000, foi produzido pela Gerência de Águas Subterrâneas (GESUB) da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), sendo elaborado a partir da análise de consistência, adequação e reclassificação de informações geológicas e hidrogeológicas existentes. A reclassificação de polígonos de unidades geológicas e seus agrupamentos, de acordo com suas características hidrogeológicas, gerou a segregação de 181 Aquíferos e Sistemas Aquíferos Aflorantes, conforme apresentado na Figura 19. A partir desse mapa, pode-se observar que a baixa disponibilidade de água subterrânea na região Nordeste se deve à presença do escudo cristalino em cerca de 70% da superfície do Semiárido nordestino, o que dificulta o acúmulo de água no seu subsolo (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

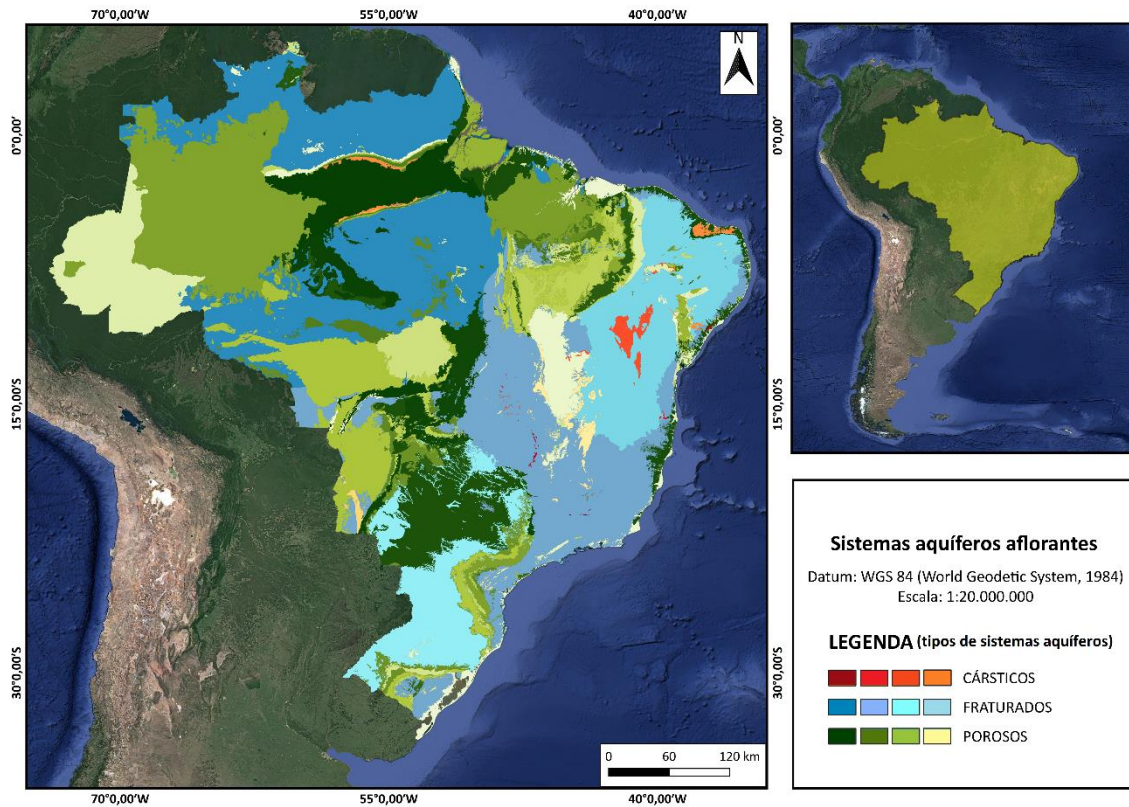


Figura 19. Sistemas aquíferos no Brasil
FONTE: Adaptado de ANA (2013).

4.6. Vegetação

Para caracterizar a vegetação brasileira, consideram-se as unidades fitoecológicas, as quais levam em conta não só a composição fitossociológica das formações vegetais, como também critérios de classificação climática e composição do solo. O sistema fisionômico-ecológico do IBGE (2012) classifica o território do Brasil em dez unidades fitoecológicas, as quais são apresentadas na Figura 20:

- **Floresta Ombrófila Densa:** caracterizada pelas elevadas temperaturas médias (acima dos 25 °C) e precipitação distribuída ao longo do ano, sem período de secas. Abrange majoritariamente os biomas da Mata Atlântica e da Amazônia;
- **Floresta Ombrófila Aberta:** caracterizada pela presença de terrenos areníticos que circundam a Amazônia, gerando formações florestais com alta presença de palmeiras e cipós. A precipitação é constante durante o ano, havendo mais de 60 dias secos durante uma temporada;
- **Floresta Ombrófila Mista:** caracterizada pela chamada Floresta de Araucárias, que ocorre em altitudes elevadas da região Sul e alguns pequenos fragmentos na região Sudeste. As estações são bem definidas, sem um período de seca determinado. Contudo, as elevadas altitudes afetam negativamente a umidade, gerando mosaicos de floresta e campos de altitude;
- **Floresta Estacional Sempre-verde:** formação ocorrente no norte do Estado do Mato Grosso, onde há a ocorrência de uma seca sazonal entre os meses de abril e outubro. A composição vegetal tem grande influência amazônica, com destaque para espécies fisiologicamente adaptadas ao estresse hídrico do período seco, mantendo o vigor foliar;
- **Floresta Estacional Semidecidual:** formação vegetal que tem como característica a perda parcial da cobertura foliar, sendo que até 25% das espécies que compõem essa unidade são

consideradas caducifólias. Não há um período de seca bem definido, porém, o inverno frio gera a seca fisiológica, causando a queda das folhas;

- **Floresta Estacional Decidual:** caracterizada por apresentar mais de 50% das espécies vegetais com queda foliar durante o inverno. Na porção tropical, ocorre um período de estiagem, ocasionando a queda foliar, enquanto que na porção subtropical, sem ocorrência de seca, o frio condiciona a perda das folhas;
- **Campinarana:** áreas que abrangem o norte do Amazônia, marcadas por alta precipitação (mais de 3.000 mm ao ano) e por áreas de acumulação lixiviadas. As espécies vegetais ocorrentes são adaptadas a terrenos quase sempre encharcados;
- **Savana:** essa unidade é mais comumente chamada de Cerrado, mas também abrange o Pantanal. É caracterizada por possuir uma estação seca muito bem definida. Apresenta forte predomínio de vegetação xeromórfica em conjunto com outras adaptações a depender das especificações de cada subárea. Pode ser subdividido em: cerradão, cerrado-denso, campo sujo e campo-limpo;
- **Savana estépica:** área formada principalmente pela Caatinga, onde há dois períodos de seca bem definidos e intervalados por chuvas torrenciais que comumente não ocorrem durante vários anos seguidos. O componente vegetal é predominado pelas cactáceas e outros grupos altamente adaptados à falta de água;
- **Estepe:** área conhecida pelos campos sulinos do Pampa, ocorrente exclusivamente no sul do Rio Grande do Sul. As quatro estações são bem marcadas, com inverno muito frios e eventual ocorrência de granizo e até neve. Na primavera e no verão comumente ocorrem chuvas torrenciais. Apesar de não ter um período de seca marcado durante do ano, devido à característica do solo, a umidade não consegue reter ao ponto de criar uma formação florestal, fazendo com que sejam raras as espécies arbóreas nessa unidade fitoecológica.

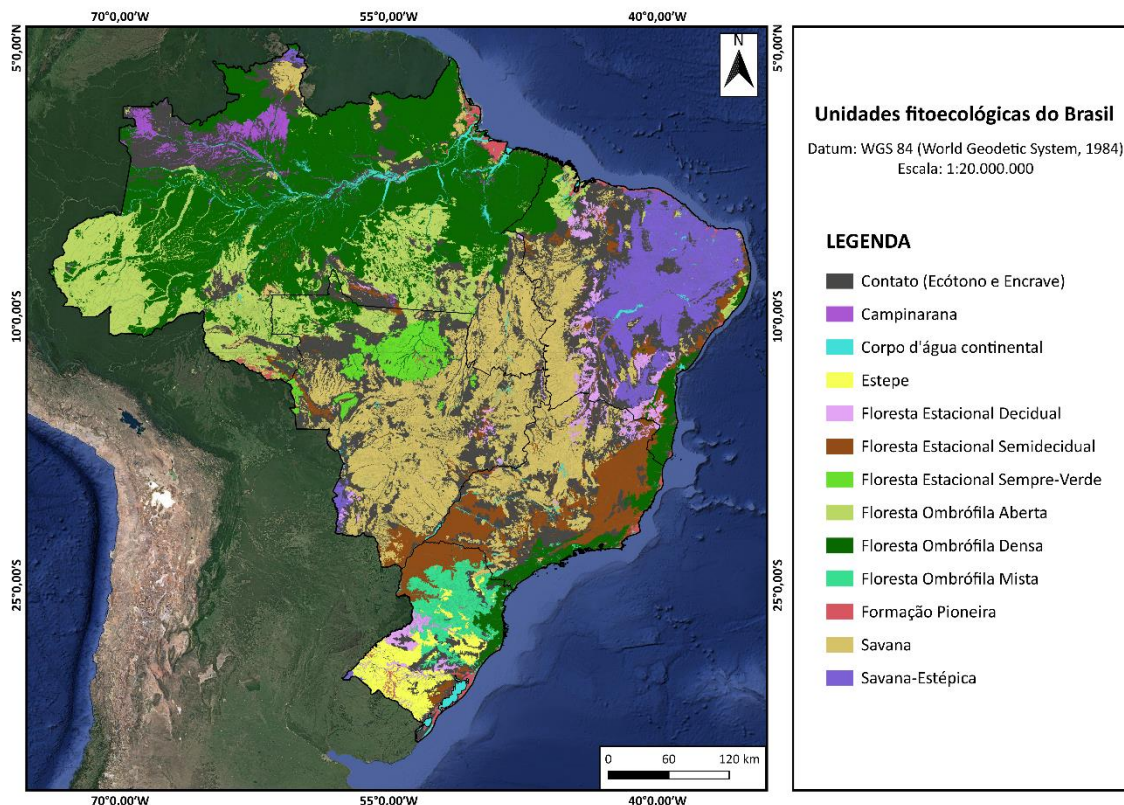


Figura 20. Unidades fitoecológicas do Brasil
FONTE: Adaptado de IBGE (2012).

4.7. Biomas

Biomas são grandes sistemas ecológicos, cuja área apresenta dimensões normalmente superiores a um milhão de quilômetros quadrados, e onde o clima, a fisionomia da vegetação, o solo e a altitude são semelhantes ou aparentados (IBGE, 2023). O critério florístico não é determinante, sendo que cada bioma brasileiro é composto por um conjunto de diferentes espécies vegetais que vivem sob condições ambientais semelhantes. A Mata Atlântica, por exemplo, agrupa florestas de tipos diversos, restingas, manguezais e campos de altitude que estão sujeitos a estresses ambientais mais pronunciados, como extremos de temperatura, inundações, secas, alta salinidade, entre outros. A Amazônia é composta principalmente por florestas densas e estratificadas, nas quais predomina um clima extremamente chuvoso, com elevados índices de evapotranspiração.

Entre os biomas campestres, encontram-se o Pampa, o Cerrado e a Caatinga. A diferença é que, no primeiro, os campos são compostos quase que exclusivamente de gramíneas e ervas baixas, com um relevo majoritariamente plano, apresentando algumas colinas em determinadas regiões, enquanto no segundo, existe um nível mais elevado de arborização. Mais próximos da mata do que do campo, os cerrados chegam a apresentar um grau considerável de estratificação, sobretudo nos vales e áreas mais úmidas, onde aparecem os "cerradões" (savanas florestadas). Já a Caatinga, também conhecida como Semiárido nordestino, apresenta uma vegetação de savana estépica, caracterizada por arbustos raquíticos esparsos sobre um solo ralo e quase sempre pedregoso. Por fim, o Bioma Pantanal é reconhecido como a maior planície de inundação contínua do Planeta Terra, o que constitui o principal fator para a sua formação e diferenciação em relação aos demais biomas. O mapa da Figura 21 apresenta a localização dos biomas no território brasileiro.

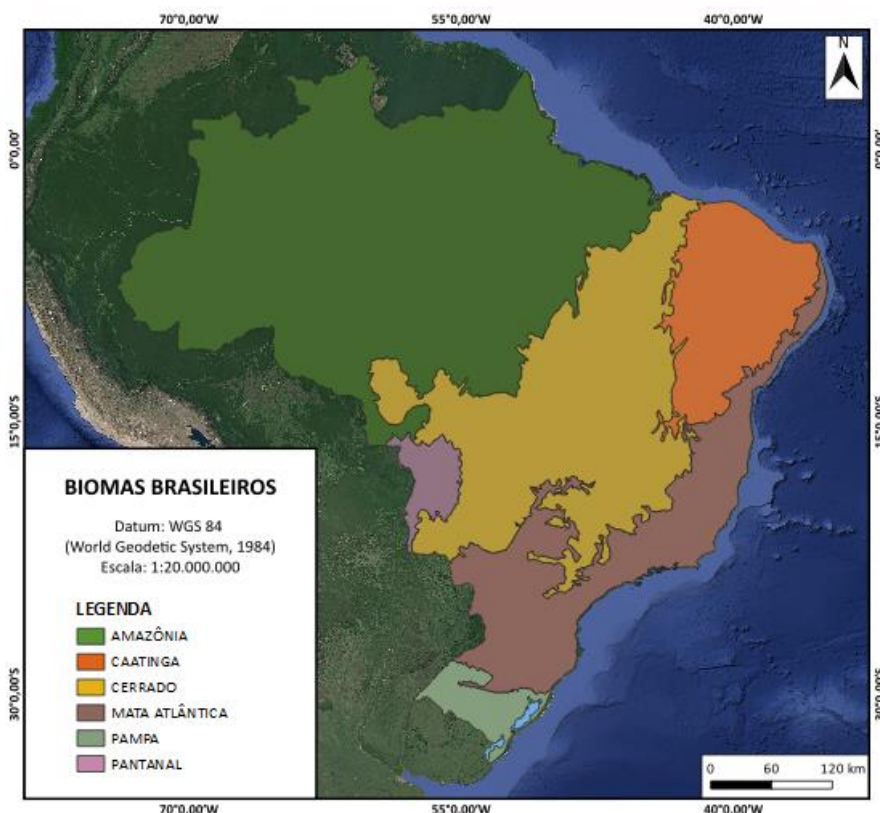


Figura 21. Biomas brasileiros
FONTE: IBGE (2023).

Em relação à contribuição hídrica dos biomas, temos a Amazônia como bioma mais extenso do Brasil, abrangendo um terço das florestas tropicais do mundo e 20% das reservas de água do planeta, sendo que a Bacia Hidrográfica Amazônica é considerada a maior do mundo (IBGE, 2016). Tanto a Amazônia quanto o Pantanal são marcados pelos chamados “pulsos de inundação”, com características marcantes de remanso hidráulico por apresentarem relevos com declividade praticamente nula (as chamadas planícies de inundação). Ambos os biomas apresentam clima quente e úmido, marcado por um déficit hídrico considerável devido aos elevados índices de evaporação. O Bioma Cerrado é caracterizado por um clima tropical sazonal de inverno seco, conhecido pelas secas e queimadas e, simultaneamente, por um grande potencial aquífero, sendo que abriga as nascentes das três maiores bacias hidrográficas do Brasil: Amazônica, do São Francisco e da Prata.

Já a Caatinga é considerada o Semiárido com maior diversidade do planeta, apresentando clima muito quente e seco, sendo que a maior parte dos rios é intermitente, e a água utilizada pela população vem principalmente de açudes. O Bioma Pampa, por sua vez, apresenta clima subtropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, o que lhe confere uma alta disponibilidade hídrica (salvo exceções de anos atipicamente secos, como tem ocorrido desde 2019 com a seca que atingiu a região da Bacia do La Plata – NAUMANN *et al.*, 2021). Por fim, mas não menos importante, temos o Bioma Mata Atlântica, o mais degradado pelos ciclos econômicos (pau-brasil, cana-de-açúcar e café) ocorridos desde o início da história do Brasil, apresentando a menor porcentagem de cobertura vegetal original e estando entre os cinco maiores *hotspots* de biodiversidade ameaçada de extinção do mundo. Em relação aos recursos hídricos do bioma, pode-se dizer que as atividades antrópicas (e.g., desmatamentos, queimadas, turismo predatório, expansão urbana em manguezais, industrialização e lançamento irregular de efluentes) têm ocasionado sérias preocupações em relação à qualidade das águas.

5. METODOLOGIA

A Figura 22 apresenta o fluxograma do processo metodológico aplicado para desenvolver o presente estudo, sendo cada etapa detalhada nos tópicos subsequentes. Além de todo o processo metodológico sistematizado a seguir, também foi realizada uma análise de sensibilidade do ISH quando projetadas alterações em seus indicadores. Essa análise é descrita no tópico 5.6.

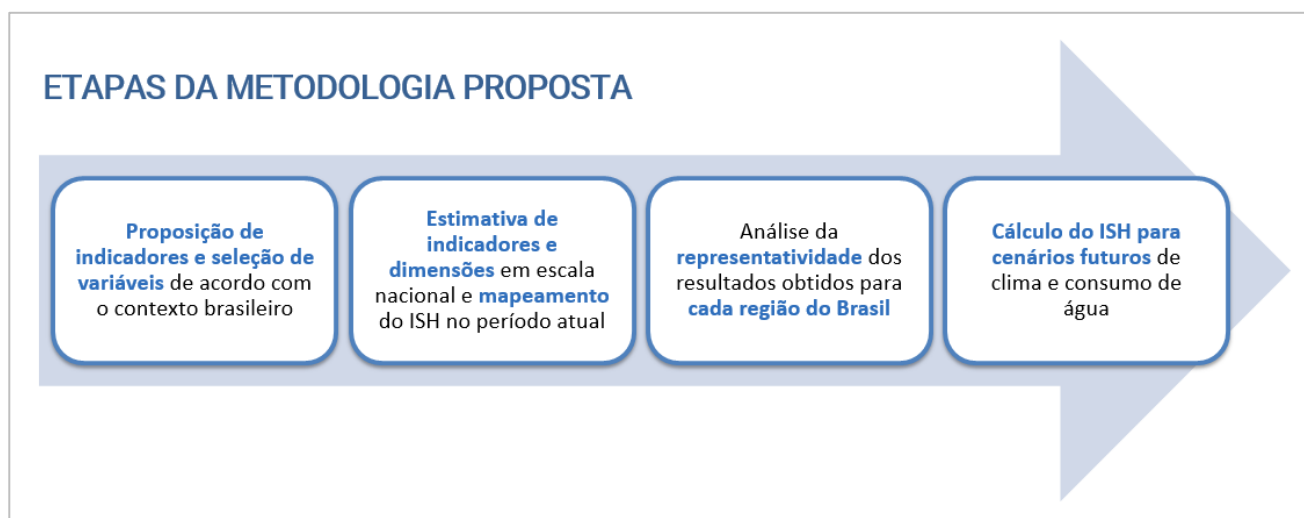


Figura 22. Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa

5.1. Proposição de indicadores e seleção de variáveis

A partir da análise dos dados existentes no Brasil, e buscando aplicar um método simplificado para avaliar a sua capacidade de representar a segurança hídrica no País, foram selecionados os indicadores considerados relevantes para cada dimensão. Esses indicadores foram selecionados não apenas pela disponibilidade de dados de variáveis, como também pela sua relação direta com a dimensão do ISH. Por exemplo, na dimensão humana, após análise de dados, verificou-se que haveria possibilidade de utilizar diversos indicadores, dentre eles: o consumo *per capita*, medido pelas variáveis população total do município e volume total de água consumido pelo município; o abastecimento de água, mensurado pela porcentagem da população do município atendida por um sistema de abastecimento de água; o esgotamento sanitário, medido pela porcentagem de população do município atendida com uma rede de esgotos; água tratada, inferido através da porcentagem de água que é tratada no município; a frequência de coleta seletiva no município (relacionada com o grau de qualidade dos mananciais, uma vez que locais com deposição irregular de resíduos de

diferentes origens e características de periculosidade podem ter maior quantidade de águas impróprias para consumo, aumentando a insegurança hídrica), e até mesmo a vegetação, uma vez que locais com maior cobertura vegetal de florestas tendem a ter rios perenes, com água superficial disponível ao longo de todo o ano, enquanto outras regiões com vegetação rasteira apresentam rios intermitentes, o que aumenta a insegurança hídrica sazonalmente.

Porém, buscando simplificar a metodologia de mapeamento, e pensando na possibilidade de replicação do método em outras regiões que tenham uma plataforma de dados básicos, optou-se por considerar, na dimensão humana, apenas o volume de água consumido pela população, inferido através do consumo *per capita*, visto que esse indicador é muito importante para simular os demais cenários futuros de aumento e diminuição da demanda hídrica pela população. Cabe destacar que, para mensurar essa dimensão, também caberia utilizar o balanço hídrico, que nada mais é do que a relação entre as demandas e disponibilidades hídricas. Entretanto, como no presente estudo a ideia é analisar a sensibilidade do ISH frente à alteração no volume de água consumido e à disponibilidade de água superficial futura de forma separada, optou-se por considerar apenas o volume de água consumido pela população na dimensão humana. Dessa forma, as mudanças nas vazões médias ocasionadas pelas projeções futuras dos MCG serão analisadas na dimensão de resiliência.

No **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados, de forma sucinta, os indicadores e variáveis propostos para cada dimensão do ISH no presente trabalho, bem como a fonte desses dados. De forma geral, foram extraídas informações das seguintes fontes:

- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE):** [Malha Censitária de 2021](#) e [Projeções da População até 2060](#);
- **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS):** [Indicador de consumo per capita](#);
- **Agência Nacional das Águas (ANA):** [Catálogo de Metadados](#), de onde foram extraídas informações de usos consuntivos da água (agricultura, pecuária e indústria de informação), e [Disponibilidade hídrica subterrânea](#), de onde foram utilizados os dados de vazão explotável;
- **Ribeiro (2020):** [Dados de vazão](#) de referência em 95% do tempo (Q_{95}) e vazão média (Q_m) para o período de 1980 a 2014 (35 anos), modelados através do modelo hidrológico MGB-AS (SIQUEIRA *et al.*, 2018);
- **Brêda *et al.* (2020):** [Dados de alteração \(em %\) da vazão média e da evapotranspiração](#), projetados para o período futuro (2081 a 2100), nos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, oriundos dos MCG da Fase 5 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014).

Quadro 1. Proposta de indicadores e as respectivas fontes de informação

DIMENSÃO	INDICADOR	VARIÁVEIS	FONTE	ANO*
HUMANA	Volume de água consumido pela população	População total no Estado	IBGE	2021
		Consumo <i>per capita</i>	SNIS	2021
ECONÔMICA	Consumo de água pela pecuária	Vazão explotada para dessedentação animal	ANA	2020
	Consumo de água pela agricultura	Vazão explotada para irrigação		
	Consumo de água pela indústria de transformação	Vazão explotada pela indústria de transformação		
ECOSSISTÊMICA	Quantidade de água - Vazão ecológica	Vazão ecológica (Q_{95})	Ribeiro (2020)	1980-2014

DIMENSÃO	INDICADOR	VARIÁVEIS	FONTE	ANO*
RESILIÊNCIA	Reservação Natural	Vazão média (Q_m)	Ribeiro (2020)	1980-2014
	Reserva potencial explotável dos sistemas de aquífero	Vazão explotável (Q_{exp})	ANA	2023

* Ano de referência dos dados obtidos para a presente pesquisa

5.1.1. Dimensão humana

A dimensão humana do ISH avalia a garantia da oferta de água para o abastecimento, quantificando a população exposta a maiores riscos (regiões críticas). Portanto, o indicador selecionado para compor essa dimensão é o volume de água consumido pela população.

5.1.1.1. Volume de água consumido pela população

A demanda de água utilizada pela população diz respeito ao volume explotado, seja dos recursos hídricos superficiais ou da água subterrânea, para realização das atividades diárias. No presente estudo, a fim de se quantificar o volume de água total consumido pela população, foi utilizado o indicador de consumo médio *per capita* de água já calculado pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2022), ou seja, a quantidade média diária de água, utilizada por indivíduo, para satisfazer os consumos domésticos, comercial, público e industrial. Para o cálculo desse indicador (IN022), o volume de água exportado (AG019) é subtraído do volume de água consumido (AG010), e o resultado é dividido pela média aritmética da população atendida com abastecimento de água (AG001) dos dois últimos anos de coleta, conforme apresentado na Equação 1.

$$IN022 = \frac{(AG010 - AG019) \cdot 1000 \text{ L/m}^3}{365 \text{ dias/ano} \cdot AG001} \quad (1)$$

Onde:

IN022 = consumo *per capita* diário (L/hab.dia) – indicador IN022

AG010 = volume de água consumido (m³/ano) – indicador AG010

AG019 = volume de água tratada exportado (m³/ano) – indicador AG010

AG001 = Média aritmética da população atendida com abastecimento de água nos anos de 2020 e 2021 (habitantes) – indicador AG001

Vale destacar que o cálculo do consumo *per capita* realizado pelo SNIS é baseado na população atendida com abastecimento de água, que nem sempre condiz com a população total residente do município. Em outras palavras, a população abastecida com água geralmente não abrange todos os habitantes de determinada localidade. Ainda, considerando que, para o período futuro, só existem projeções da população a nível estadual, e que é necessário que os dados do período atual e dos períodos futuros estejam no mesmo nível de detalhamento para que se possa fazer um escalonamento dos valores de água consumida para o cálculo do ISH, foi assumido como indicador da dimensão humana o volume de água consumido por Estado brasileiro (não por município). Dessa forma, como o objetivo do presente trabalho é aplicar uma metodologia de cálculo da segurança hídrica utilizando ferramentas de geoprocessamento de forma simplificada, foi calculado o consumo *per capita* diário médio de cada Estado a partir dos municípios com dados disponíveis no SNIS. É importante salientar que 5.337 municípios foram amostrados pelo SNIS, ou seja, 98,6% da população brasileira é abrangida, sendo que os demais 233 municípios não

participaram da amostra, conforme apresentado na Figura 23. Dessa forma, existem municípios sem dados disponíveis, os quais não foram considerados no cálculo do consumo *per capita* diário médio (vide Figura 23).

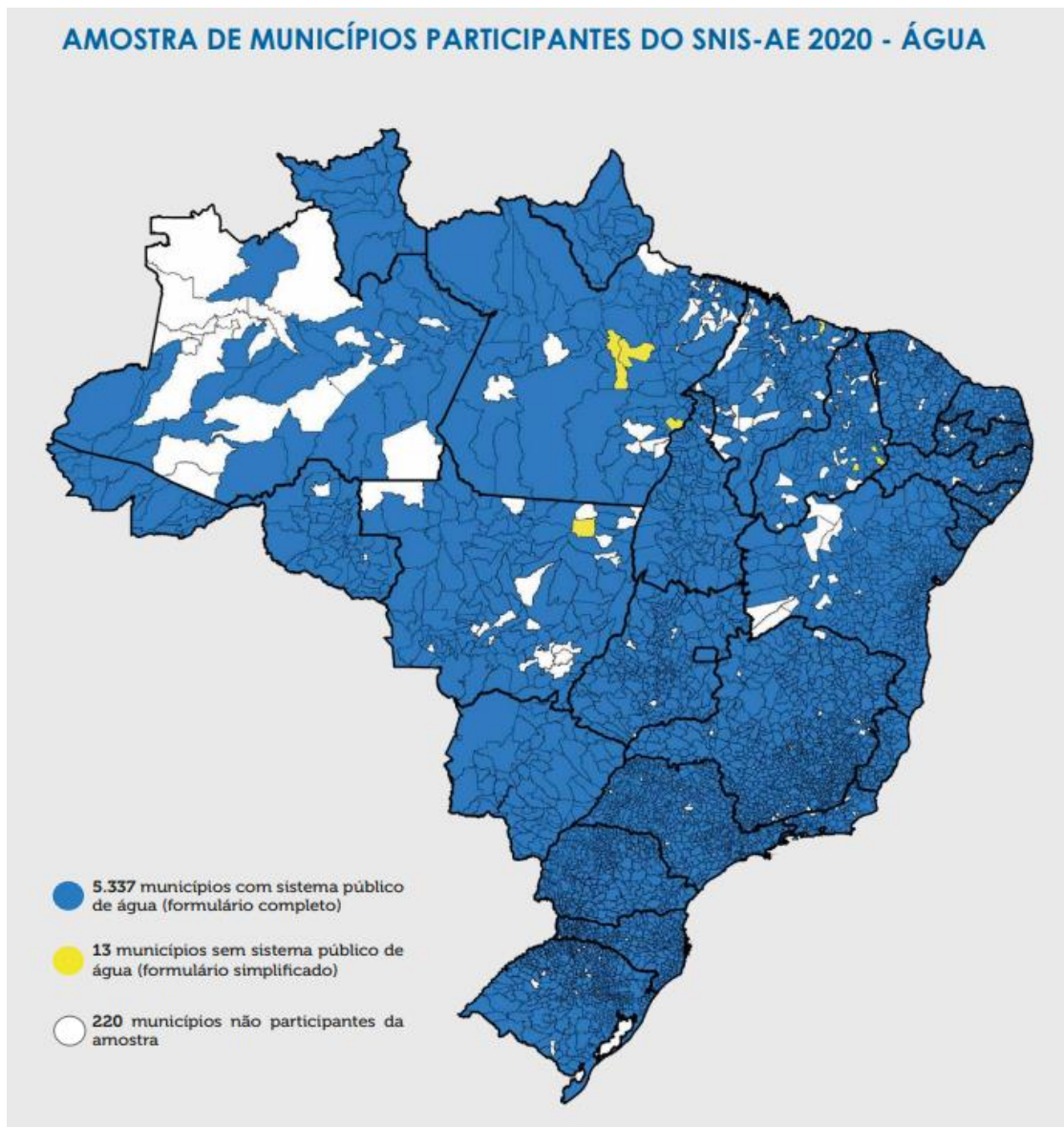


Figura 23. Municípios participantes da coleta de dados sobre água e esgoto do SNIS
FONTE: SNIS (2022).

