



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

**INTRODUÇÃO DE UM INDICADOR DE RESILIÊNCIA NO ÍNDICE DE RISCO DE
ESCASSEZ HÍDRICA - W-SCARI**

Izabela Andrade Barcellos

RIO DE JANEIRO

Abril, 2025



Izabela Andrade Barcellos

**INTRODUÇÃO DE UM INDICADOR DE RESILIÊNCIA NO ÍNDICE DE RISCO DE
ESCASSEZ HÍDRICA-W-SCARI**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental,
Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental.

Orientador: Marcelo Miguez, Prof. D. Sc.

Co-orientador: Fernanda Thomaz, Prof. D. Sc.

RIO DE JANEIRO

Abril, 2025

CIP - Catalogação na Publicação

B242i Barcellos, Izabela Andrade
Introdução de um indicador de resiliência no
Índice de Risco de Escassez Hídrica - W-ScaRI /
Izabela Andrade Barcellos. -- Rio de Janeiro, 2025.
93 f.

Orientador: Marcelo Miguez.
Coorientadora: Fernanda Thomaz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Escola de
Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, 2025.

1. Resiliência. 2. Escassez hídrica. 3. Avaliação
multicritério. I. Miguez, Marcelo, orient. II.
Thomaz, Fernanda, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.



INTRODUÇÃO DE UM INDICADOR DE RESILIÊNCIA NO ÍNDICE DE RISCO DE ESCASSEZ HÍDRICA-W-SCARI

Izabela Andrade Barcellos

Orientador: Marcelo Miguez, Prof. D. Sc. e Co-orientador: Fernanda Thomaz, Prof. D. Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental,
Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, MARCELO COMES MIGUEZ

Presidente, FERNANDA ROCHA THOMAZ

ASSED NAKED HADDAD

MOEMA VERSIANI ACSELRAD

PAULO CANEDO DE MAGALHAES

Rio de Janeiro, 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de estar viva e com saúde para alcançar objetivos e superar desafios.

À minha família: minha mãe Eliane, meu pai William e meu padrasto Jorge, por todo suporte e incentivo que me deram aos estudos; ao meu companheiro Leandro, meu filho Henrique, minha enteada Nina, meu irmão Vitor e a dinda Mariana Escanho, por todo carinho, apoio e compreensão que me deram, cada um do seu jeito.

Às mulheres, colegas de profissão e amigas pessoais, Fernanda Spitz, Larissa Costa, Ana Paula Novaes, Tayane Palma, Daniele Amaral, Cinthia Avelar, ao meu amigo de profissão Paulinho Barros e colaboradores Pedro Teles e Rafael Porto, pelo exemplo, pelo aprendizado, pelo apoio técnico e apoio moral todos os dias.

Aos meus orientadores dr. Marcelo Miguez e dra. Fernanda Thomaz pela orientação e tempo dedicado ao trabalho desenvolvido.

Ao Programa de Engenharia Ambiental pela oportunidade de aprofundamento dos meus estudos.

Barcellos, Izabela Andrade. **INTRODUÇÃO DE UM INDICADOR DE RESILIÊNCIA NO ÍNDICE DE RISCO DE ESCASSEZ HÍDRICA-W-SCARI**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