Por fim, para gerar o consumo de água por município em termos absolutos, foi aplicada a Equação 2. Destaca-se que o volume de água consumido pela população possui uma relação inversamente proporcional com o ISH, visto que, quanto maior o consumo, menor será a segurança hídrica em relação à disponibilidade de água em quantidade para outras pessoas e/ou outros usos.

$$V_{cons} = C_{per\ capita} \cdot P_{tot} \quad (2)$$

Onde:

V_{cons} = volume de água consumido (L/dia)

$C_{per\ capita}$ = consumo *per capita* diário (L/hab.dia) – FONTE: indicador IN022 do SNIS

P_{tot} = População total estimada para o ano de 2021 (habitantes) – FONTE: IBGE

5.1.2. Dimensão econômica

A dimensão econômica busca valorar os riscos dos setores econômicos que fazem uso de recursos hídricos no território nacional. Portanto, para o contexto atual do Brasil é imprescindível a garantia de água para agricultura e pecuária, bem como para a atividade industrial. Sendo assim, foram considerados como indicadores: o consumo de água pela agricultura, pela pecuária e pela indústria de transformação, todos detalhados a seguir.

5.1.2.1. Consumo de água pela agricultura irrigada

O banco de Metadados da Agência Nacional das Águas (ANA) apresenta informações sobre o consumo de água para agricultura irrigada para o período de 1931 a 2040. Como a agricultura é o setor econômico que mais gasta água no Brasil (ANA, 2019b), é importante contabilizar esse consumo no cálculo da segurança hídrica para a dimensão econômica. Entende-se que esse indicador possui uma relação inversamente proporcional ao ISH, de forma que, quanto maior o consumo de água, maior será a insegurança hídrica.

5.1.2.2. Consumo de água pela pecuária

Os maiores usos consuntivos da água, em escala global, são agropecuários (ANA, 2019b). O Brasil possui alguns dos maiores rebanhos do mundo, o que confere uma demanda de água elevada nas estruturas de dessedentação, criação e ambiência de animais. O consumo de água diário varia significativamente de acordo com a espécie animal, seu tamanho e estágio de desenvolvimento, bem como em relação às condições ambientais e de manejo (WARD; MC KAGUE, 2007). A ANA apresenta informações a respeito do consumo de água para dessedentação animal para o ano de referência de 2020, dados estes que foram selecionados para representar a quantidade de água consumida pela pecuária. Assim como o consumo de água pela agricultura, esse indicador apresenta uma relação inversamente proporcional ao ISH.

5.1.2.3. Consumo de água pela indústria de transformação

A indústria de transformação compreende todas as indústrias que realizam a transformação de uma matéria-prima em um produto final ou intermediário. De forma geral, esse segmento é dividido em indústrias de bens de capital (fábricas, máquinas, ferramentas, equipamentos), bens intermediários (produção de matéria-prima para outras indústrias) e bens de consumo (duráveis, como eletrônicos e roupas, e não duráveis, como alimentos e bebidas). Por ser um setor bem abrangente, a indústria de transformação foi selecionada para representar o consumo de água industrial no Brasil. Os dados foram retirados da plataforma de Metadados da ANA para o ano de referência de 2020. Como se trata de consumo, esse indicador também possui uma relação inversamente proporcional ao ISH.

5.1.3. Dimensão ecossistêmica

A dimensão ecossistêmica busca mensurar as condições minimamente saudáveis para o meio ambiente do ponto de vista da segurança hídrica. Dessa forma, considerou-se como principal e mais importante indicador dessa dimensão a vazão mínima de água necessária para garantir as condições básicas de manutenção de ecossistemas aquáticos, conhecida como “vazão ecológica”. Como esse é

um tema relevante e em pauta frente aos impactos cada vez mais frequentes que as ações antrópicas causam nos recursos hídricos, vêm sendo discutidos diversos métodos para calcular essa vazão mínima, os quais são classificados em hidrológico, hidráulico, de habitat ou holístico (LONGHI; FORMIGA, 2011).

5.1.3.1. Quantidade de água adequada para usos naturais: vazão ecológica

Uma das variáveis requeridas para possibilitar a continuidade das funções oferecidas pela água é a manutenção de vazões mínimas que suportem o ecossistema aquático. Estas vazões têm sido chamadas de residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais. Geralmente, são definidas através de valores numéricos que representam a quantidade de água que permanece no leito do rio depois de retiradas para atender usos externos tais como abastecimento público, industrial, irrigação e, em algumas instâncias, energia elétrica. Existem diversas metodologias a serem aplicadas para calcular as vazões mínimas nos rios.

Grazia (2013) afirma que os métodos que consideram a vazão mínima remanescente, caracterizada como a menor quantidade de água a permanecer no curso de água para suprir as demandas ambientais, ecológicas e sociais, como critério técnico para expedir outorga, limitam-se à concepção de fórmulas e modelos matemáticos, não havendo a consideração dos necessários critérios técnicos-hidrológicos e da biologia/ecologia. Desse modo, o desafio da concepção dessas metodologias é considerar as características holísticas, que extrapolem a matemática pura e aplicada, incluindo as características socioambientais no tratamento dessa intrigante temática.

Alguns autores defendem a hipótese de que o cálculo dessas vazões deve também considerar, além do critério estatístico-hidrológico, a adoção de parâmetros ecológicos, sociais, econômicos e até culturais. Isto é, características socioambientais que se ajustem às particularidades das bacias hidrográficas, sujeitas a diferentes interferências antrópicas, inclusive as referidas a impactos operacionais de Usinas Hidrelétricas, pois podem ser melhor analisadas sob uma perspectiva holística (GALVÃO, 2008; SANTOS; CUNHA, 2013; SANTOS, CUNHA, 2018).

Atualmente existe um consenso de que a vazão ecológica deve variar durante o ano, aproximando-se do regime hidrológico natural, que é particular para cada rio (VASCO *et al.*, 2015). No presente trabalho, por restrições acerca de informações em quantidade e de qualidade, a análise da vazão ecológica dos mananciais não pôde ser aprofundada, limitando-se a ser definida quantitativamente como a vazão de estiagem, estimada pela Q_{95} (vazão que permanece no rio em 95% do tempo). Esses dados da vazão de referência Q_{95} foram obtidos através do trabalho de Ribeiro (2020), que caracterizou o regime natural de vazões dos rios da América do Sul através do cálculo de índices hidrológicos. Para isso, foram utilizadas séries de vazões naturais diárias estimadas através do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), numa série de vazões de 1980 a 2014 (35 anos).

5.1.4. Dimensão de resiliência

A dimensão de resiliência diz respeito à capacidade de o sistema se recuperar após e durante a ocorrência de eventos críticos de secas no território brasileiro. Dessa forma, os indicadores considerados para representar essa capacidade, do ponto de vista climático e hidrológico, são: reserva natural e reserva potencial explorável.

5.1.4.1. Reservação Natural (condição natural)

Para mensurar a disponibilidade hídrica superficial, ou seja, a reserva natural disponível em rios, foi considerada a vazão média (Q_m), cujos dados também foram obtidos do trabalho de Ribeiro (2020). Pode-se entender que em locais onde a vazão possui maiores valores, identifica-se uma menor vulnerabilidade à seca da região, contribuindo para uma maior segurança hídrica. Em locais em que o oposto ocorre, identifica-se uma maior vulnerabilidade a períodos mais críticos de oferta hídrica.

5.1.4.2. Reserva potencial explotável

Esse indicador busca retratar a segurança hídrica por meio de uma análise do potencial de reservação de águas subterrâneas nos aquíferos do país, de acordo com seu tipo, que pode ser:

- **Aquífero poroso:** apresenta grande quantidade de água armazenada em seus poros, que são vazios inerentes a matriz da rocha ou solo (porosidade primária). Geralmente esses poros estão interconectados, permitindo a movimentação da água;
- **Aquífero fraturado e/ou fissurado:** a água circula através de fraturas ou pequenas fissuras, que são estruturas geradas por fenômenos posteriores à formação da rocha (porosidade secundária);
- **Aquífero Cárstico:** a água circula em condutos que resultaram do alargamento de diaclases/fraturas por dissolução em rochas carbonáticas.

De modo geral, as rochas sedimentares, representadas pelo sistema de aquífero granular, favorecem os processos de recarga hídrica subterrânea devido à boa porosidade desses litotipos. Contrariamente, as rochas carbonáticas e cristalinas, representadas pelo sistema de aquífero cárstico e fissural, respectivamente, apresentam baixa porosidade natural, reduzindo drasticamente o potencial de recarga hídrica (NETO; CHAGAS; JÚNIOR, 2013).

Dessa forma, para mensurar o potencial de armazenamento subterrâneo, considerou-se os dados disponíveis na plataforma da ANA sobre a disponibilidade hídrica subterrânea, apresentados em volume de reserva potencial explotável (m^3/s). Quanto maior a reserva explotável, maior a segurança hídrica para o local. Sendo assim, esse indicador possui relação diretamente proporcional ao ISH. Os dados foram extraídos em uma camada vetorial de polígono para então serem aplicadas as ferramentas de geoprocessamento.

5.2. Mapeamento dos indicadores e dimensões do ISH para o período atual

Para mapear cada dimensão do ISH, foi utilizada a calculadora *raster* do QGIS. Como nem todas as informações extraídas foram obtidas em formato *raster*, foi necessário realizar determinados procedimentos até se obter esse formato para então mapear cada dimensão do ISH. No caso dos dados extraídos na forma de tabela, foi necessário uni-los a uma camada vetorial, a qual, por sua vez, foi “rasterizada” (utilização da ferramenta “Rasterizar” do QGIS) e uniformizada (utilização da calculadora *raster* para transformar os *pixels* em valores que variam de 0 a 1). A seguir, são detalhadas as etapas de mapeamento de cada dimensão.

5.2.1. Dimensão humana

Para mapear o volume de água consumido, foi extraída uma camada vetorial dos Estados brasileiros no IBGE, e os dados do SNIS (consumo *per capita* médio por estado) e do IBGE (população por estado), obtidos em forma de tabela, foram unidos à tabela de atributos do *shapefile* dos Estados. Dessa forma, após a rasterização do arquivo vetorizado, foi feita a normalização do arquivo *raster* de forma que o valor máximo (1) corresponda ao consumo mínimo, e o valor mínimo (0) corresponda ao consumo máximo (ISH inversamente proporcional ao consumo *per capita*). Para isso, foi aplicada a Equação 3 na calculadora *raster* do QGIS. Vale destacar que, a fim de se ter uma margem na escala da normalização das dimensões do ISH (importante para a comparação do mapeamento na análise de sensibilidade), foi considerado como mínimo o valor 10% inferior ao menor valor encontrado nos arquivos *raster* dessa dimensão, e como máximo o valor 10% superior ao maior valor encontrado.

$$Dh_{01} = 1 - \frac{(Dh - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (3)$$

Onde:

Dh_{01} = arquivo *raster* da dimensão humana normalizado

Dh = arquivo *raster* com o volume de água consumido pela população por Estado em cada cenário de consumo (atual e futuros, os quais são detalhados no tópico 5.3.3.1)

x_{\min} = valor 10% inferior ao menor valor encontrado entre os arquivos *raster* da dimensão humana Dh

x_{\max} = valor 10% superior ao maior valor encontrado entre os arquivos *raster* da dimensão humana Dh

5.2.2. Dimensão econômica

Todos os dados de consumo de água dessa dimensão foram obtidos por município, na forma de tabelas, as quais foram unidas ao *shapefiles* de municípios, disponibilizado pelo IBGE, para então serem convertidos em *raster*. Ao final da rasterização dos três arquivos, estes foram somados, obtendo-se um arquivo *raster* de consumo de água para o setor econômico (em m³/dia). Esse *raster*, por sua vez, foi então normalizado (convertido em pixels que variam de 0 a 1), de forma análoga à equação apresentada anteriormente (Equação 3), para então ser utilizado no cálculo do ISH.

5.2.3. Dimensão ecossistêmica

A vazão ecológica foi mapeada considerando-se os dados da vazão de permanência de 95% do tempo (Q_{95}). Os dados, obtidos na forma de um *shapefile* de polígonos (minibacias hidrográficas) foram rasterizados e normalizados. Porém, como a relação do ISH com a Q_{95} é diretamente proporcional, o cálculo para se obter o arquivo *raster* da dimensão ecossistêmica normalizado foi realizado conforme apresentado na Equação 4.

$$Decos_{01} = \frac{(Decos - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (4)$$

Onde:

$Decos_{01}$ = arquivo *raster* da dimensão ecossistêmica normalizado

$Decos$ = arquivo *raster* com a vazão de permanência de 95% para cada período considerado (atual e futuros, os quais são detalhados no tópico 5.3.3.3)

x_{\min} = valor 10% inferior ao menor valor encontrado entre os arquivos *raster* da dimensão ecossistêmica $Decos$

x_{\max} = valor 10% superior ao maior valor encontrado entre os arquivos *raster* da dimensão ecossistêmica $Decos$

5.2.4. Dimensão de resiliência

Em relação à disponibilidade hídrica superficial, os dados da vazão média Q_m foram obtidos na forma de *shapefile* de polígonos (minibacias hidrográficas), os quais foram “rasterizados”, de forma análoga ao que foi apresentado para a Dimensão ecossistêmica (Equação 4). Já os dados de disponibilidade hídrica subterrânea foram obtidos na forma de *shapefile* de polígonos (principais bacias hidrográficas do país) com dados de vazão explotável. Para se obter a aproveitamento da reserva potencial explotável de cada bacia hidrográfica, isto é, a capacidade explotável de água (m^3/s) por tamanho da bacia (km^2), foi utilizada a Calculadora de Campo do QGIS para aplicar a Equação 5.

$$RPE = \frac{Q_{exp}}{A} \quad (5)$$

Onde:

RPE = Reserva Potencial Explotável (em $m^3/s.km^2$)

Q_{exp} = vazão explotável (em m^3/s)

A = área da bacia hidrográfica (em km^2)

Após essa etapa, foi feita uma média dos arquivos *raster* normalizados de cada indicador de disponibilidade hídrica (superficial e subterrânea), e esse resultado foi novamente normalizado para se obter o *raster* da dimensão de resiliência, com pixels variando de 0 a 1.

5.3. Mapeamento dos indicadores e dimensões do ISH para o período futuro

Para calcular o Índice de Segurança Hídrica no período futuro, cada dimensão sofreu alterações dadas pelas mudanças climáticas ou por mudanças no consumo de água. Para as mudanças no clima, foram considerados os dados de Modelos Climáticos Globais da Quinta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) projetados nos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5, conforme detalhado a seguir. As alterações na demanda hídrica são consideradas diretamente na dimensão humana, através da variação percentual no consumo *per capita*, e indiretamente na dimensão econômica, em que o consumo de água para agropecuária foi reajustado proporcionalmente com a mudança nas projeções futuras de evapotranspiração. Para as dimensões ecossistêmica e de resiliência, foram consideradas as alterações da vazão média calculadas por Brêda *et al.* (2020) sobre as vazões Q_{95} e Q_m calculadas por Ribeiro (2020). As alterações projetadas da vazão média segundo MCG do CMIP5 foram projetadas utilizando o modelo hidrológico MGB-AS (SIQUEIRA *et al.*, 2018). Os detalhes dos cálculos de cada dimensão do ISH no período futuro são dados no tópico 5.3.3.

5.3.1. Modelos climáticos globais

Os modelos climáticos são as principais ferramentas para analisar a resposta do sistema climático frente a várias forçantes e para fazer projeções climáticas em escalas de tempo sazonal a decadal. Porém, a complexidade da representação de cada processo do sistema climático é limitada pelas observações (incompletas ou inexistentes), pelos recursos computacionais e pelo conhecimento atual (RANDALL *et al.*, 2007). Além disso, sabe-se que a variabilidade natural dos processos físicos e químicos da atmosfera global são de natureza caótica, de forma que o clima pode ser sensível a mudanças mínimas não mensuradas pelos modelos (SOUZA *et al.*, 2014). Modelos climáticos possuem incertezas em suas formulações e em sua condição inicial. Sendo assim, uma

simulação individual apresenta apenas um dos possíveis caminhos para o qual o clima pode seguir. Em outras palavras, diferentes modelos climáticos globais tendem a apresentar projeções de mudanças diferentes para uma mesma variável, em uma mesma região, em função de diferenças na sua formulação e na resolução espacial. Dessa forma, *ensembles* de vários modelos climáticos ou até mesmo de simulações de um único modelo podem representar de forma mais adequada o clima futuro, mas ambas as soluções para validação dos modelos implicam em custos (FLATO *et al.*, 2013).

Visando testar a habilidade dos modelos de simular o clima observado, em 1995, o Grupo de Trabalho sobre Modelagem Acoplada (WGCM, *Working Group on Coupled Modelling*) do Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP, *World Climate Research Programme's*) criou o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP). A ideia desse projeto é utilizar experimentos comuns para todos os modelos para testar o quanto eles conseguem representar o clima. Quando os centros de modelagem fazem isso, é possível comparar os resultados não apenas com as observações, mas com outros modelos, e assim explorar a gama de comportamentos dos modelos, bem como isolar pontos fortes e fracos de diferentes modelos em um cenário controlado. Dessa forma, através de experimentos idealizados, pode-se observar as diferenças entre os modelos, distinguindo erros específicos de modelos individuais e erros que são universais e devem ser o foco prioritário nas melhorias dos modelos climáticos (FLATO *et al.*, 2013). Porém, apesar de um conjunto de modelos representar mais de um caminho para o qual o clima pode seguir, recentemente alguns pesquisadores têm orientado os cientistas a serem mais seletivos na forma como usam os resultados do modelo, salientando que é preferível utilizar não a média de todos os modelos climáticos, mas os resultados de modelos conhecidos cujas taxas de aquecimento são mais realistas (VOOSEN, 2022). Isso porque os MCG de cada fase do CMIP sempre são testados quanto à sua sensibilidade climática (o aquecimento esperado quando dióxido de carbono atmosférico é duplicado em relação ao período pré-industrial) e, na rodada do CMIP6, dos mais de 50 modelos avaliados e comparados (EYRING *et al.*, 2016), 10 deles apresentaram sensibilidade climática superior a 4,5°C, o que está relacionado a *feedbacks* positivos mais fortes das nuvens devido à diminuição da cobertura extratropical de nuvens baixas e do albedo (ZELINKA *et al.*, 2020). Um trabalho recente de Brunner *et al.* (2020) aplicou uma metodologia de agrupamento de modelos climáticos globais pela proximidade em sua estrutura para representar os processos físicos que ocorrem na atmosfera. Eles observaram que existe uma redução significativa na projeção de média de aquecimento porque alguns modelos do CMIP6 com alto aquecimento futuro recebem pesos de desempenho sistematicamente mais baixos e não são ponderados na média. Dessa forma, a média do aquecimento no final do século (2081-2100 em relação a 1995-2014) considerando o cenário SSP5-8.5 após a aplicação dos pesos de agrupamento é de 3,7 °C, em comparação com 4,1 °C sem essa ponderação.

Embora os modelos climáticos tenham evoluído consideravelmente de uma fase do CMIP para a outra, a variável precipitação continua sendo relativamente mal representada. Medeiros, Oliveira e Avila-Diaz (2022) compararam o desempenho de modelos climáticos do CMIP3, CMIP5 e CMIP6 em termos de sua capacidade de simular condições extremas de precipitação. Os autores observaram que a evolução dos modelos ao longo do tempo (do CMIP3 ao CMIP6) não se refletiu numa melhora substancial em representar os eventos extremos de chuva analisados. Além disso, todos os modelos de todas as gerações do CMIP apresentaram dificuldade em representar as tendências do período histórico, indicando que muitas melhorias precisam ser implementadas nos MCG. De forma semelhante, Correa *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de um subconjunto de modelos do CMIP6 considerando dados históricos simulados de temperatura e precipitação no Brasil, para o período de

1985 a 2014. Os autores observaram que o comportamento sazonal da precipitação é melhor representado na região Centro-Oeste do Brasil. Já na região Nordeste ocorre uma tendência de superestimar a precipitação durante o período chuvoso, e na região Sul há uma tendência a subestimar a chuva, especialmente durante o inverno austral. O mesmo foi observado por Pereima (2021), que avaliou o desempenho dos MCG do CMIP5 e CMIP6 para representar o histórico observado de precipitação na Região Sul do Brasil, e concluiu que as projeções dos modelos apresentam um viés seco, simulando menores volumes precipitados, maior número de dias sem chuva consecutivos e precipitações extremas menos intensas que as observadas. Além disso, ela observou que os modelos do CMIP6 têm melhor desempenho para representar o clima atual, simulando uma precipitação mais bem distribuída ao longo dos meses do que os modelos do CMIP5, os quais não capturaram a sazonalidade observada.

No presente trabalho, optou-se por considerar os resultados obtidos por Brêda *et al.* (2020), os quais utilizaram um subconjunto de 25 (vinte e cinco) modelos climáticos do CMIP5 nos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 para analisar as mudanças na temperatura, precipitação, evapotranspiração, vazão de rios e índice de aridez em toda América do Sul. Tais modelos são descritos no Quadro 2.

Quadro 2. Informações dos Modelos Climáticos Globais do CMIP5 utilizados na análise

Modelo	Instituição	País	Resolução (graus)	
			Longitude	Latitude
ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	Austrália	1,25	1,875
ACCESS1.3			1,25	1,875
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center (BCC)	China	2,7906	2,8125
BCC-CSM1.1 (m)			1,1215	1,125
BNU-ESM	Beijing Normal University (BNU)		2,7906	2,8125
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Canadá	2,7906	2,8125
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	França	1,4008	1,40625
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Austrália	1,8653	1,875
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	EUA	2	2,5
GFDL-ESM2G			2,0225	2,5
GFDL-ESM2M			2,0225	2,5
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)		2	2,5
GISS-E2-R			2	2,5
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido	1,25	1,875
HadGEM2-ES			1,25	1,875
HadGEM2-AO	MOHC + National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration (NIMR-KMA)	Reino Unido e Coreia do Sul	1,25	1,875
INM-CM4	Russian Academy of Sciences, Institute of Numerical Mathematics (INM)	Rússia	1,5	2
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	França	1,8947	3,75
IPSL-CM5A-MR			1,2676	2,5
IPSL-CM5B-LR			1,8947	3,75
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japão	2,7906	2,8125
MIROC-ESM			2,7906	2,8125
MIROC5			1,4008	1,40625
MRI-CGCM3			1,12148	1,125

Modelo	Instituição	País	Resolução (graus)	
			Longitude	Latitude
NorESM1-M	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega	1,8947	2,5

* A resolução refere-se ao grid de precipitação

FONTE: Brêda *et al.* (2020).

5.3.2. Cenários de emissão de GEE

Os cenários utilizados por Brêda *et al.* (2020) para fazer as projeções de vazão e evapotranspiração são oriundos do Quinto Relatório do IPCC (AR5). São os chamados “Caminhos de Concentração Representativos” (RCP, *Representative Concentration Pathways*), havendo um cenário de mitigação rigorosa (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com altas concentrações de GEE (RCP 8.5) (IPCC, 2014). Cada cenário de RCP foi projetado para atingir um alvo de forçante radiativa específica de GEE em uma data específica (GETTELMAN; ROOD, 2016), com base em diferentes rumos que a sociedade pode tomar (tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso da terra, tecnologia e políticas ambientais). O número atribuído ao nome de cada RCP diz respeito ao valor da forçante radiativa de estabilização (em W/m^2) ao final do ano de 2100 em relação às condições pré-industriais. Esse valor está diretamente relacionado aos níveis de CO_2 e outros GEEs na atmosfera. Sendo assim, as concentrações equivalentes de CO_2 no ano de 2100 para o RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 são 421 ppm, 538 ppm e 936 pm, respectivamente (MEINSHAUSEN *et al.*, 2011). Brêda *et al.* (2020) consideraram os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 em seu trabalho, e ambos os cenários foram considerados na presente pesquisa também.

5.3.3. Projeções futuras de cada dimensão do ISH

5.3.3.1. Dimensão humana

Nessa dimensão, para calcular o consumo de água futuro, foram consideradas as projeções de crescimento populacional realizadas pelo IBGE (dados projetados até o ano de 2060). Vale destacar que as demandas hídricas futuras foram calculadas por Estado brasileiro, visto que este é o maior grau de detalhamento disponível das projeções da população. Além disso, como não existem dados projetados de população até o final de 2100, foi considerado que a população no final do século é a mesma que aquela projetada para o ano de 2060 pelo IBGE. Então, foram aplicados os seguintes procedimentos:

- Primeiramente, foi calculado o consumo *per capita* médio de cada Estado brasileiro;
- Com o consumo *per capita* e as projeções da população segundo o IBGE para o ano de 2060, foi possível estimar qual o consumo de água total por Estado, e utilizar esses valores para o mapeamento do ISH considerando que o consumo *per capita* continuará o mesmo que o atual;
- Ao final da avaliação do impacto das mudanças climáticas mantendo-se o consumo *per capita* do período atual, foi analisado também o impacto causado pela alteração nos hábitos de consumo de água. Para isso, foram considerados os seguintes cenários: aumento do consumo de água pela população (consumo *per capita*) de 5%, 10% e 15%, bem como diminuição do consumo de água pela população em 2% e 5%. Essas porcentagens foram aplicadas sobre os valores de consumo calculados na etapa anterior

(b). As porcentagens de alteração no consumo de água para os cenários futuros foram arbitradas considerando as situações mais possíveis, visto que, por exemplo, não se espera que haja uma diminuição de consumo de água de 10 e 15% frente ao atual quadro socioeconômico e ambiental do Brasil.

5.3.3.2. Dimensão econômica

Na dimensão econômica, foi calculada uma alteração na demanda hídrica para os setores de pecuária e agricultura de forma indireta, através da diferença relativa na evapotranspiração (ET) do período futuro (2081 a 2100) em relação ao período atual (1986 a 2005), segundo os dados do trabalho de Brêda *et al.* (2020), obtidos através do modelo hidrológico MGB-AS (SIQUEIRA *et al.*, 2018), tanto para o cenário RCP 4.5 quanto para o cenário RCP 8.5. Diversos estudos já relacionaram o aumento da temperatura projetado pelas mudanças climáticas com a mudança na evapotranspiração de referência, provocando alterações na demanda hídrica para agricultura (e.g. FERREIRA; LOPES; NERY, 2021; SARAIVA *et al.*, 2016). Alterações positivas na ET significam um aumento do estresse hídrico e, conseqüentemente, uma demanda hídrica maior para o cultivo de culturas e criação de animais.

Os dados de alteração na evapotranspiração foram obtidos em um *shapefile* da América do Sul elaborado por Brêda *et al.* (2020). Esse arquivo vetorizado foi rasterizado para então ser somado ao *raster* de consumo de água pela agropecuária no período atual, conforme apresentado na Equação 7, utilizando novamente a ferramenta *Raster Calculator* do QGIS. Os arquivos *raster* resultantes para ambos os cenários de emissão de GEE foram então normalizados (pixels variando de 0 a 1), de forma análoga ao descrito no tópico 5.2.1 (Equação 3), e utilizados para representar a Dimensão Econômica o período futuro.

$$PF_{Decon} = PA_{Decon}(1 + \Delta_{ET}/100) \quad (7)$$

Onde:

PF_{Decon} = consumo de água pela agropecuária no período futuro para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5)

PA_{Decon} = consumo de água observado da agropecuária no período atual (2020)

Δ_{ET} = alteração relativa na evapotranspiração (em %), considerada a alteração na demanda hídrica da dimensão econômica, obtida através do trabalho de Brêda *et al.* (2020), para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5)

Para a indústria de transformação, a demanda hídrica será fixada como sendo igual à atual, não havendo alterações futuras. Uma motivação para isso acontecer futuramente está ligada ao crescente avanço na criação de sistemas de reutilização de água nos processos produtivos, bem como a redução do uso da água. Dessa forma, mesmo que o desenvolvimento econômico propicie o surgimento de muitas indústrias novas, existe a possibilidade de aderência, por parte das empresas (novas e existentes), de tecnologias mais limpas de economia de água. Além disso, entende-se que a demanda de água pelo setor agropecuário é muito maior (ANA, 2019b) frente ao consumo pela indústria, causando um impacto muito maior no índice do que alterações de demanda de água industrial.