RESUMO

A escassez hídrica é o resultado do desequilíbrio entre a demanda e a disponibilidade dos recursos hídricos, que pode trazer consequências socioeconômicas e ambientais danosas. A escassez pode estar associada a cenários de estiagem, sendo este um fenômeno hidrológico natural cíclico, mas também pode estar associada a um excesso de demanda, a desperdícios no uso do recurso ou a um déficit tecnológico. A dimensão dos danos causados por uma eventual escassez hídrica depende não só da intensidade e duração desta condição, mas também da vulnerabilidade do sistema afetado, que é definida por aspectos de tecnologia, política, economia e características e comportamento sociais. Esta dissertação procura focar exatamente nas características de exposição e vulnerabilidade presentes no cálculo de risco, mais especificamente considerando aspectos de incremento de resiliência. Neste contexto, tomando por base um índice de risco de escassez hídrica (W-ScaRI) previamente estabelecido, propõe-se a sua revisão, com objetivo de inclusão de uma medida simplificada de resiliência, para aprimoramento de sua representatividade. Neste sentido, dois municípios da bacia do rio Paraíba do Sul são tomados como casos de estudo e comparados, considerando a relevância desta bacia para o estado do Rio de Janeiro em termos de abastecimento humano. Barra Mansa e Volta Redonda foram escolhidos como casos para uma metodologia exploratória, considerando as diferenças de uso da água nestes municípios e os diferentes portes dos afluentes locais. Os comportamentos dos componentes relativos ao índice W-ScaRI original foram analisados, como base para propor e avaliar a inserção de um indicador para refletir a resiliência no W-ScaRI-Res. Também foi uma aplicação para validação da proposta, que mostrou-se funcional, como um contraponto à vulnerabilidade mapeada, para ampliação e fortalecimento da representatividade deste índice.

Palavra-chave: resiliência; escassez hídrica; avaliação multicritério.

Barcellos, Izabela Andrade. **INTRODUCTION OF A RESILIENCE INDICATOR IN THE WATER SCARCITY RISK INDEX – W-ScaRI**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertation (Master's Degree) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

ABSTRACT

Water scarcity is the result of the imbalance between the demand and the availability of water resources, which can bring damaging socio-economic and environmental consequences. Scarcity can be associated with drought scenarios, which is a cyclical natural hydrological phenomenon, but it can also be associated with excessive demand, resource wastage, or technological deficits. The extent of the damage caused by potential water scarcity depends not only on the intensity and duration of this condition but also on the vulnerability of the affected system, which is defined by aspects of technology, politics, economy, and social characteristics and behavior. This dissertation focuses precisely on the exposure and vulnerability characteristics present in the risk calculation, specifically considering aspects of resilience enhancement. In this context, based on a previously established water scarcity risk index (W-ScaRI), its revision is proposed, with the objective of including a simplified resilience measure to improve its representativeness. In this sense, two municipalities in the Paraíba do Sul river basin are taken as case studies and compared, considering the relevance of this basin for the state of Rio de Janeiro in terms of human supply. Barra Mansa and Volta Redonda were chosen as cases for an exploratory methodology, considering the differences in water usage in these municipalities and the different sizes of local tributaries. The behaviors of the components of the original W-ScaRI index were analyzed as a basis for proposing and evaluating the insertion of an indicator to reflect resilience in W-ScaRI-Res. An application was also made for the validation of the proposal, which proved functional as a counterpoint to the mapped vulnerability, for the expansion and strengthening of the representativeness of this index.

Keywords: resilience; vulnerability; water scarcity; multicriteria assessment

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos.....	19
1.4 Metodologia Resumida	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 Secas	22
2.2 Escassez Hídrica	25
2.3 Vulnerabilidade.....	26
2.4 Gestão de Riscos	30
2.5 Resiliência.....	33
2.5.1 Redundância	35
2.6 Indicadores como instrumentos de gestão	37
2.6.1 Indicadores de resiliência	39
3. METODOLOGIA.....	40
3.1 Índice de Risco de Escassez Hídrica (W-ScaRI)	42
3.2 Indicador de resiliência	51
3.2.1 Resiliência global	52
3.2.2 Resiliência local	53
4. ESTUDO DE CASO	54
4.1 Caracterização da área de estudo	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1 Levantamento de dados	62
5.2 Aplicação W-ScaRI em Volta Redonda e Barra Mansa	66
5.2.1 Subíndice – Consequência	67
5.2.2 Cálculo do Subíndice de Consequência	73
5.2.3 Cálculo do Índice Final	75
5.3 Componente de Resiliência	77
5.3.1 Aplicação W-ScaRI-ResGlobal em Volta Redonda e Barra Mansa	77
5.3.2 Aplicação W-ScaRI-ResLocal em Volta Redonda e Barra Mansa	81