5.3.3.3. Dimensão ecossistêmica

A vazão mínima esperada em 95% do tempo de um ano hidrológico (Q_{95}) foi estimada por Ribeiro (2020) apenas para o período atual, não havendo dados disponíveis de projeções futuras dessa variável. Portanto, visando preencher essa lacuna para aplicação da metodologia proposta no presente trabalho, foram consideradas, para calcular a Q_{95} futura, as mesmas alterações calculadas por Brêda *et al.* (2020) para a Q_m no período futuro. Dessa forma, o *shapefile* de linhas contendo as informações de alteração da vazão média no período de 2081-2100 em relação ao período atual de 1986-2005 foi atribuído ao *shapefile* de Ottobacias disponibilizado pela ANA (Catálogo de Metadados), para então ser rasterizado e somado aos dados de Q_{95} do período atual através da ferramenta *Raster Calculator* do QGIS, conforme apresentado na Equação 8. Os arquivos *raster* resultantes para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) foram então normalizados conforme descrito anteriormente na Equação 4.

$$PF_{Des} = Q_{95}(1 + \Delta_{Qm}/100) \quad (8)$$

Onde:

PF_{Decos} = vazão mínima esperada em 95% do tempo no período futuro para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5)

Q_{95} = vazão mínima esperada em 95% do tempo no período atual (2020)

Δ_{Qm} = alteração relativa na vazão média (em %), obtida através do trabalho de Brêda *et al.* (2020)

5.3.3.4. Dimensão de resiliência

De forma semelhante à dimensão ecossistêmica, para calcular a vazão média para o período futuro considerando o RCP 4.5 e o RCP 8.5, foram utilizados os dados de alteração na vazão média de Brêda *et al.* (2020), aplicando-se a Equação 9.

$$Dsup_{fut} = Q_m(1 + \Delta_{Qm}/100) \quad (9)$$

Onde:

$Dsup_{fut}$ = disponibilidade hídrica superficial no período futuro para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5)

Q_m = vazão média no período atual (2020),

Δ_{Qm} = alteração relativa na vazão média (em %), obtida através do trabalho de Brêda *et al.* (2020)

Os *shapefiles* resultantes da disponibilidade hídrica superficial para ambos os cenários foram então rasterizados normalizados (pixels variando de 0 a 1), de forma análoga ao descrito no tópico 5.2.3 (Equação 4), e utilizados para o cálculo da Dimensão de Resiliência no período futuro, conforme apresentado na Equação 10. Vale destacar que tanto a Equação 9 quanto a Equação 10 foram realizadas utilizando ferramentas de geoprocessamento do QGIS. O *raster* resultante da Equação 10 ($Dres_{fut}$) também foi normalizado (Equação 4), e então utilizado para o cálculo da segurança hídrica.

$$Dres_{fut} = (Dsup_{fut} + Dsubt_{atual})/2 \quad (10)$$

Onde:

$Dres_{fut}$ = dimensão de resiliência (não normalizada) período futuro para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5)

$Dsup_{fut}$ = disponibilidade hídrica superficial no período futuro (RCP 4.5 e RCP 8.5), calculada pela Equação 9

$Dsubt_{atual}$ = *shapefile* já rasterizado e normalizado das vazões explotáveis dos sistemas aquíferos aflorantes para o período atual (2020).

Considerou-se que a disponibilidade hídrica subterrânea permanece a mesma no período futuro porque são escassas as pesquisas sobre os impactos das mudanças climáticas nas taxas de recarga de águas subterrâneas e nos níveis dos aquíferos, e sobre os efeitos na relação entre as águas superficiais e aquíferos, que são hidraulicamente conectados (KUNDZEWICZ et al., 2007). Melo (2013) afirma que, no Sistema Aquífero Guarani, quase 70% dos cenários climáticos geraram variações dos níveis freáticos abaixo daqueles medidos no monitoramento entre 2004 e 2011. Dessa forma, salienta-se que o presente trabalho não pretende avaliar de forma detalhada os impactos das mudanças climáticas sobre a recarga de águas subterrâneas especificamente, e sim de que forma as projeções futuras de precipitação irão afetar a distribuição de água no território brasileiro. Em outras palavras, esse impacto na recarga subterrânea será abordado apenas de forma indireta.

5.4. Análise dos resultados de cada dimensão (período atual)

Ao final da estimativa de cada dimensão do ISH e do mapeamento desses valores, foi necessário avaliar se os resultados eram representativos da realidade de cada região do Brasil. Para isso, foi realizada uma análise visual dos mapas de cada dimensão, bem como uma interpretação racional dos resultados obtidos para as especificidades e contextos regionais, utilizando como referência os resultados das dimensões do índice de segurança hídrica calculados pela Agência Nacional das Águas e do índice de segurança hídrica urbano, disponível no Catálogo de Metadados da ANA (Figura 24). Pode-se observar que existem sutis diferenças entre os mapas apresentados e usados, devido à metodologia aplicada e ao grau de detalhamento espacial para calcular a segurança hídrica. Dessa forma, o ISH calculado em escala nacional apresentou valores mais baixos na região Nordeste do Brasil e na parte sul do Rio Grande do Sul, onde se localiza o Bioma Pampa. Já no ISH urbano, tais regiões apresentaram valores médios de segurança hídrica, enquanto a região Norte se destaca com valores mais baixos.

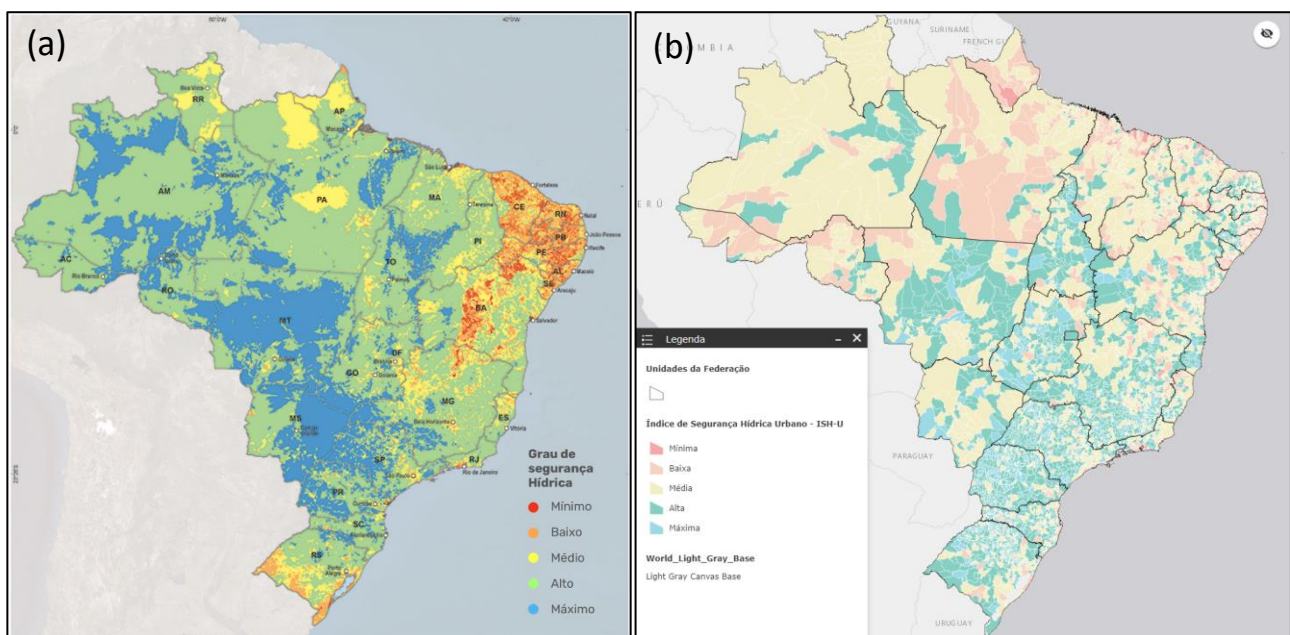


Figura 24. Índice de Segurança Hídrica (a) calculado para todo Brasil pela ANA (ANA, 2019a) e (b) Urbano (ISH-U), disponível no Catálogo de Metadados da ANA (ANA, 2020)

5.5. Mapeamento do ISH

Após avaliar a representatividade de cada dimensão em comparação com o índice de segurança hídrica calculado pela ANA (2019a), foi calculado o ISH propriamente dito, conforme apresentado na Figura 25. Como se considera que todas as dimensões apresentam a mesma prioridade relativa para o cálculo final da segurança hídrica, foi utilizada a calculadora *raster* do QGis aplicando-se a Equação 11. O mesmo método foi utilizado para o ISH futuro (RCP 4.5 e RCP 8.5), porém com alteração de algumas variáveis, conforme descrito anteriormente, no tópico 5.3.3. O objetivo foi alterar determinados indicadores com dados projetados de MCG e verificar qual a sensibilidade do ISH nas diferentes regiões do Brasil frente a essas mudanças.

$$ISH = \frac{Dh + Decos + Decon + Dres}{4} \quad (11)$$

Onde:

ISH = Índice de Segurança Hídrica;

Dh = Dimensão humana;

Decos = Dimensão ecossistêmica;

Decon = Dimensão econômica;

Dres = Dimensão de resiliência.



Figura 25. Aplicações em SIG para obtenção do mapeamento do ISH

5.6. Análise de sensibilidade

Para avaliar se o cálculo do Índice de Segurança Hídrica é sensível a mudanças em seus indicadores nas diferentes regiões do Brasil, foram realizados dois testes:

- Alteração das vazões Q_{95} e Q_m em +20% e -20%, alterando, simultaneamente, indicadores das dimensões ecossistêmica e de resiliência;
- Alteração do consumo de água pela indústria de transformação em +50% e -50%, a fim de avaliar se uma mudança nesse indicador pode vir a se tornar relevante frente ao consumo de água pelo setor de agricultura e pecuária.

5.7. Limitações metodológicas

O presente trabalho apresenta algumas limitações, dadas especialmente pelo tempo para maior aprofundamento quando se realiza um estudo para uma área de abrangência continental, como é o caso do Brasil, país repleto de singularidades e especificidades locais, com uma enorme diversidade natural e cultural (IBGE, 2016). Dessa forma, são descritas as principais restrições da pesquisa apresentada, de forma que possam ser sanadas em trabalhos futuros e/ou replicações metodológicas em outras áreas de estudo:

- Na dimensão humana, foi considerado que, quanto maior o consumo de água pela população, maior a insegurança hídrica. Entretanto, existem diversos Estados do Semiárido Nordeste que apresentam um consumo de água per capita inferior à quantidade mínima proposta pela ONU (110 L/hab.dia), o que deveria ser considerado como inseguro. Porém, dados os procedimentos de cálculo propostos, com um gradiente de segurança hídrica linear variando de 0 (zero) a 1 (um), seria inviável considerar condições não lineares na metodologia. Ressalta-se que, para trabalhos futuros, esse problema poderia ser resolvido adotando-se como indicador da dimensão humana o balanço hídrico, dado pela razão entre a demanda e a disponibilidade de água. No presente trabalho, esse indicador não foi selecionado porque optou-se por considerar diretamente diferentes cenários futuros de consumo de água, alterando-se a dimensão humana de forma simplificada. Porém, existe a possibilidade de sensibilizar o balanço hídrico através da alteração do consumo per capita de água.
- Para as projeções futuras de clima, foram considerados dois cenários de emissão de gases de efeito estufa: RCP 4.5 (cenário intermediário) e RCP 8.5 (cenário de altas emissões, mais pessimista), sendo que ambos levam em conta que poucas medidas preventivas são tomadas em relação à preservação do meio ambiente. Nessa perspectiva de que os caminhos de concentração levam em conta as decisões socioeconômicas tomadas, os cenários de diminuição no consumo de água pela população são os menos prováveis de se concretizarem. Ainda assim, tais situações hipotéticas foram consideradas para analisar as possíveis direções para as quais a segurança hídrica pode caminhar.
- Para o cálculo final do Índice de Segurança Hídrica, dada a continentalidade do território brasileiro e a necessidade de simplificação dos processos metodológicos, foi considerado que todas as dimensões apresentam o mesmo peso em todas as regiões do Brasil. Porém, vale destacar que, para trabalhos futuros, pode-se considerar ponderações diferentes para as dimensões e indicadores do ISH conforme as especificidades regionais ou até mesmo locais. Por exemplo, na Amazônia, pode-se considerar que a dimensão ecossistêmica apresenta um peso maior que a dimensão humana, analisando caso a caso separadamente.
- Na dimensão econômica, as projeções futuras dos indicadores de consumo de água pela agricultura e pela pecuária são baseadas na alteração de evapotranspiração, partindo-se do pressuposto de que as áreas cultivadas permanecem as mesmas, bem como o tamanho dos rebanhos. Essa é uma limitação dada principalmente pela dificuldade de se projetar futuros cenários do setor agropecuário, os quais implicariam em uma maior complexidade no processamento de tais dados.
- Para sensibilizar a Q_{95} da dimensão ecossistêmica no período futuro, considerou-se a alteração da vazão média calculada no trabalho de Brêda *et al.* (2020), visto que não foram encontrados dados de projeções futuras da Q_{95} em outros trabalhos da literatura. Entretanto, ressalta-se que isso é uma limitação do presente trabalho, visto que as vazões médias e mínimas apresentam padrões de comportamento não necessariamente semelhantes.

- Utilizou-se a normalização para uniformizar todos os mapas em uma mesma escala, entretanto os valores apresentaram grandes diferenças, especialmente no que se refere à discrepância das vazões entre Amazônia e Caatinga. A escala de cores adotada para os mapeamentos foi a do método linear por quartil, de forma que os resultados sejam melhor visualizados, porém ainda pôde ser visto uma grande amplitude nos valores máximos e mínimos nesses locais. O método da estandardização foi testado, entretanto o mapeamento final ficou muito semelhante àquele encontrado quando utilizada a normalização. De qualquer maneira, destaca-se a importância dos testes de mais de um procedimento para a análise dos resultados.

Ressalta-se que todas as restrições são descritas acima para que sejam consideradas em trabalhos futuros, especialmente aqueles cuja área de estudo apresente diversidade climática e socioeconômica igual ou superior à do Brasil.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo é dividido em três partes. A primeira delas diz respeito ao mapeamento dos indicadores de cada dimensão para o período atual, bem como do resultado do mapeamento do ISH como um todo. Na segunda parte, a mesma análise é feita para o mapeamento dos indicadores no período futuro, considerando alterações de consumo de água e mudanças oriundas de projeções climáticas. As informações inerentes aos procedimentos de geoprocessamento realizados (máximos e mínimos utilizados para normalização dos *rasters* e arquivos utilizados para cada cenário de ISH calculado) são apresentadas no APÊNDICE A: INFORMAÇÕES SOBRE PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO ISH. A última parte traz discussões a respeito da análise de sensibilidade.

6.1. ISH para o período atual

6.1.1. Mapeamento dos indicadores de cada dimensão

6.1.1.1. Dimensão humana

O mapeamento do volume consumido de água pela população, computado por Estado brasileiro, é apresentado na Figura 26, em que as cores avermelhadas refletem um maior consumo e, conseqüentemente, uma menor segurança hídrica, ao passo que as cores verdes representam os locais com menores volumes consumidos. Pode-se observar que os locais com maior consumo, em vermelho e laranja, estão na região Sudeste e Sul do Brasil, com destaque para o Estado de São Paulo. Esse maior volume se deve principalmente ao fato de São Paulo apresentar o maior número de habitantes (46.024.937 habitantes, segundo dados do IBGE para dezembro de 2021), seguido dos Estados de Minas Gerais (20.732.660 habitantes) e Rio de Janeiro (16.615.526 habitantes), também na região Sudeste. Embora seja a região mais populosa, não é a região com maior consumo *per capita* segundo dados do SNIS para o ano de 2021, em que o maior consumo *per capita* foi registrado para o Estado de Mato Grosso, com 202,09 L/hab.dia. Porém, como a Região Centro-Oeste é a região menos populosa do Brasil, o volume consumido desses Estados não se destacou. Ainda, vale destacar que a Região Sul apresentou cores mais alaranjadas devido ao seu consumo *per capita*, especialmente no Estado do Rio Grande do Sul, o qual, embora não seja tão populoso (11.088.065 habitantes), superou o consumo *per capita* do Estado de SP em 5,13% (167,09 L/hab.dia contra 158,94 L/hab.dia).

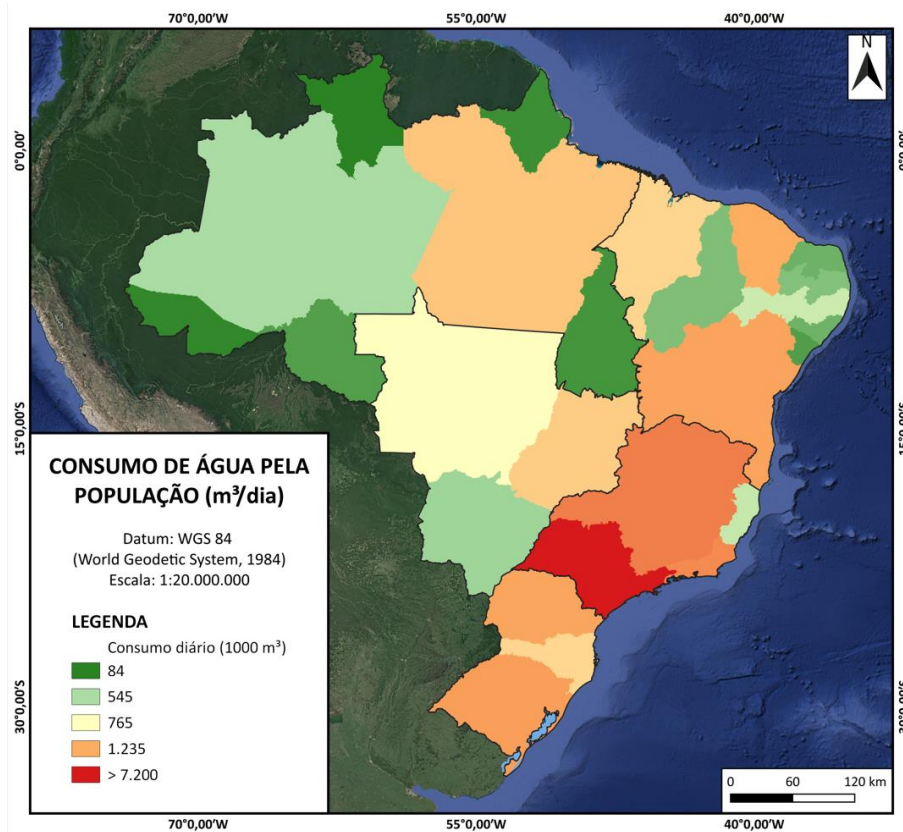


Figura 26. Mapeamento do indicador “Volume de água consumido pela população”

6.1.1.2. Dimensão econômica

A Figura 27 apresenta os resultados da “rasterização” dos dados de consumo de água pela Agricultura (a), pela Pecuária (b) e pela Indústria de Transformação (c). No mapa de consumo de água para agricultura (Figura 27(a)), pode-se observar que as regiões que apresentam mais áreas avermelhadas e alaranjadas são o Sudeste do Brasil, grande parte do Centro-Oeste, a porção sul do Nordeste e quase todo o Rio Grande do Sul, indicando um grande volume de água destinado para o cultivo nessas áreas.

A região compreendida pelas cidades de Juazeiro e Petrolina, localizada na área avermelhada do Nordeste (Figura 27(a)), tornou-se o maior centro produtor de frutas tropicais do país, tendo destaque para os cultivos de manga, uva, melancia, melão, coco e banana. Inclusive, a região é conhecida nacional e internacionalmente pela produção e qualidade dos vinhos, os quais tiveram grande crescimento com a implantação de mecanismos de irrigação (DA SILVA FARIAS *et al.*, 2022). Dessa forma, mesmo se localizando no centro do polígono das secas, a região tornou-se a maior exportadora e produtora de frutas do Brasil e a única região do país a colher duas safras de uvas por ano, o que explica os elevados volumes de água consumidos pela agricultura no local.

A área avermelhada mais ao norte da região Sudeste é onde se encontra o Perímetro de Irrigação do Jaíba, localizado nos municípios de Jaíba e Matias Cardoso, em Minas Gerais. Considerada o maior perímetro irrigado em área contínua da América Latina e o segundo maior do mundo (DE MOURA, 2014), a estrutura é uma iniciativa pública que capta água do rio São Francisco, armazena e distribui aos lotes agrícolas. Segundo informações do Governo do Estado de Minas Gerais publicadas em março de 2023 no Jornal Agência Minas, já estão implementadas as Etapas I e II do

empreendimento, com abrangência de 43,8 mil hectares e produção anual de 1,6 milhão de toneladas, o que torna a região um dos principais polos de fruticultura do Estado, além de contar também com lavouras olerícolas e de feijão, feno e cana-de-açúcar.

Por fim, no Rio Grande do Sul, destacam-se os pontos situados no oeste do Estado, especialmente Uruguaiana, Alegrete e Itaqui, não só na agricultura (Figura 27(a)), mas também na pecuária (Figura 27(b)). Esses municípios, juntamente com Santa Vitória do Palmar (área mais avermelhada localizada no extremo sul do RS), estão entre os cinco maiores produtores de arroz do Brasil (IBGE, 2021a). Em 2017, Uruguaiana liderou o faturamento da produção agrícola no Estado (SEBRAE, 2017). Nesse mesmo ano, segundo dados do Perfil das Cidades Gaúchas, elaborado pelo SEBRAE RS (Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Rio Grande do Sul), Uruguaiana se destacou por se colocar entre as 20 maiores áreas plantadas no Estado, além de apresentar relevância na criação de gado bovino (quarto colocado no RS, com 368.761 cabeças), ovinos (terceiro lugar, com 205.376 cabeças), equinos (segundo colocado, com 23.776 cavalos e éguas), e até bubalinos (em quinto, com 1.798 cabeças). A cidade de Alegrete, de forma semelhante, possui uma economia baseada no cultivo especialmente de arroz e na pecuária bovina, ovina, equina, suína, e até bubalina. Segundo dados do Governo de Santa Vitória do Palmar – RS, o município possui a economia também baseada no plantio de arroz, bem como na pecuária bovina de corte e na pecuária ovina de lã.

Com relação ao consumo de água pela pecuária no Brasil, pode-se observar que toda a Região Centro-Oeste apresenta tons mais alaranjados. O município de Corumbá, mais avermelhado, merece destaque, atingindo até 76.288 m³/dia de água consumida para pecuária. Além do Centro-Oeste e das localidades a sul e oeste do Rio Grande do Sul já citadas anteriormente, merecem destaque algumas áreas localizadas na Região Norte, que vem sofrendo com o constante desmatamento para criação de gado. Inclusive, o município de São Félix do Xingu, mais avermelhado na região, é o município com maior rebanho bovino do país, chegando a 2,5 milhões de cabeças, segundo a Pesquisa da Pecuária Municipal, divulgada pelo IBGE (2021b). Corumbá está em segundo lugar no ranking, com 1,8 milhão de animais.

Para a indústria de transformação (Figura 27(c)), as áreas mais avermelhadas estão principalmente no centro do Brasil, nas regiões de maior densidade populacional e centros urbanos, especialmente no Sudeste, em porções do Centro-Oeste, no Sul do Brasil e porções litorâneas no Nordeste.

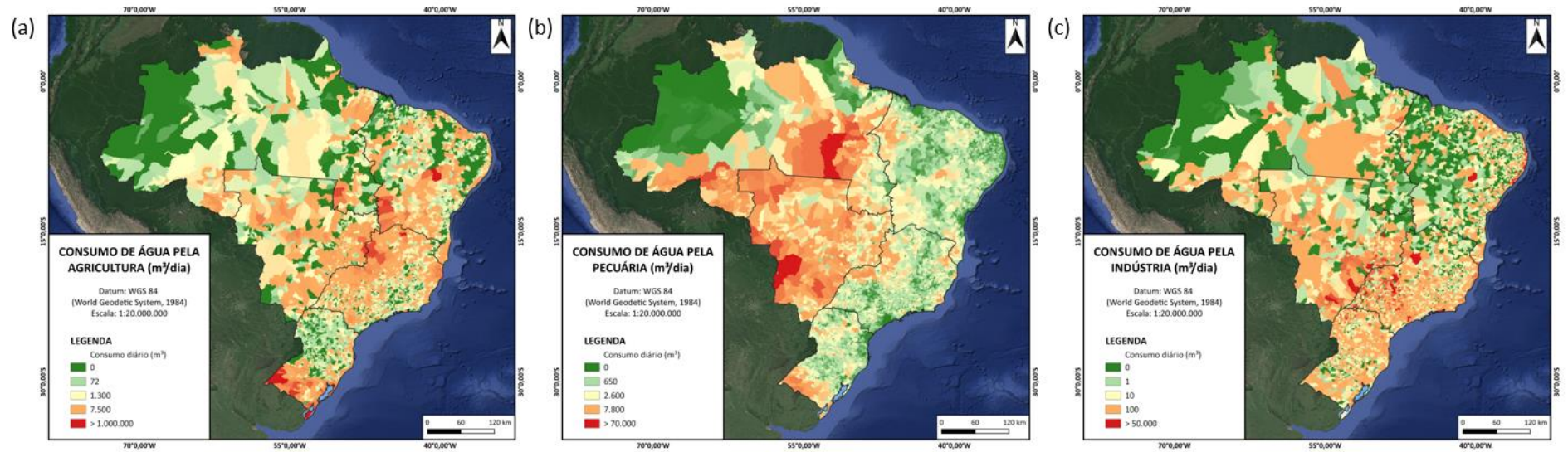


Figura 27. Mapeamento dos indicadores da Dimensão Econômica do ISH: Consumo de água (a) pela Agricultura, (b) pela Pecuária e (c) pela Indústria de Transformação

6.1.1.3. Dimensão ecossistêmica

A partir da Figura 28(a), pode-se observar que o mapeamento da vazão de permanência de 95% apresentou diversas áreas com vazões negativas (em vermelho) e sem dados (em preto) na Bacia Amazônica, muito próximas às áreas com maiores valores para a Q_{95} (em verde escuro). Isso se deve ao fato de que, em função das baixas declividades da planície Amazônica, associadas ao armazenamento de água nas planícies de inundação, a confluência dos rios Negro e Solimões gera um expressivo efeito de remanso hidráulico em todo o trecho mais baixo desses rios (MEADE *et al.*, 1991). Assim, existe uma grande dispersão na relação cota-vazão causada pela variação contínua da declividade da linha d'água ao longo do ano hidrológico (JACCON, 1986). Situação análoga ocorreu na região Centro-Oeste do Brasil, onde se situa o Bioma Pantanal, o qual também apresenta características semelhantes à Bacia Amazônica, com baixas declividades e planícies de inundação, por isso apresentou essas áreas mais avermelhadas (com vazões negativas) e pretas (sem dados disponíveis). Também é possível observar que o extremo sul do Rio Grande do Sul, na região entre a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira, apresenta vazões mais baixas influenciadas pelo remanso hidráulico, com valores chegando a $-116,2 \text{ m}^3/\text{s}$. O próprio canal São Gonçalo, que liga a Lagoa Mirim e a Lagoa dos Patos, possui um regime hidrológico que inverte periodicamente o sentido do fluxo de escoamento (HARTMANN; HARKOT, 1990), o que se dá principalmente em função do relevo predominantemente plano.

Devido a esses valores muito baixos, a escala de valores do mapa ficou muito ampla, dificultando na observação das demais vazões. Além disso, para a normalização do *raster* da dimensão ecossistêmica, foi necessário corrigir essas vazões negativas através da aplicação de algum critério para áreas inundáveis. Dessa forma, foi utilizado um arquivo *raster* com informações de frequência de inundação, elaborado através de modelagem hidrológica utilizando o MGB e disponibilizado na plataforma *Earth Engine*. Esse arquivo foi filtrado para áreas com frequência de inundação superior a 70%, e, nessas regiões (áreas pretas na Figura 28(b)), foi considerada a vazão Q_{95} máxima do arquivo *raster* ($3,45 \text{ mm}/\text{dia}$), resolvendo o problema das áreas com remanso e das áreas frequentemente inundadas, onde se espera grandes quantidades de água e um ISH máximo. Por fim, é importante salientar que o modelo hidrológico utilizado por Ribeiro (2020), o MGB-AS (SIQUEIRA *et al.*, 2018), abrange minibacias com áreas a partir de 10.000 km^2 . Portanto, as bacias menores que essa área, localizadas principalmente na região litorânea, não foram computadas nos cálculos, ficando sem dados.

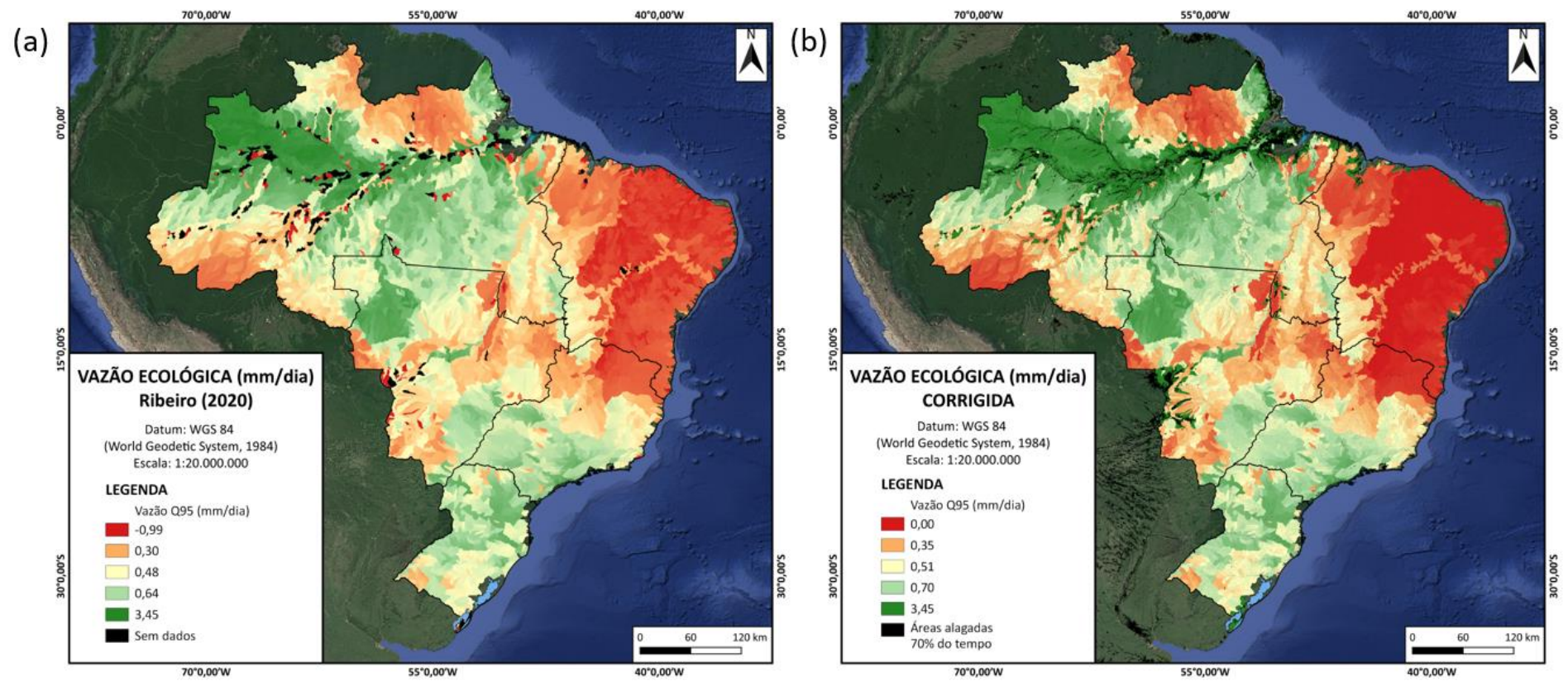


Figura 28. Mapeamento do indicador “Vazão ecológica” (Q_{95}): (a) segundo Ribeiro (2020) e (b) após correção de vazões negativas

6.1.1.4. Dimensão de resiliência

Na dimensão de resiliência, foram mapeados os indicadores de disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, conforme apresentado nas Figura 29(a) e 29(b), respectivamente. A disponibilidade superficial de água foi calculada através da vazão média (Q_m), a qual também apresentou valores negativos de vazão para a área em que se situa o Bioma Pantanal, muito provavelmente pelo efeito de remanso que influencia os processos hidrossedimentológicos na calha do rio, provocando a deposição de sedimentos em suspensão (COLLISCHONN *et al.*, 2005). Além dessa região, o extremo sul do Rio Grande do Sul apresentou valores negativos para a vazão média, nas margens da Lagoa Mangueira, pelos motivos já descritos anteriormente. Essas vazões foram corrigidas conforme supracitado.

Em relação à disponibilidade hídrica subterrânea, que foi calculada a partir da reserva potencial explorável (m^3/s) por extensão da bacia hidrográfica (em km^2), os valores mais baixos se situam na Região Nordeste, a qual se localiza sobre um aquífero fraturado, com mínimo potencial de recarga subterrânea (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001). Por outro lado, os valores mais altos se encontram na Região Norte do Brasil, onde está situado um dos maiores aquíferos porosos do mundo, o SAGA (ou Sistema Aquífero Grande Amazônia), que possui $162.520 km^3$ de água e abrange os Estados do Pará, Amapá e Amazonas. Além disso, porções do Sul do país, onde está situado o Aquífero Guarani, também apresentam considerável vazão explorável.

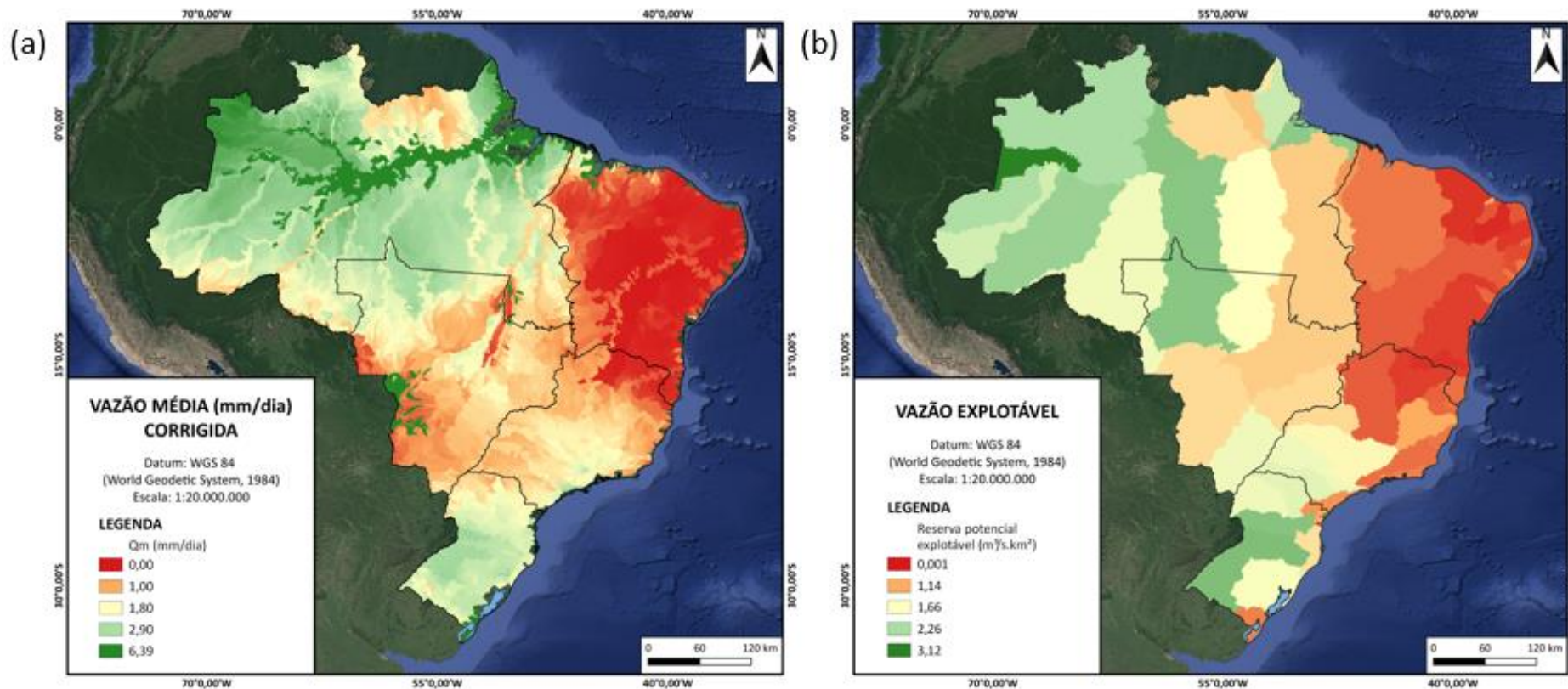


Figura 29. Mapeamento dos indicadores da Dimensão de Resiliência do ISH: (a) Disponibilidade hídrica superficial (Vazão média, em m³/s) e (b) Reserva Potencial Explotável (Vazão explotável, em m³/s.km²)

6.1.2. Mapeamento do Índice de Segurança Hídrica

A Figura 30 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o Índice de Segurança Hídrica para o período atual (2020). Para as escalas de cores de cada dimensão, optou-se pelo método dos quartis ao invés de uma uniformização das escalas, de modo a detalhar e otimizar a visualização dos resultados separadamente. Pode-se observar que a Dimensão Humana apresentou os menores valores na região Sudeste, especialmente em São Paulo, que, apesar de não apresentar o maior consumo *per capita*, é a região mais populosa do Brasil. Já a dimensão econômica apresentou maior consumo de água (e consequentemente menor ISH) no Pampa Gaúcho, no Cerrado Mineiro e na porção Centro-Oeste do país, além de outras porções do Norte onde foi verificada a criação de gado intensiva. Já as dimensões ecossistêmica e de resiliência apresentaram resultados muito semelhantes, com os menores valores de ISH para a Região Nordeste do País. Além disso, vale destacar que a dimensão de resiliência levou em consideração a reserva potencial explotável para mensurar a disponibilidade hídrica subterrânea, e os resultados mostram a Região Nordeste novamente com os menores índices, visto que ela está situada sobre um aquífero fraturado.

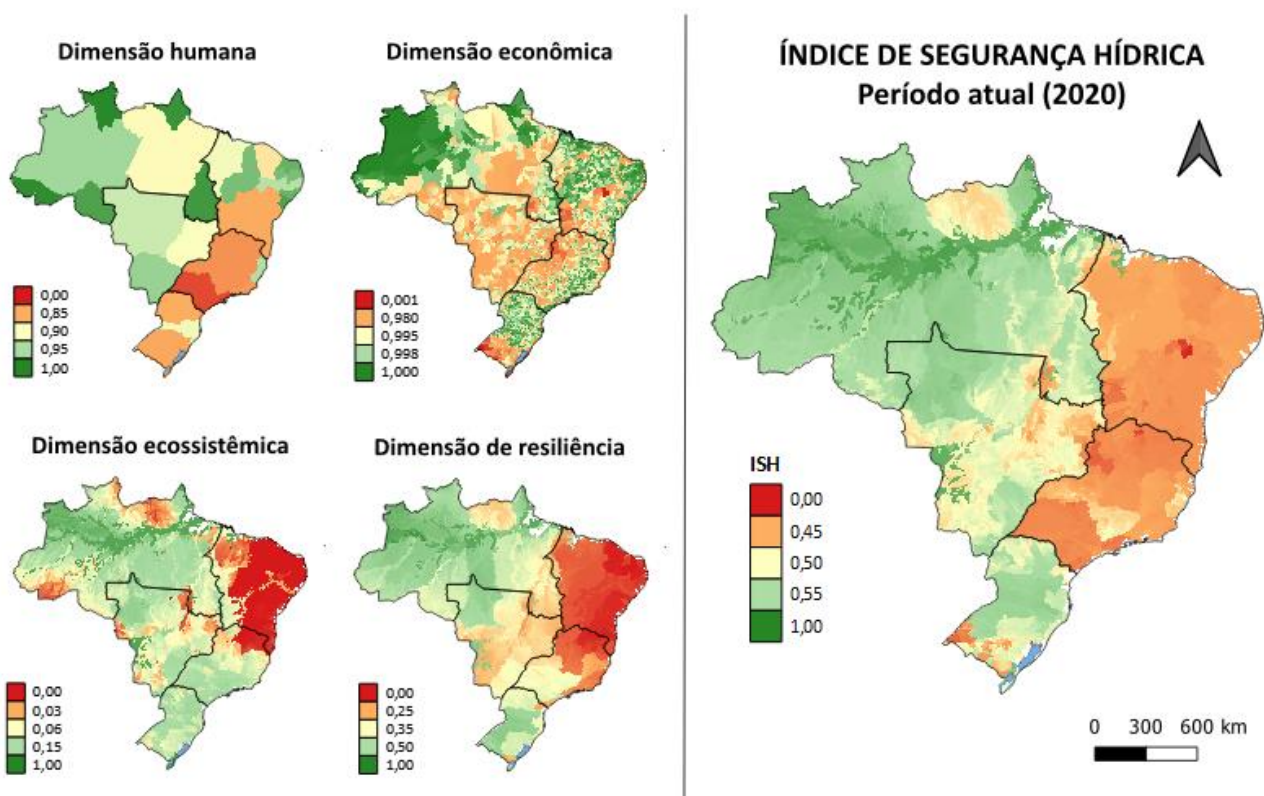


Figura 30. Mapeamento geral do Índice de Segurança Hídrica para o período atual (2020) considerando as quatro dimensões analisadas: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência

Após calcular o ISH a partir de uma média das suas dimensões, o mapeamento final do índice de segurança hídrica apresentou os menores valores (entre 0 e 0,45) nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil, além de porções do Pampa Gaúcho. Já os maiores graus de segurança hídrica (superior a 0,55) foram encontrados na região Norte do país. Já a região Centro-Oeste apresentou valores medianos (próximos a 0,50) para o ISH, mostrando que essa área apresenta uma segurança hídrica intermediária. Comparando esses resultados com aqueles obtidos pela Agência Nacional das Águas para o ISH nacional (ANA, 2019a), conforme apresentado na Figura 31, em ambos os mapeamentos a Região Nordeste está em uma situação crítica de segurança hídrica, mas a região Sudeste não está

nessa mesma situação no ISH calculado pela ANA. Apesar disso, destaca-se que, em 2020, o consumo *per capita* médio de água (considerado no cálculo do balanço hídrico para a dimensão humana no ISH da ANA) foi de 171 L/hab.dia para essa região, enquanto que, em 2022, esse valor baixou para 158 L/hab.dia.

Ainda, os resultados do Índice de Segurança Hídrica Urbano calculado pela ANA (ANA, 2020), que é baseado no mapeamento dos mananciais e dos sistemas de abastecimento de água do Brasil, mostram a região Norte com valores médios para o ISH, o que pode estar relacionado com o baixo acesso das pessoas ao abastecimento de água encanada e aos sistemas de saneamento básico. Porém, segundo dados do Diagnóstico de Água e Esgoto do SNIS (SNIS, 2022), de 2019 para 2021, a população atendida com abastecimento de água no Estado de Amazonas aumentou em 20,8%. Ou seja, possivelmente existe essa diferença nos índices devido à diferença temporal dos dados utilizados. De forma geral, pode-se dizer que os resultados obtidos para o ISH do período atual no presente estudo foram semelhantes àqueles encontrados pela ANA, que utilizou uma metodologia completamente distinta para o cálculo. Então, após a verificação da coerência dos valores obtidos, foi possível avançar para a próxima etapa: o mapeamento do ISH para as projeções futuras de consumo de água e de mudanças climáticas.

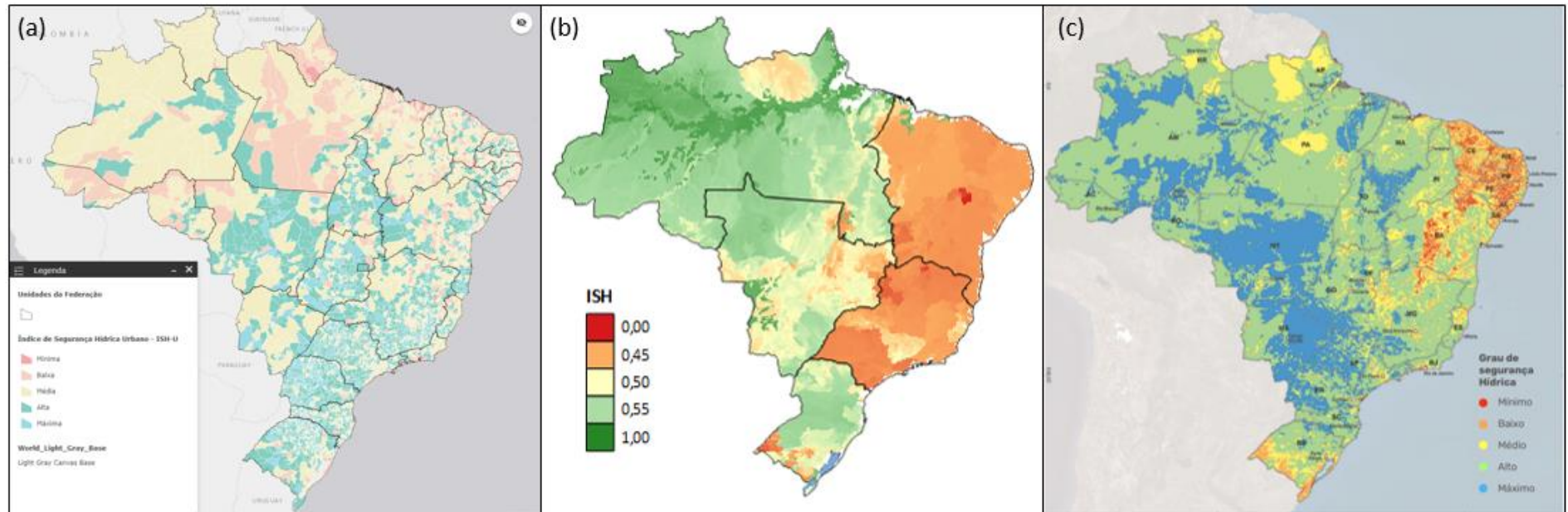


Figura 31. Comparação entre (a) o ISH urbano (ANA, 2020), (b) o Índice de Segurança Hídrica para o período atual (2020) calculado no presente trabalho e (c) aquele estimado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2019a)

6.2. Análise de sensibilidade

Para realizar a análise de sensibilidade do ISH e de suas dimensões frente a alterações de alguns dos seus indicadores, considerou-se projeções de +/- 20% para as vazões (Q_m e Q_{95}) e de +/- 50% para o consumo de água pela indústria. Na tabela de máximos e mínimos utilizados para normalização (APÊNDICE A: INFORMAÇÕES SOBRE PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO ISH), pode-se observar que, quando alterada a demanda hídrica da indústria em +50% e -50%, o consumo total da dimensão econômica quase não se altera (varia +/- 0,00874% em relação ao período atual), o que corrobora com a hipótese inicial de que o setor econômico que mais consome água é a agropecuária, sendo o consumo pela indústria relativamente irrelevante. Esses resultados podem ser observados visualmente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, tanto para a dimensão econômica, que não se altera nesses cenários de mudança no consumo, quanto, conseqüentemente, para o ISH como um todo.

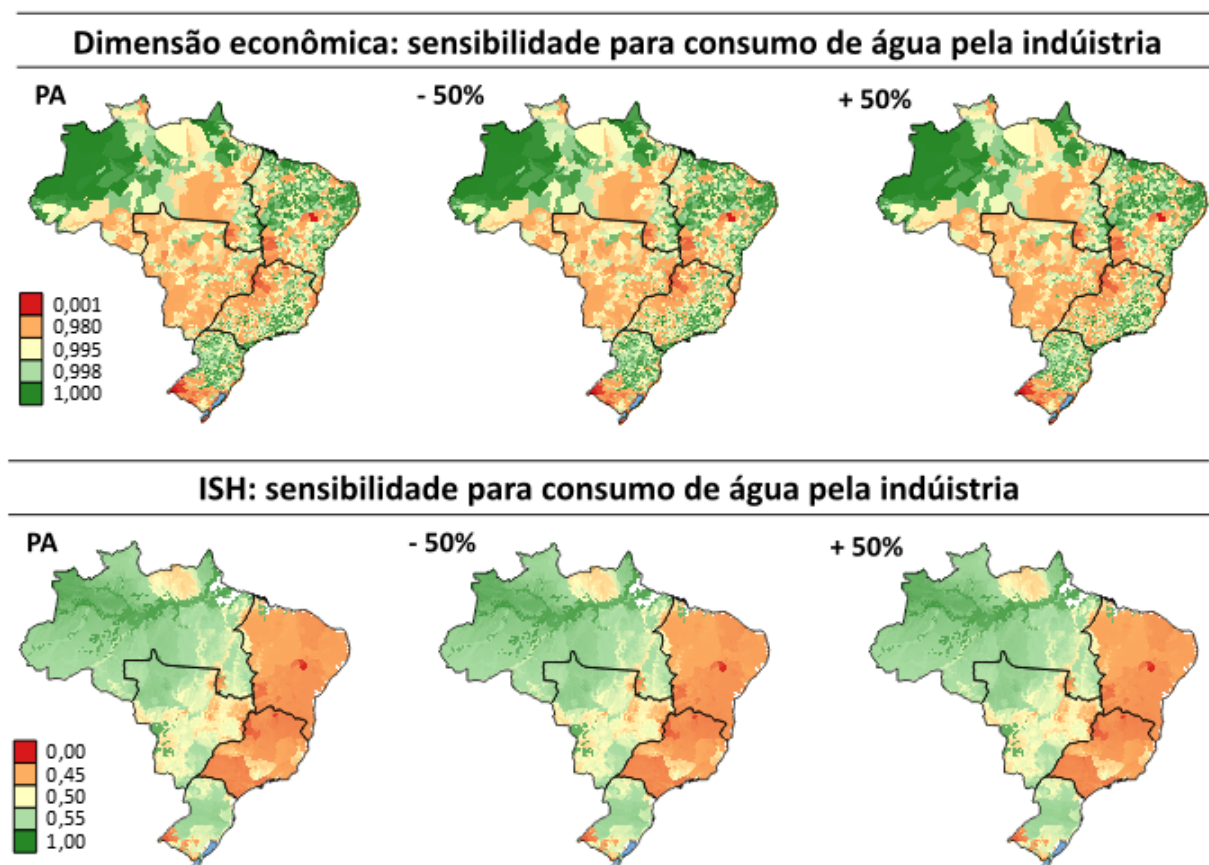


Figura 32. Análise de sensibilidade da dimensão econômica e do ISH frente a alterações no consumo de água pela indústria de transformação

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a análise de sensibilidade das dimensões ecossistêmica e de resiliência, bem como do ISH como um todo, frente a alterações nas vazões Q_m e Q_{95} . É possível observar visualmente que, em ambas as dimensões do ISH, existe uma alteração mais evidente das cores na região central do Brasil, de forma que, no cenário de diminuição das vazões, essa região fica mais alaranjada e, no cenário de aumento das vazões, a área fica mais esverdeada. O mesmo ocorre para a região da Bacia Amazônica. Porém, quando todas as dimensões

de segurança hídrica são unidas, pode-se observar que não existe uma diferença visível no mapeamento do ISH, seja pela escala de cores adotada ou pelo próprio procedimento de cálculo, que envolve uma escala espacial continental, onde o fator diversidade pesa muito mais e acaba mascarando possíveis mudanças na segurança hídrica. Por exemplo, existem diferenças muito evidentes nas vazões das diferentes regiões do Brasil (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001), que vão desde vazões próximas a zero no Semiárido até áreas frequentemente inundadas e com grandes volumes de água na Bacia Amazônica e no Pantanal, a maior planície de inundação do mundo. Ou seja, uma alteração de 20% no escoamento vai, no máximo, deixar as vazões da Caatinga em situação menos crítica e, na Amazônia e Pantanal, em uma situação de ainda mais abundância de água, mas a diferença entre as regiões ainda será grande.

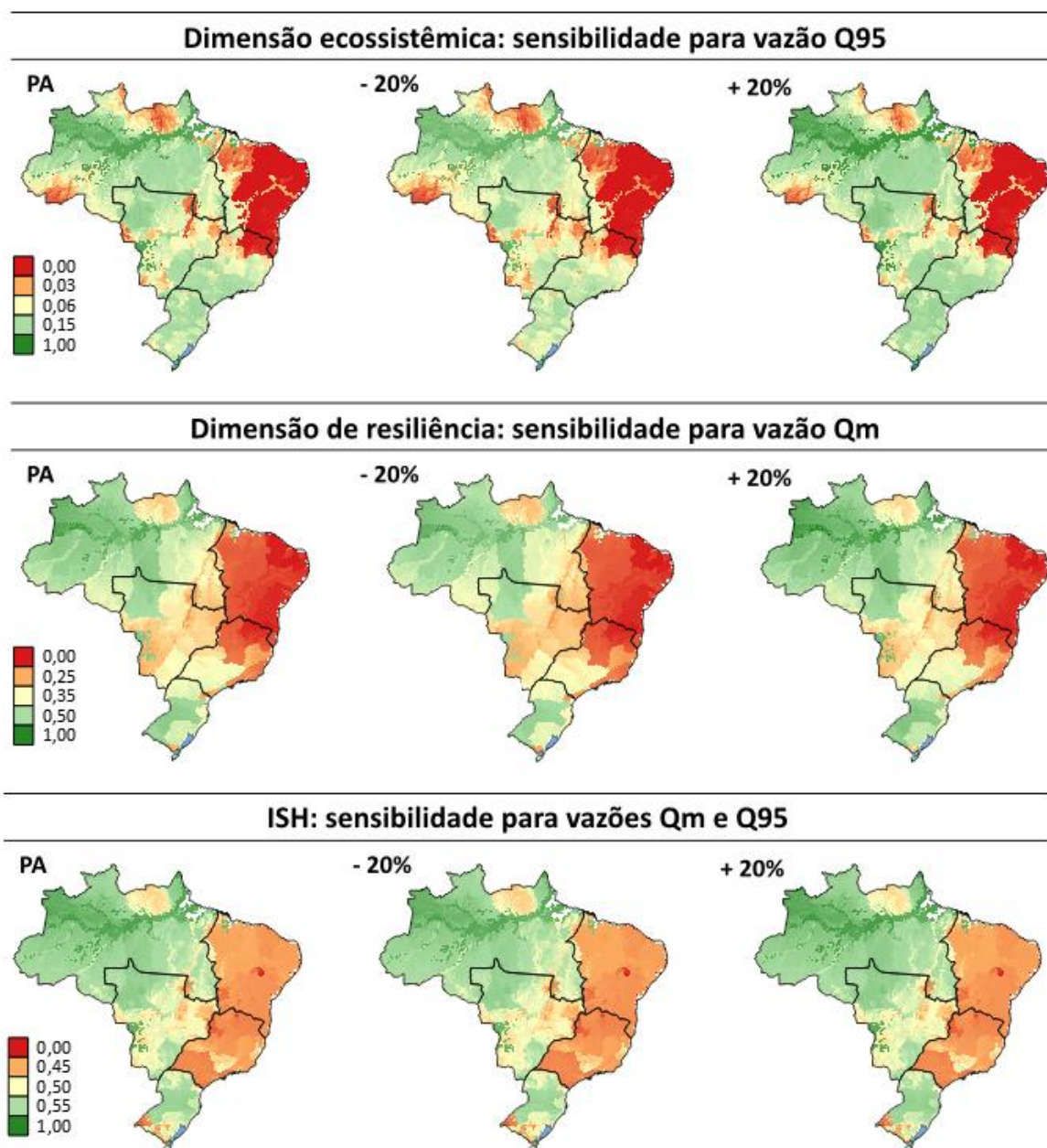


Figura 33. Análise de sensibilidade das dimensões ecossistêmica e de resiliência frente a alterações na Q95 e na Qm, respectivamente, e sensibilidade do ISH frente a essas alterações simultaneamente

6.3. ISH para o período futuro

6.3.1. Mapeamento dos indicadores de cada dimensão

6.3.1.1. Dimensão humana

Para a dimensão humana no período futuro, foram considerados diversos cenários de alteração de consumo *per capita*, que, para ser convertido em volume de água consumido em termos quantitativos, foi multiplicado pela população projetada pelo IBGE. Para entender melhor as tendências das projeções populacionais, foram analisados dois períodos: o crescimento da população desde 2021 até 2040 e até 2060, bem como o crescimento de 2060 em relação a 2040. Analisando o Gráfico 1, que apresenta essas projeções, pode-se observar que, de forma geral, existe uma tendência de aumento da população, especialmente até 2040. Já em 2060, é possível observar um decréscimo da população em relação a 2040, principalmente nas Regiões Sul (PR e RS), Sudeste (MG, RJ e SP) e Nordeste (AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI e RN). Em todos os Estados das regiões Norte e Centro-Oeste, existe um aumento da densidade demográfica de 2040 para 2060. É importante fazer essas análises e verificar que, como as projeções dependem de diversos fatores e são bem variáveis entre os anos e Estados brasileiros, calcular a população projetada até o final de 2100 baseado em cálculos matemáticos implicaria em utilizar dados sem validade científica. Portanto, para fins de aplicação da metodologia de cálculo de ISH proposta, optou-se por considerar a população de 2100 como aquela definida pelo IBGE para o ano de 2060.