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	83
7 REFERÊNCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Anomalias médias de temperatura próximas à superfície (diferença em relação à média de 1991–2020) para 2023 até outubro. Fonte: OMM, 2023.	13
Figura 2. Distribuição espacial de água doce disponível no mundo (m ³ /capita/ano). Fonte: Oki & Quirocho, 2020.	22
Figura 3. Estágios da seca. Fonte: Costa <i>et al.</i> , 2022.	24
Figura 4. Estrutura representativa para definição da vulnerabilidade, no contexto de mudanças climáticas. Fonte: MMA, 2017.	27
Figura 5. O ciclo hidro-ilógico. Fonte: adaptado de NDMC (2019).	31
Figura 6. Ciclo de gestão de desastres. Fonte: Costa <i>et al.</i> , 2022.	32
Figura 7. Conceitos relacionados. Fonte: Suassuna, 2014.	34
Figura 8. Diagrama dos indicadores do índice W-ScaRI. Fonte: Adaptado de Thomaz (2023).	43
Figura 9. Indicadores de Perigo de Seca. Fonte: Thomaz, 2023.	44
Figura 10. Indicadores de Vulnerabilidade a Seca. Fonte: Thomaz, 2023.	48
Figura 11. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Fonte: Agevap, 2024.	56
Figura 12. Representação Esquemática do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul. Fonte: ANA, 2015.	58
Figura 13. Croqui da área a jusante da UHE Funil. Fonte: Walter, 2019.	59
Figura 14. Municípios de Volta Redonda e Barra Mansa.	60
Figura 15. UHPs do estado do RJ. Fonte: PERHI, 2014.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Desastres relacionados à seca no mundo, de 1910 a 2010. Fonte: EM-DAT (2014).	14
Tabela 2. Indicadores de Vulnerabilidade Social. Fonte: Thomaz, 2023.	49
Tabela 3. Indicadores de Vulnerabilidade Econômica. Fonte: Thomaz, 2023.	49
Tabela 4. Pesos utilizados no cálculo do W-ScaRI. Fonte: Thomaz, 2023.	50
Tabela 5. Dados usados para aplicação do subíndice de perigo (Thomaz, 2023).	63
Tabela 6. Dados usados para os componentes de exposição e vulnerabilidade.	63
Tabela 7. Captações nos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda. Fonte: PERHI-RJ, 2014.	64
Tabela 8. Afluentes com mais de 40km ² do trecho entre Funil - Santa Cecília. Fonte: Adaptado de CPRM, 2002.	65
Tabela 9. Aplicação do Indicador de Estresse Hídrico (IEx1) – Rio Paraíba do Sul.	68
Tabela 10. Valores mínimos mensais do indicador VEQR (%). Fonte: Thomaz, 2023.	69
Tabela 11. Aplicação do Indicador de Volume Equivalente (IEx2) – Rio Paraíba do Sul.	69
Tabela 12. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Ambiental (IVA) – Rio Paraíba do Sul.	70
Tabela 13. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS) – Rio Paraíba do Sul.	71
Tabela 14. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Econômico (IVE1) – Rio Paraíba do Sul.	71
Tabela 15. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Econômico (IVE2) – Rio Paraíba do Sul.	72
Tabela 16. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Barra Mansa.	74
Tabela 17. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Volta Redonda.	74
Tabela 18. Indicadores de perigo. Fonte: Thomaz, 2023.	75
Tabela 19. Cálculo final do Índice W-ScaRI para Barra Mansa.	76
Tabela 20. Cálculo final do Índice W-ScaRI para Volta Redonda.	76
Tabela 21. Aplicação do Indicador de Estresse Hídrico com Resiliência (IEx1Res) – Rio Paraíba do Sul.	78
Tabela 22. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Barra Mansa.	78
Tabela 23. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Volta Redonda.	79
Tabela 24. Índice final W-ScaRI com resiliência para Barra Mansa.	79
Tabela 25. Índice final W-ScaRI com resiliência para Volta Redonda.	80
Tabela 26. Índice final W-ScaRIResLocal em Barra Mansa.	81
Tabela 27. Índice final W-ScaRI-ResLocal em Volta Redonda.	82
Tabela 28. Painel de resultados.	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2023) alerta que os últimos oito anos foram os mais quentes já registrados. Já foram atingidos novos recordes no aumento do nível do mar, e no aquecimento dos oceanos, e o agravamento das mudanças climáticas trouxe mais secas, inundações e ondas de calor em diversos lugares do mundo. A Figura 1 evidencia as anomalias de temperatura global no período de 1991-2020.