A Figura 34 apresenta o mapeamento da dimensão humana nos diferentes cenários de consumo *per capita* considerados. É possível observar que, na região Norte e Centro-Oeste, por exemplo, independentemente de o cenário de alteração de consumo ser positivo ou negativo, a segurança hídrica diminui considerando a dimensão humana, visto que a população dessas áreas deve crescer bastante, chegando a um aumento de 69,5% (AP) no futuro distante. Já nas Regiões Sul, Sudeste e Nordeste, a população decresce em 2060 com relação a 2040 em quase todos os Estados (exceto SC, ES e SE). De forma geral, é possível observar que os padrões de cores são muito semelhantes, em que o Estado de São Paulo, por exemplo, apresenta o tom mais avermelhado em todos os mapas, com exceção do mapeamento do cenário ideal, em que se considera que todos os Estados brasileiros irão atingir o consumo de 110 L/hab.dia, conforme proposto pela ONU.

Nesse cenário, São Paulo apresenta cores mais alaranjadas, o que pode ser explicado pelo Gráfico 2, em que são apresentadas as anomalias no volume de água consumido em cada Estado para se atingir o consumo *per capita* desejado. Nesse gráfico, é possível observar que, tanto o Estado de São Paulo, quanto os demais Estados do Sudeste, do Sul e do Centro-Oeste, considerando as projeções de crescimento populacional, deverão diminuir o volume total de água consumido. Já nas regiões Norte e Nordeste, o volume de água total consumido pode aumentar ou diminuir dependendo do Estado. Os Estados nordestinos que apresentam aumento do volume consumido são aqueles que possuem consumo *per capita* atual abaixo de 110 L/hab.dia atualmente: AL, PB, PE, RN e SE. Com relação ao Norte do país, apesar de nenhum Estado apresentar consumo *per capita* abaixo do sugerido pela ONU, todos eles apresentam projeções de aumento da população muito elevados, o que explica o aumento do volume total de água consumido no futuro, em quase todos os Estados. A única exceção é o Estado do Amapá, que apresenta maior projeção de aumento populacional

(69,5%) juntamente com o maior consumo *per capita* médio de água atualmente (190 L/hab.dia), fazendo com que o volume de água consumido diminua para atingir 110 L/hab.dia.

Gráfico 1. Anomalias da população projetada para o futuro próximo (2040) e futuro distante (2060) em relação ao período atual (2021), segundo dados de projeção populacional calculados pelo IBGE

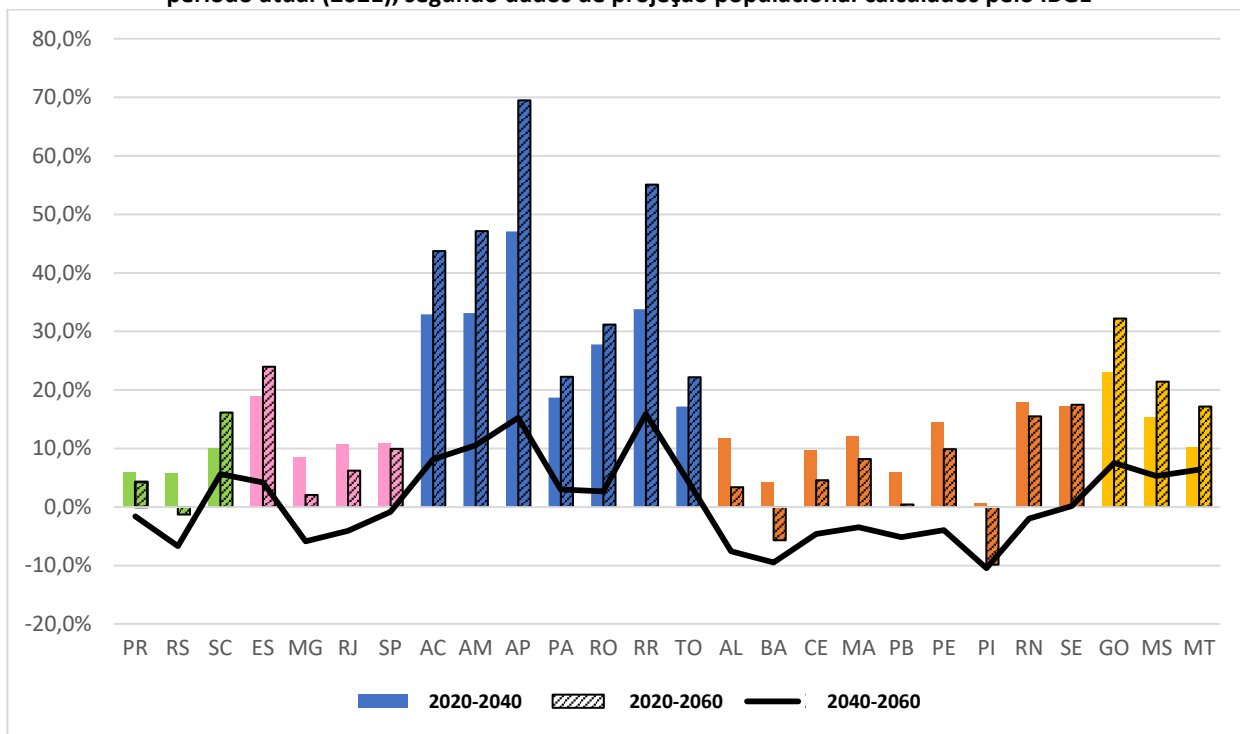
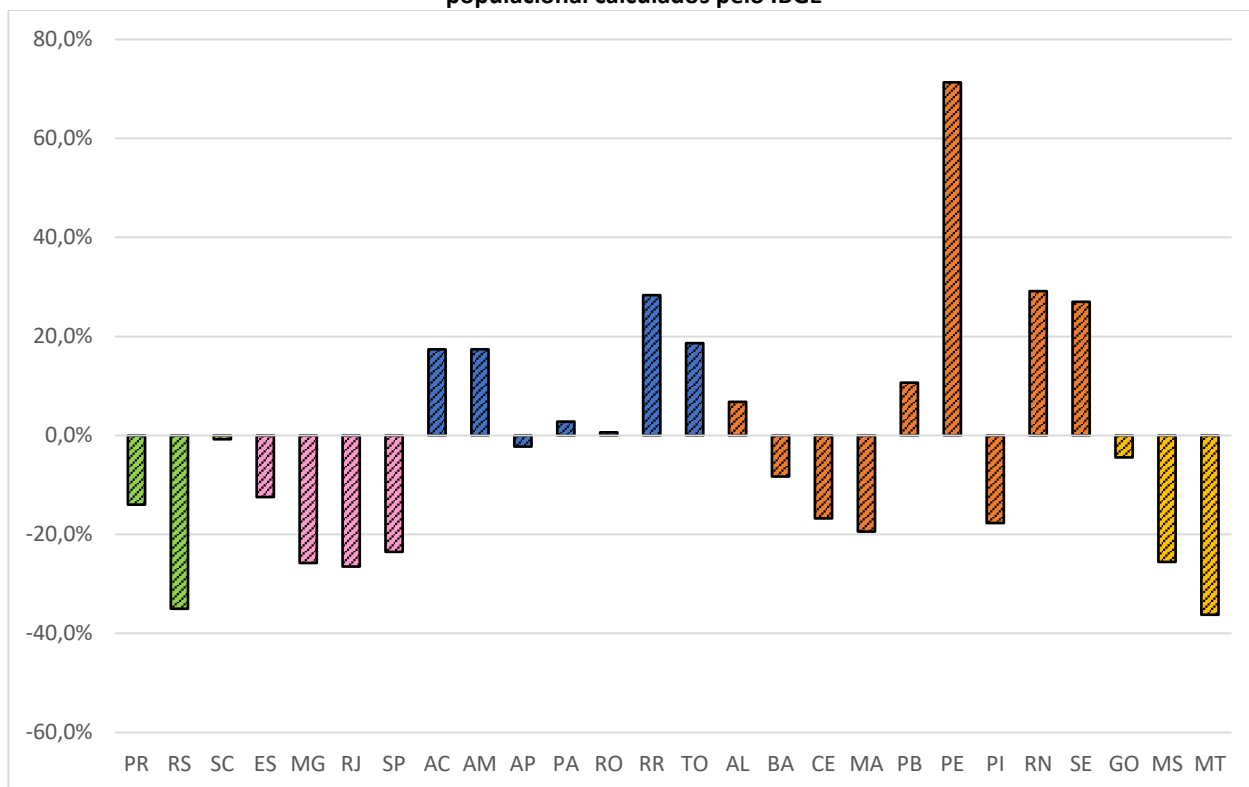
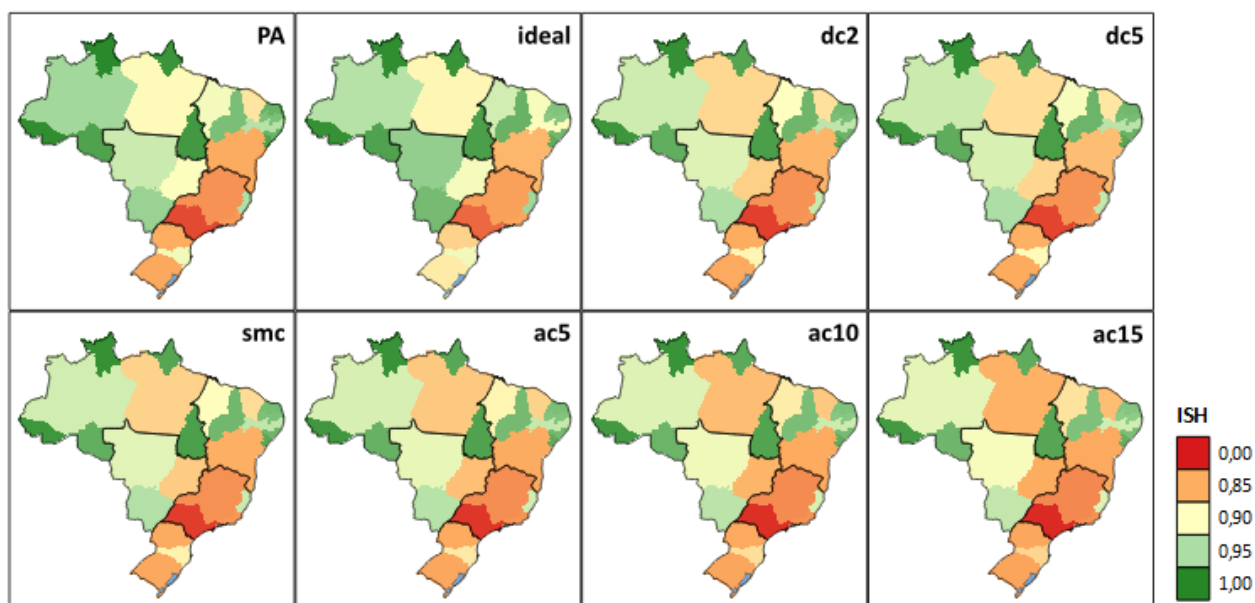


Gráfico 2. Anomalias no volume total de água consumido pela população para atingir o consumo *per capita* ideal (110 L/hab.dia) em 2060, em relação ao volume consumido no período atual (2021), segundo dados de projeção populacional calculados pelo IBGE





Legenda: PA = Período Atual; ideal = consumo per capita ideal (110 L/hab.dia); dc2 = diminuição do consumo *per capita* em 2%; dc5 = diminuição do consumo *per capita* em 5%; smc = sem mudança no consumo *per capita*; ac5 = aumento do consumo *per capita* em 5%; ac10 = aumento do consumo *per capita* em 10%; ac15 = aumento do consumo *per capita* em 15%;

Figura 34. Mapeamento da dimensão humana do ISH considerando diferentes cenários de consumo *per capita* de água

6.3.1.2. Dimensão econômica

Para o mapeamento da dimensão econômica no futuro, foram consideradas, para o cálculo da variação da demanda hídrica pelo setor agropecuário (consumo pela agricultura e pela pecuária), as anomalias na evapotranspiração (ET), as quais são apresentadas na Figura 35. Pode-se observar que, tanto no RCP 4.5 quanto no RCP 8.5, os aumentos na ET concentram-se na Bacia Amazônica, enquanto as reduções são mais intensas na região Nordeste. Além disso, é possível observar que essas alterações ocorrem de forma mais intensa no RCP 8.5. Ainda, pode-se concluir, por exemplo, que o consumo de água pela agropecuária no Sul do país deverá permanecer praticamente o mesmo no futuro, visto que as alterações na ET são próximas de zero, especialmente no cenário RCP 4.5.

Na Região Centro-Oeste, em que existe uma predominância do uso das terras para cultivo e criação de animais, deve ocorrer uma pequena diminuição da evapotranspiração, especialmente no cenário RCP 8.5. Para a Região Norte, espera-se um aumento da ET, o que culminaria com um aumento no consumo de água para agricultura e pecuária, especialmente na região em que se encontra o maior rebanho de gado do Brasil, em São Félix do Xingu (vide tópico 6.1.1.2). Dessa forma, se os demais indicadores e dimensões apontarem para uma menor disponibilidade hídrica nessa região, em que já foi verificado que é provável haver um crescimento populacional (e conseqüente aumento do volume de água consumido pela população), possivelmente a segurança hídrica será menor no futuro em relação ao período atual para essa área.

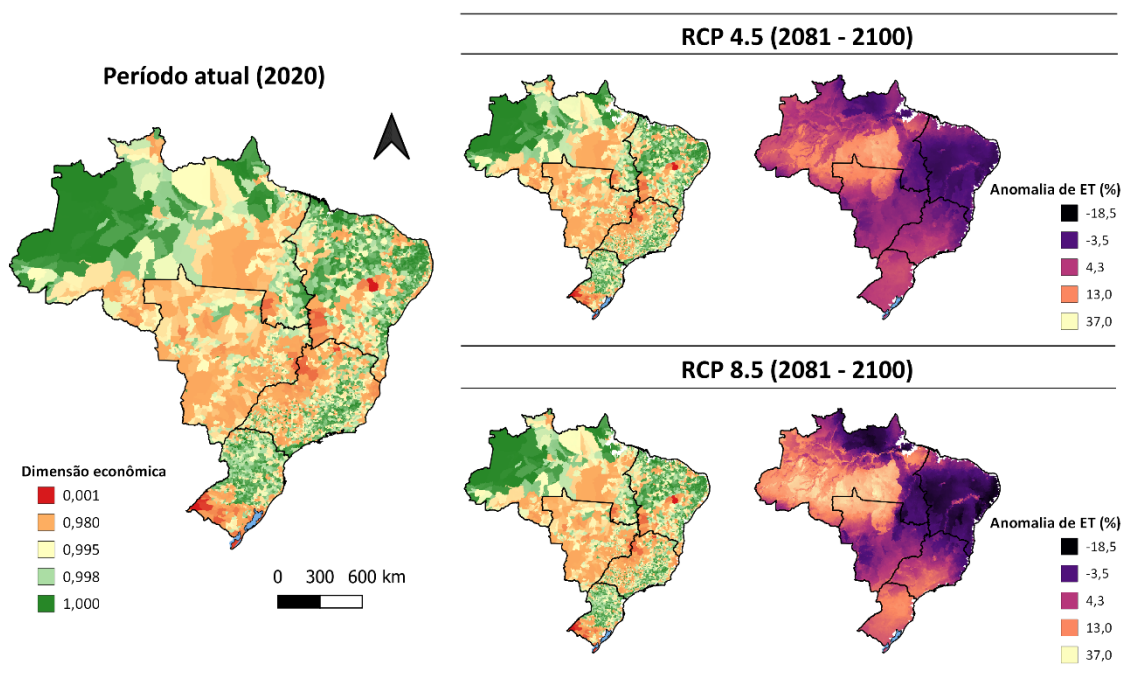


Figura 35. Mapeamento da dimensão ecossistêmica no período atual e futuro (RCP 4.5 e RCP 8.5), com a anomalia da evapotranspiração (em %) no futuro em relação ao período atual para ambos os cenários de emissão de GEE

6.3.1.3. Dimensão ecossistêmica

Observando a vazão com 95% de permanência no tempo (Q_{95}), a qual foi utilizada para mensurar a segurança hídrica da dimensão ecossistêmica, percebe-se que existe uma tendência de diminuição dos valores dessas vazões no futuro, considerando a mediana dos 25 modelos climáticos do CMIP5 utilizados no presente estudo. Essa diminuição é percebida principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, e se acentua no cenário RCP 8.5. Vale destacar novamente que foram utilizadas as anomalias de vazão média para sensibilizar a Q_{95} devido à falta de dados de vazão mínima projetados para o mesmo período considerado no presente estudo, e não necessariamente as anomalias de vazão mínima seguem os mesmos padrões que aqueles encontrados para a vazão média. Chagas, Chaffe e Blöschl (2022), por exemplo, quando analisaram as tendências de vazões máximas e mínimas no Brasil para o período de 1980 a 2015, verificaram que existe uma tendência de aumento das vazões mínimas, tanto para a região Sul quanto para a região Norte.

Os dados de Brêda *et al.* (2020) para as vazões médias projetadas concordam quanto às anomalias positivas no Sul, porém discordam quanto às anomalias na região Norte. Outros trabalhos também corroboram com os aumentos das vazões no Sul do Brasil, como o de Arias *et al.* (2021), que verificou que os MCGs do CMIP6 concordam que haverá um significativo aumento no escoamento (anomalias positivas chegando entre 20% e 40%) no futuro distante (2081 a 2100). Esse mesmo trabalho apresenta que os modelos do CMIP6 não concordam quanto ao sinal da anomalia na região Nordeste, o que pode ser observado quando se analisa o trabalho de Souza, Amorim e Reis (2022a), o qual, apesar de corroborar com o aumento das vazões no Sul, apresenta em seus resultados um padrão regional de vazões decrescentes predominando na região Nordeste do Brasil. Do *et al.* (2020), por outro lado, encontraram evidências de aumento das vazões máximas em partes do Sul e Sudeste do Brasil, e outras regiões com evidências de reduções nas vazões máximas, incluindo o Nordeste e Centro-Oeste brasileiro e partes do Sudeste do Brasil.

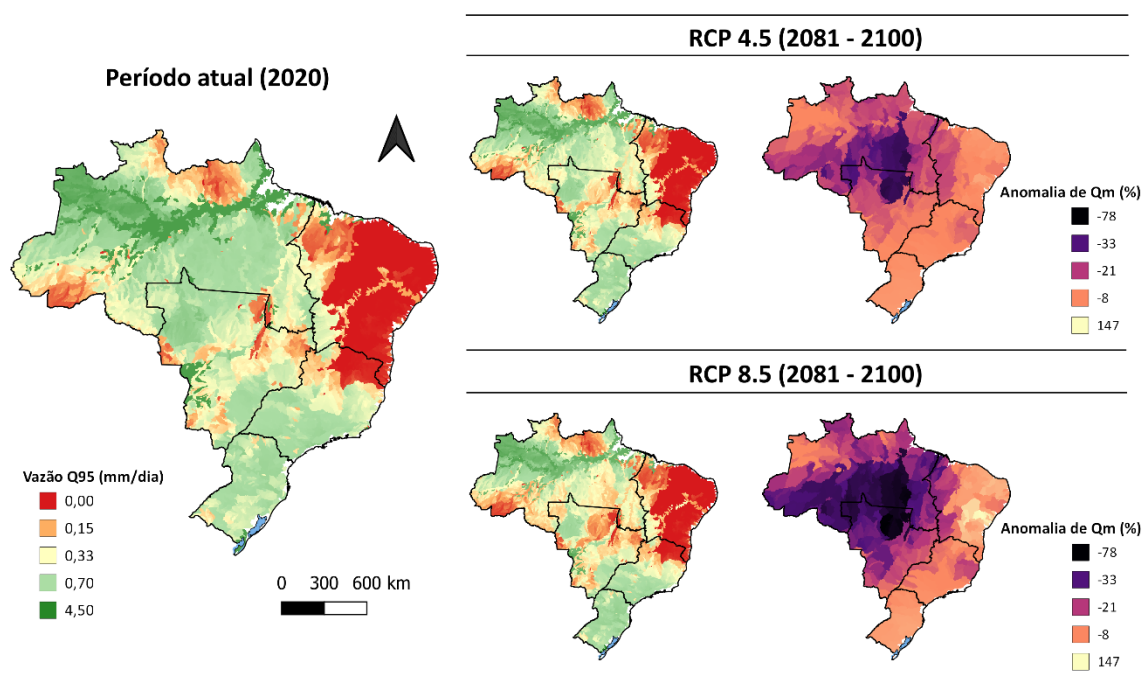


Figura 36. Vazão Q₉₅ atual e futura projetadas pelos MCG do CMIP5 (BRÊDA *et al.*, 2020), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5

6.3.1.4. Dimensão de resiliência

Para a dimensão de resiliência, foram aplicadas as mesmas variações na vazão média resultantes do trabalho de Brêda *et al.* (2020) que aquelas utilizadas na dimensão ecossistêmica. Dessa forma, pode-se observar na Figura 37 que, tanto no RCP 4.5 quanto no RCP 8.5 (de forma mais intensa), a região Norte tende a ficar menos esverdeada, e o Centro-Oeste, mais alaranjado. Conforme discutido anteriormente, esses resultados corroboram com as alterações de vazão média observadas em outros trabalhos (e.g., ARIAS *et al.*, 2021), especialmente no que diz respeito ao aumento das vazões no Sul do país (SOUZA; AMORIM; REIS, 2022a; DO *et al.*, 2020). É possível verificar que, em algumas porções do Sudeste, as vazões devem diminuir, o que corrobora com os resultados de Freitas (2020).

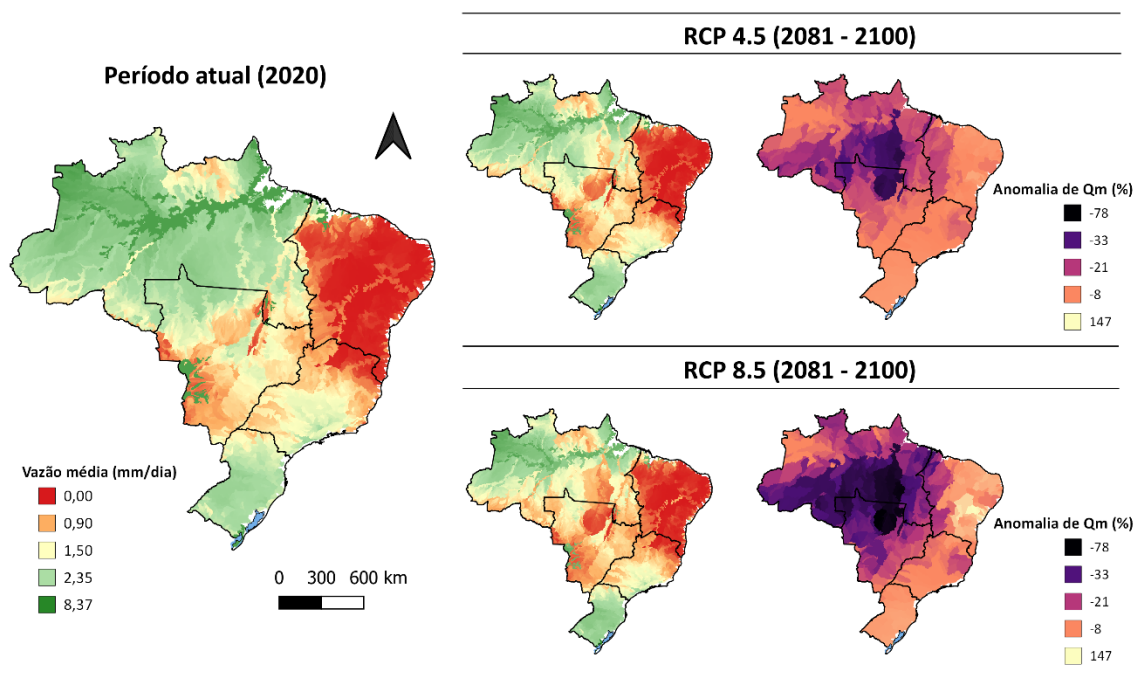


Figura 37. Vazão média atual e futura projetadas pelos MCG do CMIP5 (BRÊDA *et al.*, 2020), para os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5

6.3.2. Mapeamento do Índice de Segurança Hídrica

Na Figura 38, é possível observar os resultados obtidos para o Índice de Segurança Hídrica no futuro (2081 – 2100) considerando alguns cenários de alteração de consumo de água e as mudanças climáticas projetadas pelos MCG do CMIP5 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. O mapeamento dos indicadores e dimensões do período futuro é apresentado no APÊNDICE B: ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO A partir da análise da figura, é possível observar o ISH para o período atual, bem como a anomalia percentual do ISH futuro (2081-2100) em relação ao período atual para os cenários de alteração de consumo de água, em ambos os cenários de emissão de GEE (RCP 4.5 e RCP 8.5). Pode-se observar que o ISH futuro para a região Norte apresenta tons mais alaranjados em todos cenários apresentados, indicando uma anomalia negativa da segurança hídrica. Situação semelhante ocorre para a região Centro-Oeste, que apresenta majoritariamente *pixels* com anomalias negativas para o ISH futuro em todos os cenários. Em ambas as regiões, é esperado um aumento da população, aumentando o volume de água consumido até em cenários de diminuição de 5% do consumo, se comparado com o volume de água consumido atualmente. Além disso, as projeções futuras do clima apontam para um aumento da evapotranspiração nessas áreas, aumentando a demanda hídrica para o setor econômico e, dessa forma, contribuindo para uma menor segurança hídrica. Para a região Sudeste, o cenário de consumo ideal, em ambos os cenários de mudanças climáticas, é o único que poderá ocasionar um aumento na segurança hídrica, provavelmente por ser o único cenário em que o volume de água consumido pela população diminui consideravelmente em relação ao período atual. Pode-se concluir, portanto, que para essa região, uma diminuição de 5% no consumo per capita de água não seria o suficiente para aumentar a segurança hídrica, sendo que, no cenário de consumo ideal, essa redução chega a 26,5% para o Estado do Rio de Janeiro, por exemplo.

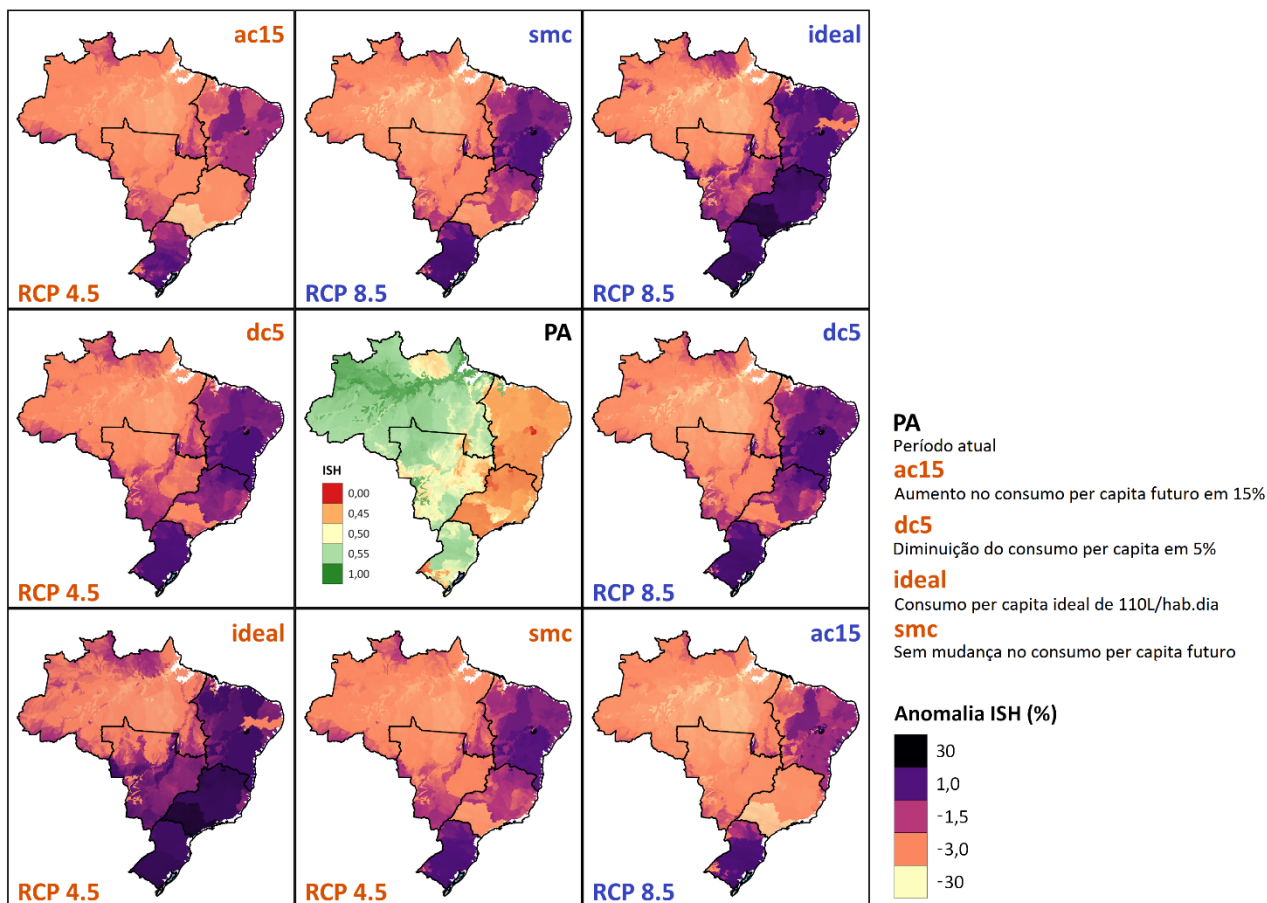


Figura 38. Mapeamento das anomalias do Índice de Segurança Hídrica no futuro em relação ao período atual para cada região brasileira, considerando diferentes cenários de consumo *per capita* de água no RCP 4.5 e RCP 8.5

Quando analisados os valores de ISH para a região Sul, fica evidente a influência do aumento das vazões projetadas no futuro, especialmente no RCP 8.5: os cenários de consumo de água considerando maiores níveis de GEE no futuro apresentam ISH maior do que aqueles que consideram o cenário intermediário de clima. Isso pode ter relação com a intensificação do ciclo hidrológico no Sul do Brasil (SOUZA; AMORIM; REIS, 2022a; DO *et al.*, 2020). Além disso, é interessante destacar que o único cenário de consumo em que haverá diminuição da segurança hídrica é o de aumento de 15% do consumo per capita no cenário RCP 4.5. Ou seja, em um cenário de altas emissões de GEE (RCP 8.5), espera-se que o aumento das vazões compense um aumento de até 15% no volume de água consumido pela população, provocando um aumento na segurança hídrica em relação ao período atual. Na região Nordeste, embora sejam projetados aumentos na vazão média e reduções na evapotranspiração, os quais contribuem para um aumento da segurança hídrica, somente no cenário de diminuição de 5% do consumo de água é que o ISH futuro poderia aumentar em relação ao período atual. Isso pode estar relacionado com as projeções de aumento da população futura para a maior parte dos Estados nordestinos, aumentando o volume de água consumido.

6.3.2.1. Estatísticas por região

Além do mapeamento do ISH para todo o Brasil, foi realizada uma análise por região (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste), de forma a avaliar se as mudanças na segurança hídrica se sobrepõem em determinada região em detrimento de outra. As tabelas com as estatísticas de cada região são apresentadas no APÊNDICE C: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O

PERÍODO FUTURO POR REGIÃO DO BRASIL, enquanto que o gráfico com a mediana, o máximo e o mínimo de cada cenário é apresentado no APÊNDICE D: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR MACRORREGIÃO BRASILEIRA.

Considerando a mediana dos pixels do *raster* do ISH para o Brasil como um todo (última coluna de pontos), nenhum cenário de consumo *per capita*, tampouco o cenário ideal, ocasionará um aumento na segurança hídrica no futuro, seja no RCP 4.5 ou no RCP 8.5. Porém, analisando esses cenários de consumo e de emissão de GEE (RCP 4.5 e RCP 8.5) por região, pode-se observar que situação semelhante, em que o ISH máximo é aquele do período atual, só ocorre para as regiões Centro-Oeste e Norte. Em ambas as regiões, conforme supracitado, é esperado um aumento da população, aumentando o volume de água consumido até em cenários de diminuição de 5% do consumo, se comparado com o volume de água consumido atualmente. Além disso, as projeções futuras do clima apontam para um aumento da evapotranspiração nessas áreas, aumentando a demanda hídrica para o setor econômico e, dessa forma, contribuindo para uma menor segurança hídrica. Para a região Sudeste, o cenário de consumo ideal, em ambos os cenários de mudanças climáticas, é o único que poderá ocasionar um aumento na segurança hídrica, provavelmente por ser o único cenário em que o volume de água consumido pela população diminui consideravelmente em relação ao período atual (vide Gráfico 2). Pode-se concluir, portanto, que para essa região, uma diminuição de 5% no consumo *per capita* de água não seria o suficiente para aumentar a segurança hídrica, sendo que, no cenário de consumo ideal, essa redução chega a 26,5% para o Estado do Rio de Janeiro, por exemplo.

Quando analisados os valores de ISH para a região Sul, fica evidente a influência do aumento das vazões projetadas no futuro, especialmente no RCP 8.5: os cenários de consumo de água considerando maiores níveis de GEE no futuro apresentam ISH maior do que aqueles que consideram o cenário intermediário de clima. Isso pode ter relação com a intensificação do ciclo hidrológico no Sul do Brasil (SOUZA; AMORIM; REIS, 2022a; DO *et al.*, 2020). Além disso, é interessante destacar que o único cenário de consumo em que haverá diminuição da segurança hídrica é o de aumento de 15% do consumo *per capita* no cenário RCP 4.5. Ou seja, em um cenário de altas emissões de GEE (RCP 8.5), espera-se que o aumento das vazões compense um aumento de até 15% no volume de água consumido pela população, provocando um aumento na segurança hídrica em relação ao período atual. Na região Nordeste, embora sejam projetados aumentos na vazão média e reduções na evapotranspiração, os quais contribuem para um aumento da segurança hídrica, somente no cenário de diminuição de 5% do consumo de água é que o ISH futuro poderia aumentar em relação ao período atual. Isso pode estar relacionado com as projeções de aumento da população futura para a maior parte dos Estados nordestinos, aumentando o volume de água consumido. Além disso, é interessante observar que, no cenário de consumo *per capita* ideal, os Estados que consomem menos de 110 L/hab.dia atualmente (AL, PB, PE, RN e SE) aumentariam seu volume de água consumido em até 73% em relação ao consumo atual, fazendo com que o ISH nesse cenário ideal seja inferior ao ISH atual.

Outra observação que pode ser feita, após analisar com detalhe cada região, é que o Nordeste é a região menos sensível às mudanças nos indicadores do ISH (vide gráfico no APÊNDICE D: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR MACRORREGIÃO BRASILEIRA). Isso pode ter relação com o fato de os cenários de consumo de água e de mudanças climáticas se compensarem, não causando uma alteração significativa no ISH quando combinados no cálculo. Porém, vale destacar que até mesmo

na análise de sensibilidade (apresentada no tópico 6.3), em que apenas um indicador é alterado e os demais são fixados (no período atual), essa região não apresentou mudanças visíveis na segurança hídrica. O simples fato de estar localizada no Semiárido brasileiro, em um aquífero fraturado, com várias características de clima e vegetação de locais secos, contrasta muito com a realidade da Bacia Amazônica e do Pantanal, com abundância de água o ano inteiro. E esses contrastes podem estar contribuindo para uma menor sensibilidade do Nordeste no cálculo do ISH. Por fim, destaca-se que os valores máximos de todos os cenários de consumo do Brasil se encontram na região Norte, ao passo que os valores mínimos de todos os cenários se encontram no Nordeste.

6.3.2.2. Estatísticas por bioma

De forma análoga ao que foi realizado no tópico anterior (6.3.2.1), foi analisado de forma minuciosa as mudanças na mediana do ISH por bioma brasileiro. Na Figura 39, é apresentado o mapeamento do ISH com as demarcações dos biomas, a fim de se analisar as alterações ocasionadas entre o período atual e os períodos futuros, em diferentes cenários de consumo de água e de emissão de GEE. As tabelas com as estatísticas de cada região são apresentadas no APÊNDICE E: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO POR BIOMA BRASILEIRO, e o gráfico com a mediana, o máximo e o mínimo de cada cenário, utilizado para realizar as discussões desse tópico, é apresentado no

MEDIANA							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,592961	0,385483	0,482804	0,505016	0,506361902	0,462838501	0,529809
id 45	0,572378	0,390752	0,482981	0,531541	0,505340397	0,475681454	0,516613
smc 45	0,567692	0,388261	0,469237	0,512465	0,494694144	0,461684242	0,509429
dc2 45	0,568162	0,389198	0,470367	0,513581	0,495241195	0,462186813	0,510125
dc5 45	0,568931	0,390594	0,471676	0,515256	0,495979667	0,463428617	0,511059
ac5 45	0,566362	0,385873	0,467092	0,509673	0,493488073	0,457867891	0,50797
ac10 45	0,565068	0,383494	0,465625	0,506882	0,492544919	0,454115346	0,506448
ac15 45	0,563987	0,381106	0,463594	0,50409	0,491592169	0,451200634	0,504775
id 85	0,557624	0,391597	0,478678	0,538	0,499272525	0,474113613	0,507944
smc 85	0,552933	0,388709	0,465334	0,518923	0,488216937	0,459231436	0,499258
dc2 85	0,553392	0,38961	0,466265	0,52004	0,488763988	0,459918559	0,499828
dc5 85	0,55414	0,390996	0,467704	0,521715	0,489523232	0,460944057	0,500588
ac5 85	0,551795	0,386331	0,463354	0,516131	0,486948937	0,457309216	0,497807
ac10 85	0,550855	0,383955	0,461316	0,51334	0,485708088	0,453670472	0,496513
ac15 85	0,549492	0,381571	0,459505	0,510548	0,484524548	0,450369895	0,495248
MÁXIMO							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,890951	0,768657	0,805469	0,727908	0,802396476	0,709459603	0,890951
id 45	0,871368	0,747435	0,764897	0,814428	0,780884564	0,737851143	0,871368
smc 45	0,86642	0,74649	0,757606	0,795352	0,768419504	0,732688427	0,86642
dc2 45	0,866909	0,746707	0,757983	0,796468	0,768966556	0,733397126	0,866909
dc5 45	0,867644	0,747032	0,758548	0,798143	0,769787192	0,734460175	0,867644
ac5 45	0,865196	0,745948	0,756664	0,79256	0,767051816	0,73091656	0,865196
ac10 45	0,863972	0,745405	0,755722	0,789768	0,765684128	0,729144812	0,863972
ac15 45	0,862748	0,744863	0,75478	0,786977	0,76431644	0,727373004	0,862748
id 85	0,878039	0,754107	0,75353	0,851121	0,757410944	0,776293814	0,878039
smc 85	0,873091	0,753161	0,752585	0,832045	0,744945824	0,771131098	0,873091
dc2 85	0,87358	0,753378	0,752802	0,833161	0,745492876	0,771839797	0,87358
dc5 85	0,874314	0,753704	0,753127	0,834836	0,746313512	0,772902846	0,874314
ac5 85	0,871867	0,752619	0,752043	0,829253	0,743578136	0,769359291	0,871867
ac10 85	0,870643	0,752077	0,7515	0,826461	0,742210448	0,767587483	0,870643

ac15 85	0,869419	0,751535	0,750958	0,82367	0,74084276	0,765815735	0,869419
MÍNIMO							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,420047	0,043481	0,117494	0,206721	0,462656379	0,278081328	0,043481
id 45	0,422954	0,0413	0,147797	0,219364	0,470787942	0,331255466	0,0413
smc 45	0,416094	0,039971	0,121154	0,200288	0,458322853	0,25692901	0,039971
dc2 45	0,416757	0,040927	0,123108	0,201404	0,458869904	0,26181367	0,040927
dc5 45	0,417752	0,042359	0,126039	0,203079	0,459690541	0,269140661	0,042359
ac5 45	0,414331	0,037584	0,116269	0,197496	0,456955135	0,24471733	0,037584
ac10 45	0,41227	0,035196	0,111384	0,194704	0,455587447	0,232505694	0,035196
ac15 45	0,410209	0,032808	0,106499	0,191913	0,454219729	0,220294014	0,032808
id 85	0,419242	0,030662	0,153696	0,214797	0,469646603	0,331149548	0,030662
smc 85	0,41268	0,029334	0,127054	0,19572	0,457933754	0,256823033	0,029334
dc2 85	0,413505	0,030289	0,129008	0,196837	0,458480835	0,261707693	0,030289
dc5 85	0,414742	0,031722	0,131939	0,198511	0,459301472	0,269034714	0,031722
ac5 85	0,410619	0,026946	0,122169	0,192928	0,456566066	0,244611397	0,026946
ac10 85	0,408558	0,024558	0,117284	0,190137	0,455198377	0,232399717	0,024558
ac15 85	0,406497	0,02217	0,112399	0,187345	0,453830659	0,220188081	0,02217

APÊNDICE F: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR BIOMA BRASILEIRO.

Analisando a mediana dos pixels do ISH, para Pantanal e Amazônia não existe nenhum cenário de consumo de água e de clima em que a segurança hídrica poderá aumentar, ou seja, no futuro os valores de ISH tendem a ser inferiores ao período atual. Esses biomas estão situados nas regiões Centro-Oeste e Norte, respectivamente, que são áreas onde são projetados impactos negativos do clima sobre a segurança hídrica, além de serem regiões com projeção de aumento da população, conforme já descrito anteriormente. No bioma Mata Atlântica, poderá haver um aumento da segurança hídrica futura (em relação ao período atual) no cenário ideal de consumo, tanto no RCP 4.5 quanto no RCP 8.5. Além disso, uma redução de consumo de 5% no RCP 4.5 aumenta ligeiramente a segurança hídrica para valores superiores ao período atual. Para a Caatinga, os únicos cenários que podem diminuir o ISH no futuro são os de aumento de consumo de 10% e 15%, seja no RCP 4.5 ou no RCP 8.5. Os demais cenários, inclusive aqueles de aumento de 5% de consumo *per capita*, tendem a aumentar a segurança hídrica. Isso pode ter relação com as projeções positivas das vazões na região Nordeste pelos modelos climáticos globais, contribuindo para uma maior segurança hídrica, especialmente no cenário RCP 8.5, em que esse aumento do escoamento chega a 147% (vide Figura 36 e Figura 37).

No Pampa Gaúcho, é interessante observar que, no cenário de permanência do mesmo consumo *per capita*, que consegue isolar o efeito das mudanças climáticas sobre o ISH no futuro, os valores de ISH se apresentam superiores ao período atual, tanto no RCP 4.5 quanto no RCP 8.5. Inclusive, apenas o cenário de aumento de 15% do consumo *per capita* no RCP 8.5 poderá diminuir o ISH, o que demonstra a influência do aumento das vazões no sul do país sobre a segurança hídrica na região. Ainda, ressalta-se que esse bioma, juntamente com a Mata Atlântica, apresenta valores máximos de ISH maiores que o valor máximo do período atual em todos os cenários de consumo e de clima. Analisando os mínimos de ISH encontrados para cada cenário de consumo, é possível observar que os maiores valores em todos os cenários se encontram na região do Pantanal, o que está diretamente relacionado com o fato de ser uma área de planície de inundação. Com perfil semelhante de área úmida, a Amazônia apresenta valores mínimos que superam aqueles encontrados nos demais biomas. Além disso, é importante destacar que os valores máximos de ISH do Brasil encontram-se todos na Amazônia, ao passo que os valores mínimos do ISH estão situados na Caatinga.

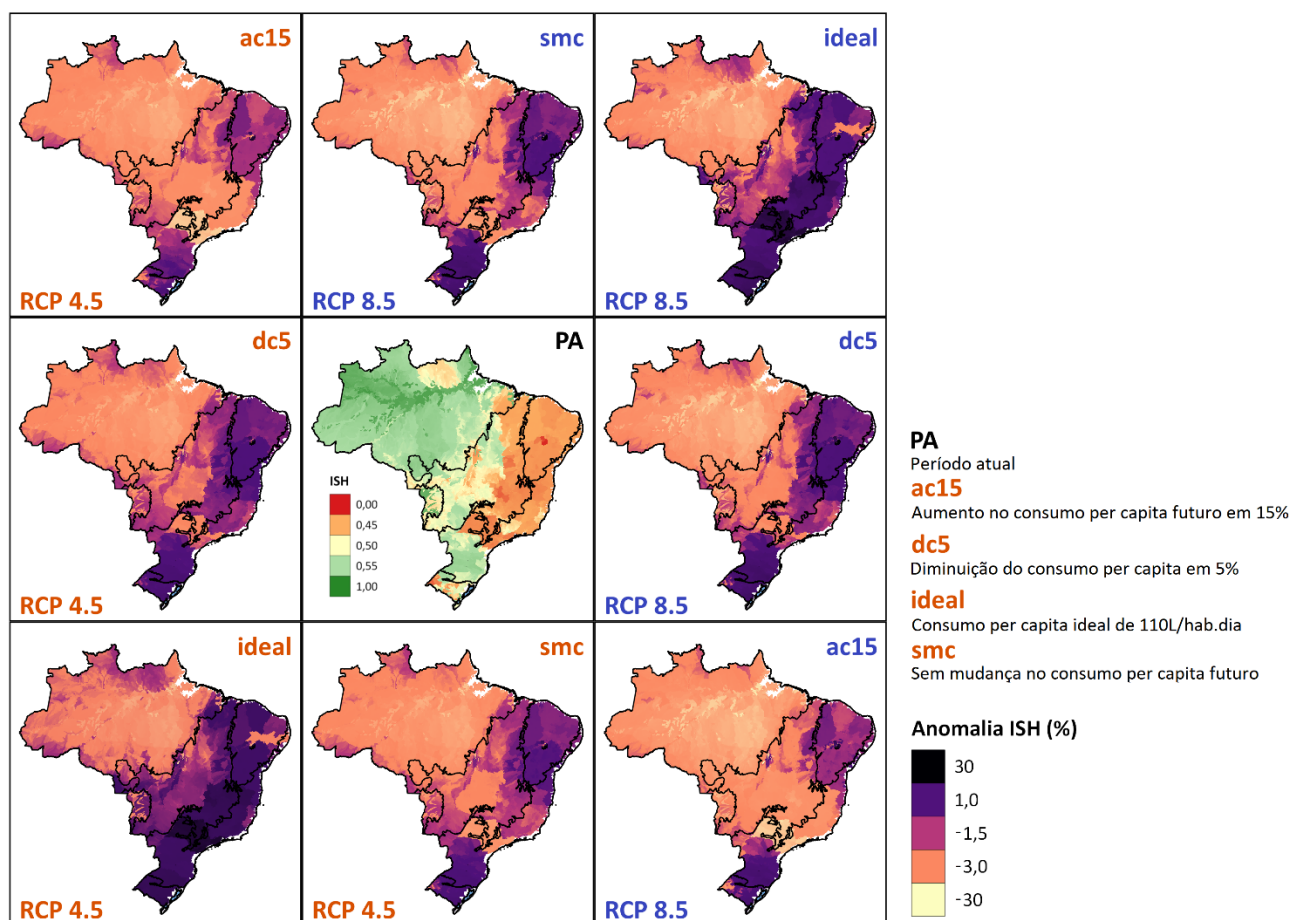


Figura 39. Mapeamento das anomalias do Índice de Segurança Hídrica no futuro em relação ao período atual para cada bioma brasileiro, considerando diferentes cenários de consumo *per capita* de água no RCP 4.5 e RCP 8.5

Todos os biomas sofrem com problemas ambientais que degradam as águas, tanto qualitativa quanto quantitativamente. Regiões marcadas pela exploração do garimpo, como é o caso principalmente dos Biomas Amazônia, Caatinga e Pantanal, apresentam dificuldades relacionadas à contaminação das águas por mercúrio metálico. Além disso, tem-se os locais com ampliação da monocultura de soja, especialmente no Cerrado e na Amazônia Oriental, em que é perceptível a degradação dos cursos d’água devido à percolação e lixiviação de agrotóxicos. O mesmo problema é percebido na rizicultura praticada no Sul do país, especialmente no oeste do Rio Grande do Sul. A Mata Atlântica presente em Salvador apresenta diversos problemas relacionados à qualidade das águas devido não só à exploração do petróleo (que pode gerar acidentes e desastres ambientais, com transporte de substâncias tóxicas), mas também pela metalurgia de chumbo na região. Em todo país, são observados os impactos na saúde humana ocasionado pelo lançamento irregular de efluentes, bem como os passivos socioambientais oriundos da construção de hidroelétricas.

Apesar de todas essas questões ambientais relacionadas à segurança hídrica, a que mais preocupa, sem dúvidas, é a chamada “seca verde” do Semiárido Nordeste, que impacta especialmente as áreas úmidas destinadas à agricultura de subsistência. Existem diversos projetos de irrigação no Rio São Francisco, designados especialmente para produção de frutas para exportação, e a própria transposição do São Francisco teve como objetivo aumentar a disponibilidade de água. Entretanto, ao invés do investimento em obras de captação e represamento, que impactam direta e/ou indiretamente os ecossistemas associados, deve-se pensar em medidas para conviver com a

seca, característica do Bioma Caatinga. A solução está em manejar os recursos hídricos da melhor forma possível, através da criação de tecnologias específicas para os agricultores que sofrem com os períodos de secas e escassez hídrica (IBGE, 2016). Somado a isso, a implantação de cisternas para armazenamento de água pode ser uma medida muito interessante para retenção de água para momentos mais críticos.

7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito do presente estudo foi aplicar uma metodologia de cálculo do Índice de Segurança Hídrica baseado em procedimentos de geoprocessamento, tanto para o período atual quanto para o período futuro, no qual foram consideradas as projeções de mudanças climáticas no RCP 4.5 e RCP 8.5 e diferentes cenários de alteração do consumo *per capita* de água. Para isso, foram consideradas as quatro dimensões do ISH propostas pela ONU: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência. Por se tratar de uma metodologia simplificada, foram observadas as seguintes limitações metodológicas no ISH proposto: a definição da mesma produção agrícola e pecuária no futuro, ou seja, foi considerado que a área cultivada e a quantidade de gado criado permanecem os mesmos futuramente; a ponderação de todas as dimensões com o mesmo peso em todo o país, o que desconsidera a variabilidade dos componentes do ISH em diferentes regiões; a utilização da alteração da vazão média futura de Brêda *et al.* (2020) para sensibilizar tanto a disponibilidade hídrica superficial dada pela Q_m quanto a vazão ecológica dada pela Q_{95} . Além disso, ressalta-se que os cenários de diminuição do consumo per capita de água em 2% e 5%, bem como o cenário de consumo ideal, são cenários menos prováveis frente aos cenários de emissão de GEE do CMIP5, os quais consideram não apenas fatores climáticos, mas também socioeconômicos, ou seja, tanto o RCP 4.5 (moderado) quanto o RCP 8.5 (severo) provavelmente não levam em conta que a população tenha ações de preservação ambiental tão efetivas.

Analisando os resultados obtidos para o período atual, pode-se dizer que o mapeamento do ISH obtido pela metodologia aplicada no presente estudo é muito semelhante ao mapeamento realizado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2019), sendo que os resultados são coerentes e relacionados ao contexto socioeconômico, cultural e ambiental de cada região do país. Porém, utilizando a metodologia de geoprocessamento para modificar alguns indicadores, foi possível perceber que, em escala nacional, o ISH não é sensível a essas mudanças. Ou seja, a diversidade dos fatores de segurança hídrica é tão abundante e ampla no Brasil que, quando projetadas alterações na vazão, com aumento na região Nordeste (que apresenta as mínimas vazões do Brasil) e redução no Norte (onde são observadas as vazões máximas), as diferenças desse indicador ainda são muito grandes entre Semiárido e Amazônia, não sendo visível uma mudança no mapeamento da segurança hídrica. O único cenário em que essas diferenças se equilibram e realmente existe uma mudança visível no mapeamento do ISH é aquele em que todos os Estados brasileiros atingem o consumo *per capita* ideal de 110 L/hab.dia proposto pela ONU. E isso se deve ao fato de que, nesse cenário, os volumes de água consumidos são equilibrados, com diminuição de consumo na região Sudeste e aumento nas regiões Norte e Nordeste, por exemplo, alterando os volumes de água consumidos e,

consequentemente, causando mudanças regionais, que são percebidas a nível nacional no mapeamento.

Como principais resultados, temos que os biomas Pampa e Mata Atlântica apresentaram um maior ISH sob todos os cenários futuros avaliados, enquanto as demais regiões mostraram uma piora do índice. Também é possível observar a influência do clima no ISH: o bioma Pantanal, que é a maior planície de inundação do mundo, apresentou os maiores valores mínimos de segurança hídrica, que são muito superiores aos valores encontrados nos outros biomas (com exceção da Amazônia, que também apresenta características de clima úmido). Além disso, observou-se que a região Nordeste é a que se apresentou menos sensível às mudanças simultâneas de consumo de água e projeções de clima, o que pode ter relação com o fato de esses indicadores estarem se “anulando” no cálculo do ISH final. Mas também pode ser um reflexo do elevado contraste da realidade das diferentes regiões do Brasil, nos mais variados aspectos relacionados à segurança hídrica, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de água (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Vale destacar que, apesar de os resultados obtidos utilizando-se projeções climáticas do CMIP5 (BRÊDA *et al.*, 2020) estarem de acordo com outros trabalhos realizados (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022; ARIAS *et al.*, 2021; SOUZA; AMORIM; REIS, 2022a; BARTIKO, 2020; DO *et al.*, 2020), os MCG ainda são muito incipientes para representar eventos de precipitação, especialmente eventos extremos de chuva (MEDEIROS; OLIVEIRA; AVILA-DIAZ, 2022), sendo que os desafios para quantificar as mudanças no ciclo global da água ainda são grandes (HEGERL *et al.*, 2015). Para uma gestão adequada dos recursos hídricos e uma melhor adaptação às mudanças futuras, é necessário quantificar as mudanças em larga escala e a longo prazo de forma confiável (STOTT *et al.*, 2010). Dada a continentalidade do Brasil nos mais diversos aspectos que tangem a segurança hídrica, a aplicação de uma metodologia de geoprocessamento para o cálculo do ISH implica em uma baixa sensibilidade a mudanças em seus indicadores.

Dessa forma, o presente trabalho contribuiu para as discussões acerca da temática de segurança hídrica e de métodos aplicáveis que transcendem a quantificação física da disponibilidade de água para consumo humano. Sugere-se, para trabalhos futuros, que métodos de geoprocessamento semelhantes sejam aplicados em escalas espaciais menores e com indicadores de segurança hídrica que sejam relevantes a nível local, a fim de se testar se o índice é sensível a mudanças em locais que apresentam características socioeconômicas, ambientais e políticas mais homogêneas. Além disso, seria interessante a adoção de uma análise probabilística para discutir os futuros caminhos para os quais o ISH pode seguir em diferentes cenários de consumo de água e de emissão de GEE. Ter conhecimento a respeito dos locais que mais necessitam de atenção para não sofrerem com problemas de indisponibilidade hídrica permite aos órgãos responsáveis agir frente a tais questões. Entendendo-se a direção das projeções, é possível minimizar possíveis impactos (REYER *et al.*, 2017).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOELNGA, Hassan Tolba *et al.* Urban water security: definition and assessment framework. **Resources**, v. 8, n. 4, p. 178, 2019.

AGHAKOUCHAK, Amir *et al.* Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. **Reviews of Geophysics**, Vol. 59, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALVES, Luna Gripp Simões. Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: Impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da Bacia Amazônica. **Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 76 f. 2018.

ANA – Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos de 2014**. Brasília: ANA, 2015.

_____. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA, GGES, 2016. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/MudancasClimaticaseRecursosHidricos.pdf> >

_____. **Índice de Segurança Hídrica - ISH.Manual Metodológico**, versão 1.0. Brasília: ANA, 2019a.

_____. **Manual de usos consuntivos de água**. Brasília: ANA, 2019b.

ALBERTO, Cleber Maus *et al.* Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S. l.], v. 41, n. 7, p. 1067–1075, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2006000700001>

ANDREAE, Meinrat O. *et al.* Smoking Rain Clouds over the Amazon. **Science**, [S. l.], v. 303, n. 5662, p. 1337–1342, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1092779>

ARAGÃO, Luiz E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>

ARAÚJO, A. R. Solos da Bacia do Alto Rio Grande (MG): Base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. **Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2006.

ARIAS, Paola *et al.* Technical Summary - Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144, 2021.