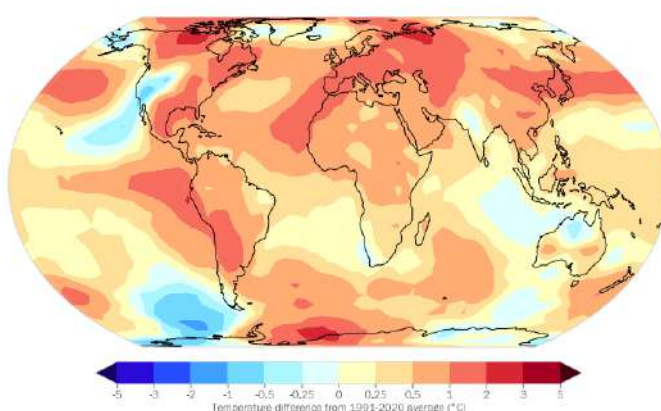


Figura 1. Anomalias médias de temperatura próximas à superfície (diferença em relação à média de 1991–2020) para 2023 até outubro. Fonte: OMM, 2023.

De acordo com o sexto relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o “AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis”, sabe-se que a ocorrência de desastres naturais são parte do ecossistema terrestre, mas o problema está no desequilíbrio ambiental e no aumento da intensidade e da probabilidade de suas ocorrências, no chamado “*whiplash* do clima”, causando a quebra dos padrões naturais e ocasionando oscilações violentas entre extremos quentes e frios, secos e úmidos.

O cenário de aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como as secas, tem levado a graves preocupações relacionadas à escassez de água em diversos países, que já vêm sofrendo no presente. Essa situação pode piorar ainda mais, segundo o Programa Mundial de Avaliação da Água das Nações Unidas (UN-WATER, 2023).

De acordo com os dados do *International Emergency Disasters Database* (EM-DAT), estima-se que 659 eventos de seca ocorreram no período de 1900 a 2015, resultando em algo em torno de 2,21 bilhões de pessoas afetadas e 11 milhões de mortes no mundo. Na tabela 1, estão relacionados desastres mundiais de seca, por década, neste período.

Tabela 1. Desastres relacionados à seca no mundo, de 1910 a 2010. Fonte: EM-DAT (2014).

	OCORRÊNCIA	AFETADOS	AFETADOS POR OCORRÊNCIA	MORTOS	MORTOS POR OCORRÊNCIA
Década de 1910	14	32.000	2.286	1.346.000	96.143
Década de 1920	4	25.000.000	6.250.000	4.724.000	1.181.000
Década de 1930	2	25.000	12.500	0	0
Década de 1940	13	0	0	3.450.000	265.384
Década de 1950	0	0	0	0	0
Década de 1960	48	117.879.704	2.455.827	1.510.650	31.472
Década de 1970	65	263.706.885	4.057.029	119.081	1.832
Década de 1980	126	593.546.376	4.710.685	557.268	4.423
Década de 1990	137	309.913.523	2.262.142	3.113	23
Década de 2000	175	755.616.713	4.317.809	1.159	7
Década de 2010	75	146.984.441	1.959.792	20.248	270

No Brasil, os desastres que requerem maior atenção estão relacionados tanto ao excesso quanto à escassez de água. A ausência e a abundância da água funcionam como dínamos indutores de desastres. Em termos de impactos, a seca não é um evento linear, mas sim altamente complexo, com variações tanto na sua ocorrência espacial quanto temporal, afetando as condições de vida e saúde das populações (BRASIL, 2017).

O Relatório Mundial das Cidades da ONU-Habitat (2024) evidencia os desafios das alterações climáticas e da rápida urbanização, assim como revela que algumas intervenções climáticas pioraram as condições das comunidades vulneráveis. Os efeitos antrópicos sobre o clima têm intensificado a ocorrência de desastres naturais, enquanto o crescente processo de urbanização expõe cada vez mais populações, bens materiais e infraestruturas a esses eventos, devido à sua concentração espacial nas cidades. Esse cenário acentua a vulnerabilidade dos sistemas sociais, aumentando sua criticidade e representando uma séria ameaça ao desenvolvimento sustentável.

Com a maioria da população mundial residindo em áreas urbanas (e em processo de aumento dessa tendência), o aumento no número de desastres hidrológicos representará uma ameaça significativa para a vida e os meios de produção de uma grande parcela desta população. As cidades enfrentam sérios problemas em relação à gestão dos recursos naturais, pois são usuárias relevantes desses recursos: alimentos, energia e água. Os três recursos devem ser considerados em conjunto, uma vez que expressam concomitantemente objetivos e meios para as atividades humanas e com características conflitantes (Yuan *et al.*, 2022). A competição pela água, e consequentemente as crises que se instalam por causa da água, é decorrente da tensão entre o progressivo consumo humano, industrial, agrário, energético, entre outros. Todas as atividades econômicas se desenvolvem com o uso de água, o que faz com que a água deixe de ser apenas um recurso natural e passe à condição de “mercadoria”, sujeita à precificação, à disponibilidade ou escassez (Silva *et al.*, 2017).

Sob o pano de fundo de mudanças complexas no ambiente global, tanto pelo rápido processo de urbanização experimentado pelos países, de forma geral, quanto pela possibilidade de mudanças climáticas aumentarem os problemas de escassez, e considerando ainda a busca pela materialização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente o ODS 6, sobre água potável e saneamento, a realização de pesquisas sobre vulnerabilidade social também se tornou uma importante forma de atuar para promover o desenvolvimento sustentável, a integração da sociedade com o meio ambiente e, também, tornou-se um elo fundamental na construção da resiliência das sociedades, cidades e aldeias (Li & Wang, 2022).

Construir a resiliência das comunidades urbanas para enfrentar os desastres, bem como as próprias mudanças climáticas, é uma prioridade (Bam *et al.*, 2009). Na medida em que uma determinada comunidade seja capaz de aprender e se adaptar a novos conceitos e mudanças, mais resiliente ela se tornará (Proctor *et al.*, 2020).

1.2 Justificativa

Compreender a escassez de água e poder fazer estimativas sobre o risco de escassez são premissas importantes para formular políticas em nível global, nacional, regional e local (Liu *et al.*, 2017). As múltiplas facetas e interconexões da escassez de água com os temas de

abastecimento, produção de alimento e energia, além de socioeconomia e governança, exigem a integração de conhecimentos e esforços para tornar a avaliação da escassez de água a mais precisa possível (Hussain *et al.*, 2022), para garantir uma base mais sólida para o planejamento.

Por outro lado, indicadores são instrumentos simples, que permitem identificar, medir e avaliar aspectos relacionados a um determinado tema, como, por exemplo, o monitoramento de secas, podendo ser utilizados para acompanhar e avaliar programas ou ações ao longo do tempo, atuando como ferramenta útil ao planejamento. Os indicadores clássicos são ferramentas padronizadas, que, por vezes, ignoram uma série de fatores importantes que influenciam a ocorrência e gravidade da escassez de água, como a qualidade de água, variações espaço-temporais, entre outros. Já os indicadores holísticos consideram cálculos detalhados e aspectos socioeconômicos, mas exigem grande requisitos de dados, validação e integração conceitual de todos os parâmetros necessários, tornando-os de mais difícil aplicação e, por vezes, pela dificuldade de obter dados, também subjetivos. Assim, nenhum indicador sozinho, seja ele um indicador clássico ou holístico, fornece uma solução única para avaliação da escassez de água, ou de qualquer fenômeno, de fato (Hussain *et al.*, 2022).