ARRAUT, Josefina Moraes *et al.* Aerial rivers and lakes: Looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 543–556, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>

ASSAD, Eduardo Delgado *et al.* Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 39, n. 11, p. 1057–1064, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004001100001>

ASSAD, Maria Leonor Lopes *et al.* Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

AZIZ, Rizwan *et al.* Nonstationarity impacts on frequency analysis of yearly and seasonal extreme temperature in Turkey. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104875, 2020.

BABEL, Mukand S. *et al.* Measuring water security: A vital step for climate change adaptation. **Environmental Research**, v. 185, p. 109400, 2020.

BAKKER, Karen. Water security: research challenges and opportunities. **Science**, v. 337, n. 6097, p. 914-915, 2012.

BARBADO, Norma; LEAL, Antonio Cezar. Cooperação global sobre mudanças climáticas e a implementação do ODS 6 no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e29110313290-e29110313290, 2021.

BARCELLOS, Christovam *et al.* Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 285–304, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5123/s1679-49742009000300011>

BARNETT, Tim P.; ADAM, Jennifer C.; LETTENMAIER, Dennis P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. **Nature**, v. 438, n. 7066, p. 303-309, 2005.

BARTIKO, Daniel. Cheias no Brasil: sazonalidade, tendências e análise de frequência. **Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2020.

BECK, Hylke E. *et al.* Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6201-6217, 2017.

BERGENGREN, Jon C. *et al.* Modeling global climate-vegetation interactions in a doubled CO₂ world. **Climatic Change**, [S. l.], v. 50, n. 1–2, p. 31–75, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010609620103>

BERGENGREN, Jon C.; WALISER, Duane E.; YUNG, Yuk L. Ecological sensitivity: A biospheric view of climate change. **Climatic Change**, [S. l.], v. 107, n. 3, p. 433–457, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0065-1>

BETTS, R. A. *et al.* Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways. **Biogeosciences**, v. 12, n. 5, p. 1317–1338, 2015.

BONFILS, Céline JW *et al.* Human influence on joint changes in temperature, rainfall and continental aridity. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 8, p. 726–731, 2020.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997.

_____. **Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, 2000.

BRAVO, Juan Martín *et al.* Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. **Climatic Change**, [S. l.], v. 127, n. 1, p. 27–41, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0816-2>

BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, [S. l.], v. 159, n. 4, p. 503–522, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

_____. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. **Journal of Hydrology**, v. 619, p. 129284, 2023.

BROSS, L. *et al.* Public health without water? Emergency water supply and minimum supply standards of hospitals in high-income countries using the example of Germany and Austria. **Water Policy**, v. 23, n. 2, p. 205–221, 2021.

BRUNNER, Lukas *et al.* Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. **Earth System Dynamics**, v. 11, n. 4, p. 995–1012, 2020.

BURGESS, W. G. *et al.* Vulnerability of deep groundwater in the Bengal Aquifer System to contamination by arsenic. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 2, p. 83–87, 2010.

BYERS, Edward *et al.* Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 5, p. 055012, 2018.

CARETTA *et al.* Chapter 4 - Water. **In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 551–712, 2022.

CEDEPLAR; FIOCRUZ. Mudanças Climáticas, Migrações e Saúde: Cenários para o Nordeste Brasileiro, 2000-2050. **Relatório de Pesquisa (Research Report)**, Belo Horizonte, 2008.

CERON, Wilmar L. *et al.* Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981–2018). **Atmospheric Research**, v. 249, p. 105299, 2021.

CHAGAS, Vinícius BP; CHAFFE, Pedro LB; BLÖSCHL, Günter. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5136, 2022.

CHANAPATHI, Tirupathi; THATIKONDA, Shashidhar; RAGHAVAN, Srinivasan. Analysis of rainfall extremes and water yield of Krishna river basin under future climate scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, p. 287-306, 2018.

CHIARANDA R. Usos da terra e avaliação da capacidade potencial de armazenamento de água da bacia do Rio Cuiabá – MT. **Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

COLLISCHONN, Bruno *et al.* Estimativa preliminar do comprimento de remanso no rio Paraguai a montante de Amolar. **Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**, v. 1, 2005.

COOK, Christina; BAKKER, Karen. Water security: Debating an emerging paradigm. **Global environmental change**, v. 22, n. 1, p. 94-102, 2012.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasil, 2005.

CORREA, Wesley de Souza Campos *et al.* Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, v. 43, p. e774-e774, 2022.

CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. SGB-CPRM, 2006.

CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, v. 14, n. 4, p. 601, 2022.

CUNHA, Ana Paula MA *et al.* Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

DA SILVA FARIAS, Cassiana Santos *et al.* A conurbação urbana nas cidades de Juazeiro e Petrolina: historicidade e trabalho formal. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e275111234437-e275111234437, 2022.

DE ALBURQUERQUE, Paulo Emílio Pereira; DURÃES, Frederico Ozanan Machado. *Uso e Manejo de Irrigação*. 1ª ed. Brasília – DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2008.

DE MOURA, Auricharme Cardoso. Modernização agrícola como discurso político a serviço do capital: o caso do projeto Jaíba-MG. **Tempos Históricos**, v. 18, n. 2, p. 217-233, 2014.

DEBORTOLI, Nathan S. *et al.* An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural hazards**, v. 86, p. 557-582, 2017.

DO, Hong Xuan *et al.* Historical and future changes in global flood magnitude evidence from a model–observation investigation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1543-1564, 2020.

DO, Hong X.; WESTRA, Seth; LEONARD, Michael. A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. *Journal of hydrology*, v. 552, p. 28-43, 2017.

DONAT, Markus G. *et al.* More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 508-513, 2016.

DWD – Deutscher Wetterdienst. Zeitreihen und Trends. Disponível em: < <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html> >. Acesso em 24 de fevereiro de 2023.

ECKHOUT, Joris PC *et al.* Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 11, p. 5935-5946, 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 5ª Ed., Brasília, DF. 2018.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EYRING, Veronika *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FAO – *Food and Agriculture Organization*. In: World Food Summit Plan of Action. **World Food Summit**. Rome, Italy. November 13–17. 1996.

FARINOSI, Fabio *et al.* An innovative approach to the assessment of hydro-political risk: A spatially explicit, data driven indicator of hydro-political issues. **Global Environmental Change**, v. 52, p. 286-313, 2018.

FERREIRA, Francisco Edson Paulo; LOPES, José Ricardo Ferreira; NERY, Aparecida Rodrigues. Análise espacial das tendências climáticas e sua influência na agricultura irrigada no Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 602-625, 2021.

FISCHER, Erich M. *et al.* Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 1–6, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2006GL029068>

FLATO, Gregory M. Earth system models: An overview. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 783–800, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.148>

FLEISCHMANN, Ayan S. *et al.* Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 3, p. 034024, 2023.

FREITAS, Gabriela Nicoleti. São Paulo drought: trends in streamflow and their relationship to climate and human-induced change in Cantareira watershed, Southeast Brazil. **Hydrology Research**, v. 51, n. 4, p. 750-767, 2020.

GAIN, Animesh K.; GIUPPONI, Carlo; WADA, Yoshihide. Measuring global water security towards sustainable development goals. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, p. 124015, 2016.

GALVÃO, D.M.O. Subsídios à Determinação de Vazões Ambientais em Cursos d'água não regulados: O Caso do Ribeirão Pipiripau (DF/GO) 250f. **Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)** - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GERLAK, Andrea K. *et al.* Water security: A review of place-based research. **Environmental Science & Policy**, v. 82, p. 79-89, 2018.

GETTELMAN, A.; ROOD, R. B. Demystifying Climate Models: A Users Guide to Earth System Models. **Springer Nature**, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8>

GIOVINAZZI, Sonia *et al.* Criticality of infrastructures for organisations. **International Journal of Critical Infrastructures**, v. 12, n. 4, p. 331-363, 2016.

GÓMEZ, G.; PADRÓN, J.; MEULENERT, A. Influencia del evento meteorológico El Niño-Oscilacion Sur sobre epifitotias del tizón tardío de la papa y el moho azul del tabaco en Cuba. **Fitosanidad**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 21-26, 1999.

GOSLING, Simon N.; ARNELL, Nigel W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, n. 3, p. 371-385, 2016.

GOVERNO DE SANTA VITÓRIA DO PALMAR. Cidade – Economia. Disponível em: < <https://www.santavitoriadopalmar.rs.gov.br/municipio/cidade/> >. Acesso em 30 de abril de 2023.

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Governo de Minas realiza obras no Projeto Jaíba com investimento de R\$ 4,1 milhões. Atualizado em 14 de março de 2023. **Agência Minas**, Agropecuária. Disponível em: < <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/governo-de-minas-realiza-obras-no-projeto-jaiba-com-investimento-de-r-4-1-milhoes> >. Acesso em 22 de abril de 2023.

GRAZIERA, MLM. A fixação de vazões de referência. **Revista de Direito Ambiental**, v. 18, n. 70, 2013.

GRAHAM, Neal T. *et al.* Humans drive future water scarcity changes across all Shared Socioeconomic Pathways. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 1, p. 014007, 2020.

GREVE, Peter *et al.* Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 9, p. 486-494, 2018.

GWP - Global Water Partnership. Integrated Water Resources Management. **TAC (Technical Advisory Committee) Background**. Paper No. 4. GWP, Stockholm, Sweden, 2000.

HAQUE, Md Mahmudul; RAHMAN, Aatur; SAMALI, Bijan. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 60-69, 2016.

HARI, Vittal *et al.* Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 12207, 2020.

HARTMANN, Carlos; HARKOT, Paulo Fernando Carreta. Influência do canal São Gonçalo ao aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos-RS. **Brazilian Journal of Geology**, v. 20, n. 1, p. 329-332, 1990.

HASHIMOTO, Koji. Global temperature and atmospheric carbon dioxide concentration. In: **Global Carbon Dioxide Recycling**. Springer, Singapore, 2019. p. 5-17. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8584-1_3

HAUSFATHER, Zeke *et al.* Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 47, n. 1, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

HAY, Lauren E.; WILBY, Robert L.; LEAVESLEY, George H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 387–397, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x>

HEGERL, Gabriele C. *et al.* Challenges in quantifying changes in the global water cycle. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 7, p. 1097-1115, 2015.

HITZ, Samuel; SMITH, Joel. Estimating global impacts from climate change. **Global Environmental Change**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 201–218, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.04.010>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual da Vegetação Brasileira**. 2012.

_____. **Brasil: uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. Org: Adma Figueiredo *et al.* 2016.

_____. Rio Grande do Sul: Uruguaiana. Produção Agrícola - Lavoura Temporária 2021. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/uruguaiana/pesquisa/14/0?tipo=ranking&indicador=10224> >. Acesso em 30 de abril de 2023. 2021a

____. PPM - Pesquisa da Pecuária Municipal 2021. Disponível em: <
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>>. Acesso em 30 de abril de 2023. 2021b

____. Brasil em síntese – território. Disponível em: <
<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html#:~:text=Al%C3%A9m%20da%20Mata%20Atl%C3%A2ntica%2C%20o,de%20dois%20por%20cento%20dele>> Acesso em 02 de maio de 2023.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados de Queimadas. Programa Queimadas. Disponível em: <<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>>. Acesso em 04 de agosto de 2022.

IPCC. Summary for Policymakers. *In: 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*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 1-19. 2012.

____. **Fifth Assessment Report: Climate Change 2013**. Cambridge University Press, 2013.

____. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contributions of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland, v. 151. 2014.

____. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 2018.

____. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, 2021.

IPH, Instituto de Pesquisas Hidráulicas; ANA, Agência Nacional das Águas. MGB Flood Frequency. **Cooperação em Tecnologias para análise hidrológicas em escala Nacional**. Disponível em: <
<https://leolaipeit.users.earthengine.app/view/frequenciainundacao>>. Acesso em 09 de maio de 2023.

IPT. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. **Secretaria de Indústria e Comércio do Rio Grande do Norte**, Vol.1, 389 p. , 1982.

JAAGUS, Jaak *et al.* Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 1, p. 225-249, 2022.

JACCON, G. Estudo da curva-chave do posto fluviométrico de Manacapuru no rio Solimões. 1986.

JAVADINEJAD, Safieh; DARA, Rebwar; JAFARY, Forough. Climate change scenarios and effects on

snow-melt runoff. **Civil Engineering Journal**, v. 6, n. 9, p. 1715-1725, 2020.

JENSEN, Olivia; WU, Huijuan. Urban water security indicators: Development and pilot. **Environmental Science & Policy**, v. 83, p. 33-45, 2018.

JOHANSSON, Rosa Maria Formiga *et al.* O conceito emergente de segurança hídrica. **Sustentare**, v. 1, n. 1, p. 72-92, 2018.

KAHLENBORN, Walter *et al.* Climate impact and risk assessment 2021 for Germany. Summary. Umweltbundesamt (UBA), 2021.

KISAKYE, Violet; VAN DER BRUGGEN, Bart. Effects of climate change on water savings and water security from rainwater harvesting systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 49-63, 2018.

KUNDZEWICZ, Zbigniew W. *et al.* Freshwater resources and their management. **In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

LAAHA, G. *et al.* Prediction of low flows in ungauged basins. **In: Runoff Prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales**. Cambridge University Press, p. 163-188, 2013.

LAUTZE, Jonathan; MANTHRITHILAKE, Herath. Water security: old concepts, new package, what value?. **In: Natural resources forum**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, p. 76-87, 2012.

LAWRENCE, Deborah; VANDECAR, Karen. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. **Nature climate change**, v. 5, n. 1, p. 27-36, 2015.

LAYBOURN-LANGTON, Laurie. This is a crisis: Facing up to the age of environmental breakdown. Institute for Public Policy Research (IPPR), 2019.

LE QUÉRÉ, Corinne *et al.* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. **Nature Geoscience**, [S. l.], v. 2, n. 12, p. 831–836, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo689>

LIMA, José W. M.; COLLISCHONN, Walter; MARENCO, José A. **Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. Hunter Books Editora, São Paulo : AES Tietê, 2014.

LONGHI, Eloísa Helena; FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins. Metodologias para determinar vazão ecológica em rios. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 20, p. 33-48, 2011.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>

LÜDTKE, Deike U. *et al.* Increase in daily household water demand during the first wave of the COVID-19 pandemic in Germany. **Water**, v. 13, n. 3, p. 260, 2021.

LUIZ-SILVA, Wanderson *et al.* Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, p. 353-371, 2019.

_____. A comprehensive analysis of observed and projected climate extremes of temperature and precipitation in Belo Monte Hydropower Plant-eastern Amazon, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 9710-9729, 2022.

MANKIN, Justin S. *et al.* The curious case of projected twenty-first-century drying but greening in the American West. **Journal of Climate**, v. 30, n. 21, p. 8689-8710, 2017.

MANZATTO, Celso Vainer; FREITAS JUNIOR, Elias de; PERES, José Roberto R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, [S. l.], n. 103, p. 25, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>

MARENGO, José A. *et al.* Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2)

_____. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 228, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

_____. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 2022.

MARTINS, Eduardo SPR *et al.* A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-16). Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective. **Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society**, 99 (1), 65–S69, 2018.

MARVEL, Kate; BONFILS, Céline. Identifying external influences on global precipitation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 48, p. 19301-19306, 2013.

MARVEL, Kate; COOK, Benjamin I. Using machine learning to identify novel hydroclimate states. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 380, n. 2238, p. 20210287, 2022.

MARVEL, Kate *et al.* Observed and projected changes to the precipitation annual cycle. **Journal of Climate**, v. 30, n. 13, p. 4983-4995, 2017.

_____. Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence. **Nature**, v. 569, n. 7754, p. 59-65, 2019.

MASSON-DELMOTTE, Valérie *et al.* Chapter 8 - Water. **In: Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental**

Panel on Climate Change, v. 2, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, 2021.

MEADE, Robert H. *et al.* Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 1991.

MEDEIROS, Felipe Jeferson de; OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo de; AVILA-DIAZ, Alvaro. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, p. 100511, 2022.

MENGISTU, Daniel *et al.* Climate change impacts on water resources in the upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 592, p. 125614, 2021.

MEINSHAUSEN, Malte *et al.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, [S. l.], v. 109, n. 1, p. 213–241, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

MELO, D. C. D. Estimativa de impacto de mudanças climáticas nos níveis do Sistema aquífero do Guarani. **Dissertação de mestrado (Escola de Engenharia de São Carlos)**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MENEZES, M. D. Levantamento de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga de aquíferos. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)**. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2007.

MICHELON, Cleudson Jose *et al.* Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, p. 848-853, 2010.

MIDDLETON, N. J.; THOMAS, D. S. G. World Atlas of desertification 2nd Edition. **United Nations Environment Programme**. Arnold, 1997.

NASA; NOAA. 2018 fourth warmest year in continued warming trend, according to NASA, NOAA. **Global Climate Change - News**, February 6, 2019. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2841/2018-fourth-warmest-year-in-continued-warming-trend-according-to-nasa-noaa/> Acesso em 25 de julho de 2020.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change**. National Academies Press, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/21852>

NAUMANN, G. *et al.* The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin. **Publications Office of the European Union, Luxembourg**, 2021, ISBN 978-92-76- 41898-6 (online), doi:10.2760/773 (online), JRC126508

NCAR, National Center for Atmospheric Research. Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling – ds314.0. Disponível em: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds314.0/> >. Acesso em 19 de abril de 2023.

NETO, José de Oliveira Melo; CHAGAS, Rogério Moreira; JÚNIOR, Arisvaldo Vieira Mélo. Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 7 (a), 2013.

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

NEWELL, Reginald E. *et al.* Tropospheric rivers? – A pilot study. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 24, p. 2401-2404, 1992.

NOBRE, Anthonio Donato. O Futuro Climático da Amazônia. **Relatório de Avaliação Científica**. São José dos Campos, São Paulo, 2014.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, [online], v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007. ISSN 2317-6660.

NORDHAUS, William D.; MOFFAT, Andrew. **A survey of global impacts of climate change: replication, survey methods, and a statistical analysis**. National Bureau of Economic Research, 2017.

OCTAVIANTI, Thanti; STADDON, Chad. A review of 80 assessment tools measuring water security. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 8, n. 3, p. e1516, 2021.

ONU – Organização das Nações Unidas. The road to dignity by 2030: ending poverty, transforming all lives and protecting the planet. Synthesis report of the Secretary-General on the post-2015 sustainable development agenda. 2014.

OTTO, Friederike EL *et al.* Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. S35-S40, 2015.

PAES, C. O. Influência do uso e manejo na compactação do solo como indicadores da recarga das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). **Monografia**. Universidade Estadual Paulista. 2012.

PAIVA, G. P. Estimativa da recarga em uma unidade detrítica de uma microbacia do Rio Piranga (MG). **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Capítulo 9 – Mudanças climáticas de curto e longo prazo: projeções e atribuição. *In*: Base Científica das Mudanças Climáticas. Volume 1 – Completo, 2020.

PEREIRA, Maria Fernanda Rodrigues. Avaliação sistemática da precipitação dos modelos de clima do CMIP5 e CMIP6 no sul do Brasil. **Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**, Florianópolis, 2021.

PEREIRA, Roberto; JUNIOR, João Abner Guimarães. Capacidade de Infiltração nas Dunas de Natal – Capital do RN. *In*: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió, 2011.

PRENTICE, I. Colin *et al.* CHAPTER 15 · Dynamic Global Vegetation Modeling: Quantifying Terrestrial Ecosystem Responses to Large-Scale Environmental Change. *In: Terrestrial ecosystems in a changing world*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 175-192.

PRIZIBISCZKI, Cristiane. Pesquisadores descrevem fenômeno que escureceu SP e sua relação com as queimadas na Amazônia. *O Eco*, 22 de agosto de 2019. Disponível em: <<https://www.oeco.org.br/noticias/pesquisadores-descrevem-fenomeno-que-escureceu-sp-e-sua-relacao-com-as-queimadas-na-amazonia/>>. Acesso em: 04 de agosto de 2022.

RANDALL, David A. *et al.* Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007. p. 589-662.

REGOTO, Pedro *et al.* Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021.

REYER, Christopher P. O. *et al.* Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 1601–1621, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0854-6>

RIBEIRO, Larissa de Castro. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: sub-projeto-regionalização de vazões via modelagem hidrológica - índices hidrológicos de rios da América do Sul. *Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS)*, 2021.

RICHTER, G. M.; SEMENOV, M. A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: Assessing drought risks. *Agricultural Systems*, [S. l.], v. 84, n. 1, p. 77–97, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.011>

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. Clean water and sanitation. *Our world in data*, 2021. Disponível em: <https://ourworldindata.org/sanitation?utm_campaign=Evening%20Post%20%26%20Mail&utm_medium=email&utm_source=Revue%20newsletter>. Acesso em 25 de abril de 2023.

ROCHA, João *et al.* Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal). *Science of the Total Environment*, v. 736, p. 139477, 2020.

SAATY, Thomas L. Some mathematical concepts of the analytic hierarchy process. *Behaviormetrika*, v. 18, n. 29, p. 1-9, 1991.

SADOFF, Claudia W.; BORGOMEIO, Edoardo; UHLENBROOK, Stefan. Rethinking water for SDG 6. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 5, p. 346-347, 2020.

SAHIN, Oz *et al.* Examining the potential for energy-positive bulk-water infrastructure to provide long-term urban water security: A systems approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 557-566, 2017.

SANTER, Benjamin D. *et al.* Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, n. 39, p. 15248-15253, 2007.

SANTOS, Paula Veronica Campos Jorge; CUNHA, Alan Cavalcanti. Potencial de vazão ambiental: método participativo para estimar vazão ambiental em rios na Amazônia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, p. 137-150, 2018.

SANTOS, P. V. C. J.; CUNHA, Alan Cavalcanti. Outorga de recursos hídricos e vazão ambiental no Brasil: Perspectivas metodológicas frente ao desenvolvimento do setor hidrelétrico na Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 81-95, 2013.

SARAIVA, Kleiton Rocha *et al.* O efeito das mudanças climáticas nas necessidades hídricas da melancia, no Piauí utilizando o "CROPWAT". **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, p. 858-865, 2016.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Nino/Southern Oscillation. **Phytopathology**, [S. l.], v. 85, n. 9, p. 970-976, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/Phyto-85-970>

SCHURER, Andrew P. et al. Human influence strengthens the contrast between tropical wet and dry regions. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104026, 2020.

SCIANNI, Luciana Alvim. Avaliação Preliminar do Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá**, Itajubá, 2014.

SEBRAE RS - Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Rio Grande do Sul. Perfil dos Municípios Gaúchos. Disponível em: < <https://datasebrae.com.br/perfil-dos-municipios-gauchos/> >. Acesso em 30 de abril de 2023.

_____. Uruguaiana lidera faturamento da produção agrícola no Estado. Atualizado em: 08/08/2017. Disponível em: < <https://sebraers.com.br/uruguaiana-lidera-faturamento-da-producao-agricola-no-estado/> >. Acesso em 25 de abril de 2023.

SENEVIRATNE, Sonia I. *et al.* Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. **Nature**, [S. l.], v. 443, n. 7108, p. 205–209, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature05095>

SHEFFIELD, Justin; GOTETI, Gopi; WOOD, Eric F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. **Journal of climate**, v. 19, n. 13, p. 3088-3111, 2006.

SILVA, M. B. *et al.* Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2020.

SIQUEIRA, Vinícius A. *et al.* Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America.

Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 9, p. 4815-4842, 2018.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto (ano de referência 2020). Gestão Técnica de Água. Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), Brasília, maio de 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/agua-e-esgotos> >. Acesso em 25 de abril de 2023.

SORRIBAS, Mino Viana *et al.* Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**, [S. l.], v. 136, n. 3–4, p. 555–570, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

SOUZA, Everaldo Barreiro de *et al.* Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. **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**, pgs. 320-346, 2014. Disponível em: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap9.pdf

SOUZA, S. A.; AMORIM, R. S.; REIS, D. S. Correlação serial em séries hidrometeorológicas. **In: Secas e cheias: modelagem e adaptação aos extremos hidrológicos no contexto da variabilidade e mudança do clima**. Souza Filho, F. A.; Reis, D. S.; Galvão, C. O. 2022a. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza.

SOUZA, S. A.; AMORIM, R. S.; REIS, D. S. Análise de tendência de extremos de precipitação nas regiões hidrográficas brasileiras. **In: Secas e cheias: modelagem e adaptação aos extremos hidrológicos no contexto da variabilidade e mudança do clima**. Souza Filho, F. A.; Reis, D. S.; Galvão, C. O. 2022b. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza.

SPINONI, Jonathan *et al.* Will drought events become more frequent and severe in Europe?. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1718-1736, 2018.

SPINONI, Jonathan *et al.* Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX data. **Journal of Climate**, v. 33, n. 9, p. 3635-3661, 2020.

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, [S. l.], v. 489, n. 7415, p. 282–285, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature11390>

STOCKER, Thomas F. *et al.* Climate change 2013: the physical science basis. **Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, [S. l.], v. 1535. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

STOTT, Peter A. *et al.* Detection and attribution of climate change: a regional perspective. **Wiley interdisciplinary reviews: climate change**, v. 1, n. 2, p. 192-211, 2010.

STRECK, Nereu Augusto; ALBERTO, Cleber Maus. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 424–433, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103->

84782006000200011

STRINGER, Lindsay C. *et al.* Climate change impacts on water security in global drylands. **One Earth**, v. 4, n. 6, p. 851-864, 2021.

TEIXEIRA, Alexandre *et al.* **Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/publication/348603481_Contas_economicas_ambientais_da_agua_no_Brasil_2013-2015>. Acesso em 18 de abril de 2023.

TEUTSCHBEIN, Claudia; SEIBERT, Jan. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 456–457, p. 12–29, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>

THRASHER, Bridget *et al.* NASA global daily downscaled projections, CMIP6. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 262, 2022.

TUCCI, Carlos EM; HESPANHOL, Ivanildo; CORDEIRO NETTO, Oscar de M. **Gestão da água no Brasil**. 2001.

UHE, Peter *et al.* Method uncertainty is essential for reliable confidence statements of precipitation projections. **Journal of Climate**, v. 34, n. 3, p. 1227-1240, 2021.

UNEP - United Nations Environment Program. Water Security and Ecosystem Services: The Critical Connection. UNEP, Nairobi, 2009.

UNESCO and UNESCO i-WSSM. Water Security and the Sustainable Development Goals (Series I). **Global Water Security Issues (GWSI) Series**; UNESCO Publishing: Paris, France, 2019.

UN-WATER. Water Security and the Global Water Agenda: A UN-Water Analytical Brief. **UN University**, Hamilton, ON. 2013.

USDA, S. C. S. Urban hydrology for small watersheds. **Technical release**, v. 55, p. 2-6, 1986.

VAN LOON, Anne F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 359-392, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

VEETTIL, Anoop Valiya; MISHRA, Ashok K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 589-602, 2016.

VIEIRA, Gabriela Heimbach. Análise e comparação dos métodos de decisão multicritério AHP Clássico e Multiplicativo. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)–Instituto Tecnológico de Aeronáutica**, 2006.

VOOSEN, Paul. Hot'climate models exaggerate Earth impacts. **Science (New York, NY)**, v. 376, n. 6594, p. 685-685, 2022. <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.adc9453>

VÖRÖSMARTY, Charles J. *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *nature*, v. 467, n. 7315, p. 555-561, 2010.

WANDERLEY, Raianny L. N. *et al.* Relationship between land surface temperature and fraction of anthropized area in the Atlantic forest region, Brazil. **PLoS ONE**, [S. l.], v. 14, n. 12, p. 1–19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225443>

WARD, D.; MCKAGUE, K. Water requirements of livestock. Factsheet Order No. 07-023. Ontario Ministry of Agriculture. **Food and Rural Affairs**. 7p, 2007.

WARD, Philip J. *et al.* A global framework for future costs and benefits of river-flood protection in urban areas. **Nature climate change**, v. 7, n. 9, p. 642-646, 2017.

YANG, Yuting *et al.* Disconnection between trends of atmospheric drying and continental runoff. **Water Resources Research**, v. 54, n. 7, p. 4700-4713, 2018.

YIN, Guodong *et al.* Multi-scale assessment of water security under climate change in North China in the past two decades. **Science of The Total Environment**, v. 805, p. 150103, 2022.

YOUNG, Sera L. *et al.* The Household Water InSecurity Experiences (HWISE) Scale: development and validation of a household water insecurity measure for low-income and middle-income countries. **BMJ Global Health**, v. 4, n. 5, p. e001750, 2019.

ZELINKA, Mark D. *et al.* Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 1, p. e2019GL085782, 2020.

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S. l.], v. 131, n. 3–4, p. 127–142, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.05.005>

ZHANG, Xuebin *et al.* Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. **Nature**, v. 448, n. 7152, p. 461-465, 2007.