De forma ampla, a seca é conceituada como um desastre natural, visto que corresponde à situação de escassez de água que se prolonga ao longo do tempo, que abrange áreas extensas e com repercussões negativas significativas nas atividades socioeconômicas e nos ecossistemas (Alpino *et al.*, 2014). Entre 1970 e 2019, secas causaram aproximadamente 650.000 mortes relatadas, de acordo com o Atlas da Mortalidade e Perdas Econômicas decorrentes de Extremos Meteorológicos, Climáticos e Hídricos da OMM de 2021. Na classificação dos 10 desastres mais graves no período, a seca está em primeiro lugar no número de mortes no mundo. Entre os países da América do Sul, no ranking de perdas econômicas por tipo de desastre, a seca ocupou o 1º lugar com a perda de U\$9.02 bilhões de dólares em 1978, ocorrida no Brasil, e o segundo lugar em 2014, também no Brasil com U\$5,28 bilhões de dólares perdidos (OMM, 2021)

Na plataforma EM-DAT do Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED), é permitida a busca de informações, filtrando por país, período, desastres entre outros. Para o Brasil, são trazidas informações

referentes às secas de 1970-2023, com um total de 79.420.000 de afetados e um dano total de US\$ 37.420.967,00.

No Brasil, dentre os desastres naturais, historicamente, a seca é considerada o principal, com episódios desde o período colonial e consequências severas nas condições de vida e saúde da população. No sudeste brasileiro, nos últimos 25 anos, houve duas estiagens críticas, em 2003-2004 e em 2014-2015, afetando a região econômica mais importante e mais densa do país, a bacia do Rio Paraíba do Sul. Na primeira, em 2003-2004, o nível de armazenamento dos reservatórios regularizadores das vazões do Rio Paraíba do Sul indicava a possibilidade de racionamento (Fundação Coppetec/Inea, 2014). No período de 2014-2015, a grave escassez hídrica na região Sudeste do país afetou as duas regiões metropolitanas (RM) mais importantes do país, relativas a São Paulo (RMSP) e Rio de Janeiro (RMRJ). Foram tomadas medidas drásticas, como a execução de obras emergenciais para utilização do volume morto de alguns reservatórios do Sistema Cantareira (SP) e de alguns reservatórios no Rio de Janeiro (Integral Engenharia/Firjan, 2015).

Os impactos da seca vão sempre depender do contexto local e podem durar anos. Embora a seca possa abranger várias regiões e países, a intensidade de seus impactos irá depender diretamente das situações de vulnerabilidade existentes na população afetada da região, onde as populações mais pobres e vulneráveis tendem a sofrer as maiores consequências negativas sobre as condições de vida e saúde (Costa *et al.*, 2022).

O direcionamento da pesquisa sobre escassez hídrica esteve sempre muito vinculado à pegada hídrica e sua contribuição, de acordo com os diferentes setores de produção (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Para caracterizar a justificativa do presente estudo, foi realizada uma busca de informações utilizando a palavra-chave escassez hídrica (water scarcity). A maior quantidade de resultados foi voltada para produção alimentar / segurança alimentar, com a China liderando a publicação de artigos de revisão. Considerando apenas o ano de 2022, além da agricultura, foi observado que o foco dos artigos foi em monitoramento de escassez, com indicadores e reuso de águas para melhor gestão deste recurso, baseado no conceito do acesso à água de qualidade como direito humano. A Índia apareceu em grande parte dos artigos mais recentes. Os autores mais citados foram: Falkenmark, Mesfin M. Mekonnen and Arjen Y. Hoekstra; Hanasaki.

Na busca pela palavra-chave Nexus Água-Alimento-Energia (nexus FEW Food-energy-water), uma maior quantidade de resultados voltou-se para explicação do conceito nexus FEW e sua complexidade, por envolver diversos setores, vinculados ao desenvolvimento com sustentabilidade, esse termo se encontra mais massificado na literatura. Filtrando para 2022, além da agricultura, foi observado que o foco dos artigos foi em quantificar e/ou simular as interações dos setores de produção, para uma gestão mais eficiente das águas. Dentre os resultados, os autores mais citados são: Saladini, F.; Yang, Y.C.E.; Yuan M-H; Rasul, G; (NSF) National Science Foundation; (WEF) World Economic Forum.

No período de 1990-2021, a pesquisa sobre o tema vulnerabilidade social recebeu atenção, com taxa média de crescimento anual nas publicações de 19,2%. A vulnerabilidade social está relacionada aos temas de mudanças climáticas, vulnerabilidade e resiliência (Li & Wang, 2022).

É importante destacar que identificar grupos e regiões vulneráveis, explorar mecanismos de redução de vulnerabilidade e adotar estratégias para incremento de resiliência e adaptação não apenas ajuda a reduzir o impacto adverso das mudanças ambientais e das atividades humanas no sistema social, mas também se tornam uma forma crucial de quantificar o desenvolvimento sustentável das sociedades (Li & Wang, 2022).

Do ponto de vista das estratégias de gestão sustentável das cidades, que visam reduzir a exposição e a vulnerabilidade, assim como aumentar a resiliência, a promoção da redundância por meio da investigação de fontes locais alternativas complementares ao abastecimento hídrico existente é uma prática essencial para lidar com a incerteza climática e a escassez hídrica. A utilização de soluções complementares, para compensar falhas de um dado sistema principal, diminui os impactos das crises e estabelece uma rede de segurança, aumentando a resiliência e sustentabilidade na gestão de recursos hídricos.

1.3 Objetivos

Este trabalho visa modificar o índice W-ScaRI (Water Scarcity Risk Index) (Thomaz, 2023), que é uma ferramenta de análise multicritério, que avalia o risco de escassez hídrica e suas consequências com base no perigo de escassez e na vulnerabilidade do sistema socioeconômico afetado, propondo a introdução simplificada do conceito de resiliência. Nesse sentido, o foco principal recai na avaliação do subíndice de consequências, visando identificar fragilidades em sua representação, para propor a sua complementação com a introdução de um indicador de resiliência. Em princípio, o conceito de resiliência será explorado pelo uso de redundâncias de fontes de abastecimento. Esse aprimoramento do índice permitirá avaliar medidas que aumentem a capacidade do sistema de se adaptar, recuperar e manter sua funcionalidade sob condições de estresse hídrico. A análise da modificação proposta no W-ScaRI será testada em uma aplicação para a bacia do rio Paraíba do Sul, com análise específica para as cidades de Barra Mansa e Volta Redonda.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Revisar os conceitos relacionados à gestão de risco de seca;
- b) Aplicar o índice W-ScaRI ao Rio Paraíba do Sul, nos locais de captação para abastecimento dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, considerando os indicadores de perigo de seca, exposição e vulnerabilidade (*W-ScaRI*), em um momento de reconhecida escassez, com resultados de avaliação do risco para cada um dos municípios estudados;
- c) Incluir, no índice originalmente proposto, uma metodologia simplificada para avaliação da resiliência, para que seu uso esteja inserido na gestão estratégica de risco de seca em bacias, permitindo avaliar ações que produzam redundância de abastecimento ao sistema;
- d) Identificar possíveis ações que permitam aumentar a resiliência do abastecimento dos municípios em estudo – buscando fontes alternativas locais, por exemplo;
- e) Aplicar o índice modificado, para testar e avaliar a funcionalidade e viabilidade da metodologia modificada e fazer o diagnóstico dos dois municípios selecionados;

1.4 Metodologia Resumida

O rio Paraíba do Sul foi escolhido como caso de estudo para esta dissertação, por ser o rio mais importante do estado do RJ, responsável pelo abastecimento de cerca de 12 milhões de habitantes, e por contar com muitos estudos e informações disponíveis.