9. DISPONIBILIDADE DOS DADOS

Os arquivos raster do ISH para todos os cenários podem ser encontrados para download na plataforma ZENODO, através do link: <https://zenodo.org/record/8193105>

10. APÊNDICES

APÊNDICE A: INFORMAÇÕES SOBRE PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO ISH

A1. Informações sobre a normalização dos arquivos *raster* de cada dimensão e do ISH

DIMENSÃO	INDICADOR	CENÁRIO	MÍNIMO	MÁXIMO	NORMALIZAÇÃO		
					MÍNIMO	MÁXIMO	CÁLCULO
HUMANA	Volume de água consumido pela população	PA	84387560	7277463040	75948804	10120467456	= $1 - (RASTER - 75948804) / (10120467456 - 75948804)$
		id	108296208	5565650432			
		smc	130875592	8000369664			
		dc2	128258080	7840361984			
		dc5	124331808	7600351232			
		ac5	137419376	8400388096			
		ac10	143963152	8800406528			
		ac15	150506928	9200424960			
ECONÔMICA	Volume total de água consumido pela agricultura, pecuária e indústria	PA	0	1204213,25	0	1455508,45	= $1 - (RASTER) / (1455508,45)$
		RCP 4.5	0	1266591,5			
		RCP 8.5	0	1323189,5			
		CONS_it_S+20	0	1204255,375			
		CONS_it_S-20	0	1204171,25			
		CONS_it_S+50	0	1204318,5			
		CONS_it_S-50	0	1204108,125			
ECOSSISTÊMICA	Vazão de referência de 95% (Q ₉₅)	PA	0	3,44858098	0	4,969405174	= $(RASTER) / (4,96940517425539)$
		RCP 4.5	0	4,138297081			
		RCP 8.5	0	4,517641068			
		Q95_S+20	0	4,13829708099			
		Q95_S-20	0	2,75886487961			
RESILIÊNCIA	Vazão média	PA	0	6,394521236	0	8,376822472	= $(RASTER) / (8,3768224716187)$
		RCP 4.5	0	7,673425674			
		RCP 8.5	0	8,376822472			
		Qm_S+20	0	7,67342567444			
		Qm_S-20	0	5,11561679840			
	Vazão explorável	PA	0,144999996	3,119999886	0,144999996	3,119999886	= $(RASTER - 0,14499999582767) /$

DIMENSÃO	INDICADOR	CENÁRIO	MÍNIMO	MÁXIMO	NORMALIZAÇÃO		
					MÍNIMO	MÁXIMO	CÁLCULO
							(3,1199998855591 - 0,14499999582767)
	Média*	PA	0,000930276	0,881679416	0,000837249	0,969847357	= (RASTER - 0,000837248767493292) / (0,969847357273102 - 0,000837248767493292)
		RCP 4.5	0,00104191	0,862595439			
		RCP 8.5	0,001376809	0,870229006			
ISH		ISH_PA	0,198129714	0,889070153	0,162679517	0,977977169	= (RASTER - 0,162679517269137) / (0,977977168560029 - 0,162679517269137)
		ISH_id_4.5	0,196350977	0,873104036			
		ISH_smc_4.5	0,195268109	0,869069576			
		ISH_dc2_4.5	0,196046829	0,869468689			
		ISH_dc5_4.5	0,197214901	0,870067358			
		ISH_ac5_4.5	0,193321332	0,868071735			
		ISH_ac10_4.5	0,19137454	0,867073894			
		ISH_ac15_4.5	0,189427748	0,866076112			
		ISH_id_8.5	0,187678248	0,878542602			
		ISH_smc_8.5	0,18659538	0,874508142			
		ISH_dc2_8.5	0,1873741	0,874907255			
		ISH_dc5_8.5	0,188542172	0,875505924			
		ISH_ac5_8.5	0,184648603	0,873510301			
		ISH_ac10_8.5	0,182701811	0,872512519			
	ISH_ac15_8.5	0,180755019	0,871514678				

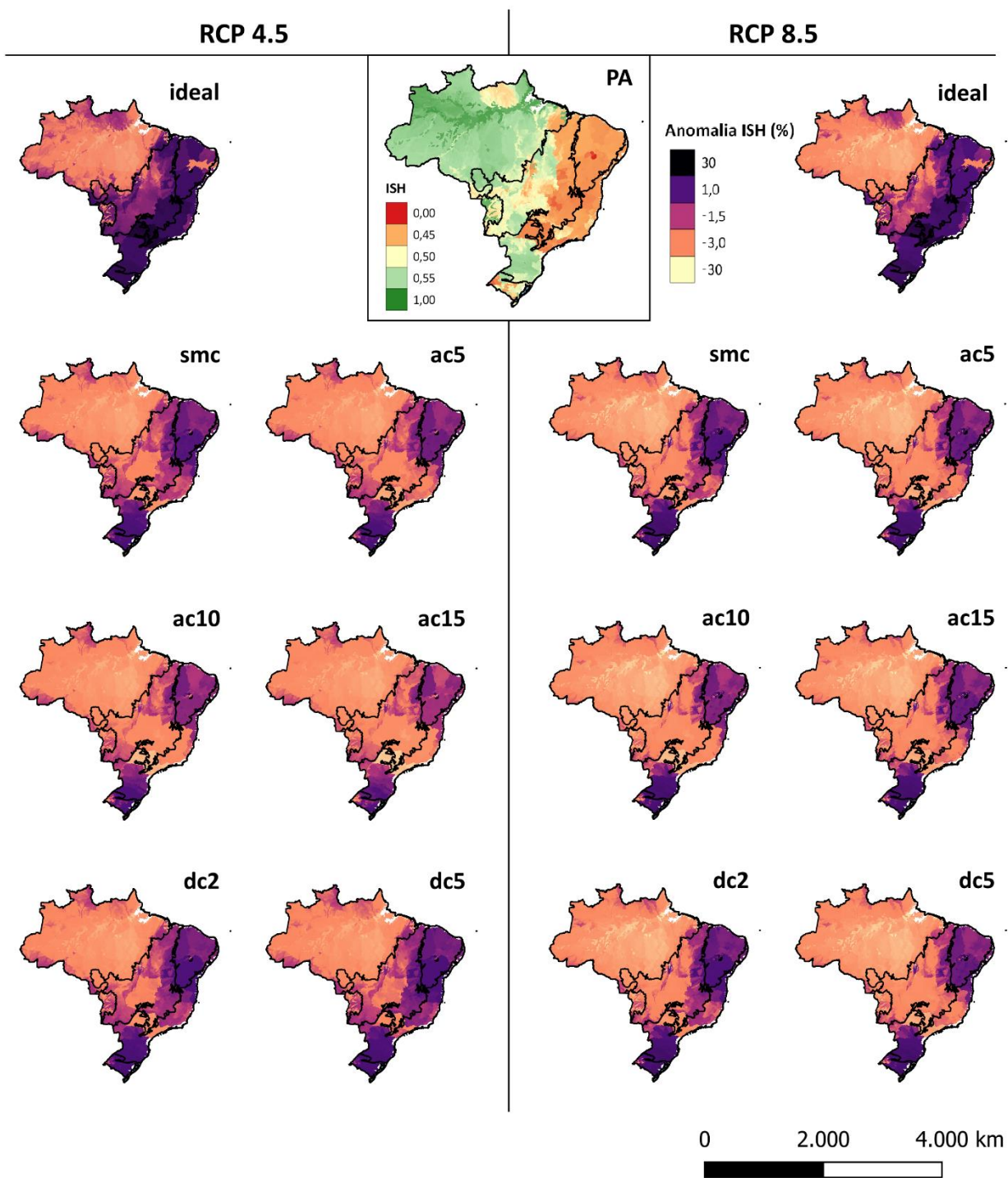
A2. Informações sobre os *rasters* normalizados conforme cálculo descrito anteriormente (APÊNDICE A1)

INDICADOR	CENÁRIO	DESCRIÇÃO	RASTER NORMALIZADO
Volume de água consumido pela população (CONS_hum)	PA	Período atual	Dh_PA
	id	Consumo <i>per capita</i> ideal	Dh_id
	smc	Sem mudança no consumo <i>per capita</i>	Dh_smc
	dc2	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 2%	Dh_dc2
	dc5	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 5%	Dh_dc5
	ac5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 5%	Dh_ac5
	ac10	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 10%	Dh_ac10
	ac15	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 15%	Dh_ac15
Volume total de água consumido pela agricultura, pecuária e indústria (CONS_Den)	PA	Período atual	Den_PA
	45	RCP 4.5	Den_45
	85	RCP 8.5	Den_85
Vazão de referência de 95% (Q ₉₅)	PA	Período atual	Des_PA
	45	RCP 4.5	Des_45
	85	RCP 8.5	Des_85
Vazão média (Q _m)	PA	Período atual	Qm_PA
	45	RCP 4.5	Qm_45
	85	RCP 8.5	Qm_85
Vazão explotável (Q _{exp})	PA	Período atual	Qexp_PA
Média* (med_Dres)	PA	Período atual	Dres_PA
	45	RCP 4.5	Dres_45
	85	RCP 8.5	Dres_85

A3. Rasters utilizados para o cálculo do ISH

ISH	DESCRIÇÃO	RASTERS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DO ISH			
		Dh	Den	Des	Dres
ISH_PA	Período atual	Dh_PA	Den_PA	Des_PA	Dres_PA
ISH_id_4.5	Consumo <i>per capita</i> ideal - RCP 4.5	Dh_id	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_smc_4.5	Sem mudança no consumo <i>per capita</i> - RCP 4.5	Dh_smc	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_dc2_4.5	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 2% - RCP 4.5	Dh_dc2	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_dc5_4.5	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 5% - RCP 4.5	Dh_dc5	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_ac5_4.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 5% - RCP 4.5	Dh_ac5	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_ac10_4.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 10% - RCP 4.5	Dh_ac10	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_ac15_4.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 15% - RCP 4.5	Dh_ac15	Den_4.5	Des_4.5	Dres_4.5
ISH_id_8.5	Consumo <i>per capita</i> ideal - RCP 8.5	Dh_id	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_smc_8.5	Sem mudança no consumo <i>per capita</i> - RCP 8.5	Dh_smc	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_dc2_8.5	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 2% - RCP 8.5	Dh_dc2	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_dc5_8.5	Diminuição do consumo <i>per capita</i> em 5% - RCP 8.5	Dh_dc5	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_ac5_8.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 5% - RCP 8.5	Dh_ac5	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_ac10_8.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 10% - RCP 8.5	Dh_ac10	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ISH_ac15_8.5	Aumento do consumo <i>per capita</i> em 15% - RCP 8.5	Dh_ac15	Den_8.5	Des_8.5	Dres_8.5
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ISH		RASTERS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DO ISH			
		Dh	Den	Des	Dres
ISH_Q+20	Aumento das vazões Q_{95} e Q_m em 20%	Dh_PA	Den_PA	Des_Q20	Dres_Q20
ISH_Q-20	Diminuição das vazões Q_{95} e Q_m em 20%	Dh_PA	Den_PA	Des_Q-20	Dres_Q-20
ISH_IT+20	Aumento do consumo da indústria em 20%	Dh_PA	Den_IT20	Des_PA	Dres_PA
ISH_IT-20	Diminuição do consumo da indústria em 20%	Dh_PA	Den_IT-20	Des_PA	Dres_PA

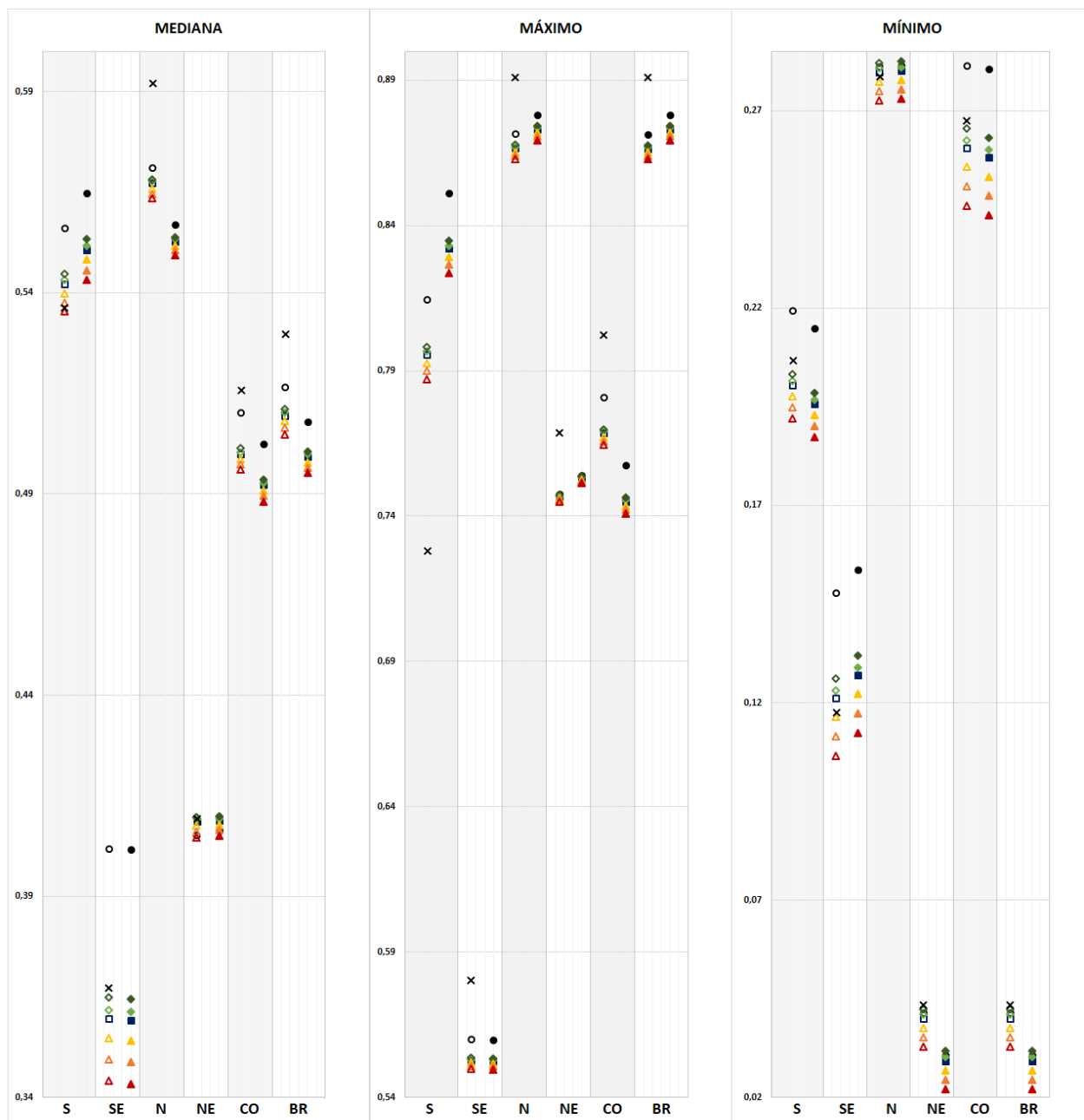
APÊNDICE B: ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO



APÊNDICE C: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO POR REGIÃO DO BRASIL

MEDIANA						
Cenário	Sul	Sudeste	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Brasil
PA	0,536185	0,367266	0,592017	0,409228	0,515757382	0,529809
id 45	0,556075	0,401708	0,571113	0,405201	0,510167181	0,516613
smc 45	0,542141	0,359596	0,56714	0,408642	0,499792248	0,509429
dc2 45	0,54317	0,361728	0,56763	0,408972	0,500286222	0,510125
dc5 45	0,544678	0,364783	0,568152	0,409517	0,501205504	0,511059
ac5 45	0,539753	0,354682	0,565679	0,40751	0,498532742	0,50797
ac10 45	0,537498	0,349324	0,56448	0,40605	0,497220665	0,506448
ac15 45	0,535376	0,344	0,563366	0,404501	0,496067762	0,504775
id 85	0,564759	0,401649	0,55706	0,406283	0,502363563	0,507944
smc 85	0,550697	0,35928	0,552762	0,408868	0,49226886	0,499258
dc2 85	0,551753	0,361383	0,553284	0,409253	0,492817253	0,499828
dc5 85	0,553321	0,364485	0,553899	0,40992	0,493559718	0,500588
ac5 85	0,548296	0,354215	0,551661	0,407839	0,490888	0,497807
ac10 85	0,545671	0,348852	0,55071	0,406621	0,489553988	0,496513
ac15 85	0,543153	0,343248	0,549457	0,404944	0,488121808	0,495248
MÁXIMO						
Cenário	Sul	Sudeste	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Brasil
PA	0,727908	0,580136	0,890951	0,768657	0,802396	0,890951
id 45	0,814428	0,559819	0,871368	0,747435	0,780885	0,871368
smc 45	0,795352	0,552529	0,86642	0,74649	0,76842	0,86642
dc2 45	0,796468	0,552905	0,866909	0,746707	0,768967	0,866909
dc5 45	0,798143	0,553471	0,867644	0,747032	0,769787	0,867644
ac5 45	0,79256	0,551586	0,865196	0,745948	0,767052	0,865196
ac10 45	0,789768	0,550644	0,863972	0,745405	0,765684	0,863972
ac15 45	0,786977	0,549702	0,862748	0,744863	0,764316	0,862748
id 85	0,851121	0,559721	0,878039	0,754107	0,757411	0,878039
smc 85	0,832045	0,55243	0,873091	0,753161	0,744946	0,873091
dc2 85	0,833161	0,552807	0,87358	0,753378	0,745493	0,87358
dc5 85	0,834836	0,553372	0,874314	0,753704	0,746314	0,874314
ac5 85	0,829253	0,551488	0,871867	0,752619	0,743578	0,871867
ac10 85	0,826461	0,550546	0,870643	0,752077	0,74221	0,870643
ac15 85	0,82367	0,549603	0,869419	0,751535	0,740843	0,869419
MÍNIMO						
Cenário	Sul	Sudeste	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Brasil
PA	0,206721	0,117494	0,278601	0,043481	0,267449319	0,043481
id 45	0,219364	0,147797	0,280999	0,0413	0,281365335	0,0413
smc 45	0,200288	0,121154	0,27967	0,039971	0,260516733	0,039971
dc2 45	0,201404	0,123108	0,280626	0,040927	0,262470722	0,040927
dc5 45	0,203079	0,126039	0,282058	0,042359	0,265401661	0,042359
ac5 45	0,197496	0,116269	0,277283	0,037584	0,255631775	0,037584
ac10 45	0,194704	0,111384	0,274895	0,035196	0,250746876	0,035196
ac15 45	0,191913	0,106499	0,272507	0,032808	0,245861903	0,032808
id 85	0,214797	0,153696	0,281449	0,030662	0,280576169	0,030662
smc 85	0,19572	0,127054	0,280121	0,029334	0,258173198	0,029334
dc2 85	0,196837	0,129008	0,281076	0,030289	0,260127187	0,030289
dc5 85	0,198511	0,131939	0,282509	0,031722	0,263058126	0,031722
ac5 85	0,192928	0,122169	0,277733	0,026946	0,253288239	0,026946
ac10 85	0,190137	0,117284	0,275346	0,024558	0,248403311	0,024558
ac15 85	0,187345	0,112399	0,272958	0,02217	0,243518367	0,02217

APÊNDICE D: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR MACRORREGIÃO BRASILEIRA



LEGENDA

x Período atual

RCP 4.5 RCP 8.5

- ● Consumo per capita ideal
- ■ Sem mudança no consumo per capita
- ◇ ◆ Diminuição do consumo per capita em 2%
- ◇ ◆ Diminuição do consumo per capita em 5%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 5%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 10%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 15%

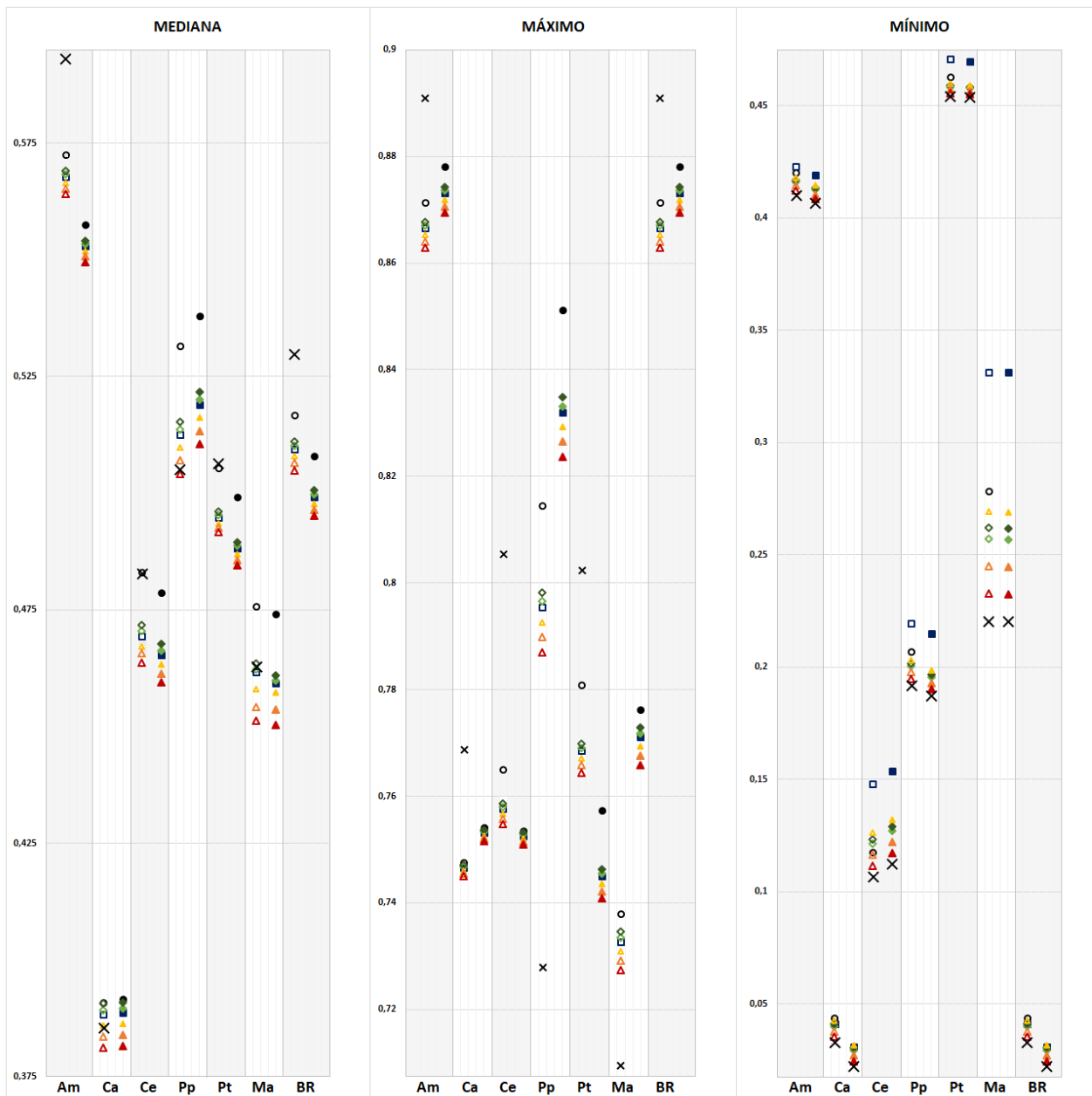
Macrorregiões

- S Sul
- SE Sudeste
- N Norte
- NE Nordeste
- CO Centro-Oeste
- BR Brasil

APÊNDICE E: ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA O PERÍODO FUTURO POR BIOMA BRASILEIRO

MEDIANA							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,592961	0,385483	0,482804	0,505016	0,506361902	0,462838501	0,529809
id 45	0,572378	0,390752	0,482981	0,531541	0,505340397	0,475681454	0,516613
smc 45	0,567692	0,388261	0,469237	0,512465	0,494694144	0,461684242	0,509429
dc2 45	0,568162	0,389198	0,470367	0,513581	0,495241195	0,462186813	0,510125
dc5 45	0,568931	0,390594	0,471676	0,515256	0,495979667	0,463428617	0,511059
ac5 45	0,566362	0,385873	0,467092	0,509673	0,493488073	0,457867891	0,50797
ac10 45	0,565068	0,383494	0,465625	0,506882	0,492544919	0,454115346	0,506448
ac15 45	0,563987	0,381106	0,463594	0,50409	0,491592169	0,451200634	0,504775
id 85	0,557624	0,391597	0,478678	0,538	0,499272525	0,474113613	0,507944
smc 85	0,552933	0,388709	0,465334	0,518923	0,488216937	0,459231436	0,499258
dc2 85	0,553392	0,38961	0,466265	0,52004	0,488763988	0,459918559	0,499828
dc5 85	0,55414	0,390996	0,467704	0,521715	0,489523232	0,460944057	0,500588
ac5 85	0,551795	0,386331	0,463354	0,516131	0,486948937	0,457309216	0,497807
ac10 85	0,550855	0,383955	0,461316	0,51334	0,485708088	0,453670472	0,496513
ac15 85	0,549492	0,381571	0,459505	0,510548	0,484524548	0,450369895	0,495248
MÁXIMO							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,890951	0,768657	0,805469	0,727908	0,802396476	0,709459603	0,890951
id 45	0,871368	0,747435	0,764897	0,814428	0,780884564	0,737851143	0,871368
smc 45	0,86642	0,74649	0,757606	0,795352	0,768419504	0,732688427	0,86642
dc2 45	0,866909	0,746707	0,757983	0,796468	0,768966556	0,733397126	0,866909
dc5 45	0,867644	0,747032	0,758548	0,798143	0,769787192	0,734460175	0,867644
ac5 45	0,865196	0,745948	0,756664	0,79256	0,767051816	0,73091656	0,865196
ac10 45	0,863972	0,745405	0,755722	0,789768	0,765684128	0,729144812	0,863972
ac15 45	0,862748	0,744863	0,75478	0,786977	0,76431644	0,727373004	0,862748
id 85	0,878039	0,754107	0,75353	0,851121	0,757410944	0,776293814	0,878039
smc 85	0,873091	0,753161	0,752585	0,832045	0,744945824	0,771131098	0,873091
dc2 85	0,87358	0,753378	0,752802	0,833161	0,745492876	0,771839797	0,87358
dc5 85	0,874314	0,753704	0,753127	0,834836	0,746313512	0,772902846	0,874314
ac5 85	0,871867	0,752619	0,752043	0,829253	0,743578136	0,769359291	0,871867
ac10 85	0,870643	0,752077	0,7515	0,826461	0,742210448	0,767587483	0,870643
ac15 85	0,869419	0,751535	0,750958	0,82367	0,74084276	0,765815735	0,869419
MÍNIMO							
Cenário	Am	Ca	Ce	Pp	Pt	Ma	Brasil
PA	0,420047	0,043481	0,117494	0,206721	0,462656379	0,278081328	0,043481
id 45	0,422954	0,0413	0,147797	0,219364	0,470787942	0,331255466	0,0413
smc 45	0,416094	0,039971	0,121154	0,200288	0,458322853	0,25692901	0,039971
dc2 45	0,416757	0,040927	0,123108	0,201404	0,458869904	0,26181367	0,040927
dc5 45	0,417752	0,042359	0,126039	0,203079	0,459690541	0,269140661	0,042359
ac5 45	0,414331	0,037584	0,116269	0,197496	0,456955135	0,24471733	0,037584
ac10 45	0,41227	0,035196	0,111384	0,194704	0,455587447	0,232505694	0,035196
ac15 45	0,410209	0,032808	0,106499	0,191913	0,454219729	0,220294014	0,032808
id 85	0,419242	0,030662	0,153696	0,214797	0,469646603	0,331149548	0,030662
smc 85	0,41268	0,029334	0,127054	0,19572	0,457933754	0,256823033	0,029334
dc2 85	0,413505	0,030289	0,129008	0,196837	0,458480835	0,261707693	0,030289
dc5 85	0,414742	0,031722	0,131939	0,198511	0,459301472	0,269034714	0,031722
ac5 85	0,410619	0,026946	0,122169	0,192928	0,456566066	0,244611397	0,026946
ac10 85	0,408558	0,024558	0,117284	0,190137	0,455198377	0,232399717	0,024558
ac15 85	0,406497	0,02217	0,112399	0,187345	0,453830659	0,220188081	0,02217

APÊNDICE F: GRÁFICO DAS ESTATÍSTICAS DO ISH POR BIOMA BRASILEIRO



LEGENDA

- × Período atual
- RCP 4.5 RCP 8.5
- ● Consumo per capita ideal
- ■ Sem mudança no consumo per capita
- ◇ ◆ Diminuição do consumo per capita em 2%
- ◇ ◆ Diminuição do consumo per capita em 5%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 5%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 10%
- △ ▲ Aumento do consumo per capita em 15%

Biomias brasileiros

- Am** Amazônia
- Ca** Caatinga
- Ce** Cerrado
- Pp** Pampa
- Pt** Pantanal
- Ma** Mata Atlântica