Considerando o seu percurso, a região especificamente escolhida foi o Médio Paraíba do Sul. Dentro desta região, intencionalmente, foram escolhidos dois municípios próximos geograficamente (Barra Mansa e Volta Redonda), para fazer testes de utilização do *W-ScaRI* em uma situação em que o perigo natural é semelhante, mas as condições de demanda pela água, oferta local e consequências socioeconômicas são diferentes e permitem comparações. Destaca-se que o *W-ScaRI* é um produto de dois subíndices, perigo e consequências, ele reflete uma situação de ameaça potencial de dano, ao combinar a atuação do perigo sobre um sistema, dada a exposição e vulnerabilidade desse sistema aos impactos ambientais, sociais e econômicos da seca. Nesse contexto, o subíndice de perigo refletirá a situação da bacia do Rio Paraíba do Sul, enquanto o subíndice de consequências será associado às condições sócio-econômico-ambientais dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, para os quais os valores finais do *W-ScaRI* serão calculados.

Assim, pretende-se avaliar os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, através da aplicação do *W-ScaRI*, de forma a realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos para a situação atual, para a incorporação de fontes alternativas de água, que produzam algum incremento de oferta/redundância e para uma possível modificação da avaliação de disponibilidade em nível local.

Esta dissertação volta seu foco, portanto, para a análise da exposição e da vulnerabilidade de sistemas socioeconômicos (as cidades de Barra Mansa e Volta Redonda, no caso em questão) aos impactos de uma possível escassez. Para evitar uma variabilidade introduzida por diferentes condições de perigo, o que introduziria ruídos nas análises das consequências sobre o sistema, adota-se a hipótese de mesmo perigo para os dois municípios, considerando as suas captações, para todos os fins práticos de cálculo, no mesmo ponto da bacia do Rio Paraíba do Sul.

Considerando os conceitos relacionados à gestão estratégica de riscos, o conceito de resiliência vai ser trazido à discussão, uma vez que não foi contemplado pelo índice original, e será trabalhado como uma possibilidade de aprimoramento do W-ScaRI.

Esse aprimoramento pode trazer maior espectro de utilização para o índice, no cálculo do risco de escassez hídrica, pensando, por exemplo, em como a introdução de redundâncias, ainda que parciais, com o uso de fontes alternativas de abastecimento, pode atenuar o risco. Em uma primeira aproximação, busca-se uma representação inicial simples para a resiliência, para esta primeira adaptação, de forma a verificar se o ganho pode realmente ser representativo sob o ponto de vista da construção de uma ferramenta mais robusta de suporte à gestão e, ao mesmo tempo, mais flexível e representativa. A inserção deste componente de resiliência pode dar apoio à gestão de risco, minimizando consequências adversas de eventos de seca, bem como fomentar a busca por possíveis soluções que aumentem a resiliência, utilizando o W-ScaRI.

Note-se que, enquanto a vulnerabilidade tem uma relação com a fragilidade do sistema e valores perdidos, a resiliência entrará como um contraponto a essa situação, reduzindo a vulnerabilidade e introduzindo fontes alternativas/adicionais ao processo e, consequentemente, reduzindo o risco final, com expectativas de menores danos, sendo este um aspecto central e inovador desta dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A distribuição espacial da população no mundo apresenta uma marcante desigualdade. Dados estatísticos indicam que aproximadamente 45% das terras do planeta são praticamente desabitadas, enquanto 60% dos 7,7 bilhões de habitantes concentram-se em apenas 9% da superfície terrestre. Essa disparidade está diretamente relacionada à distribuição da precipitação, que ocorre predominantemente nas regiões equatoriais e em áreas costeiras. No entanto, a disponibilidade de água doce é frequentemente inferior ao volume total de precipitação registrado (Oki & Quioco, 2020). A Figura 2 ilustra a distribuição global de água doce per capita.

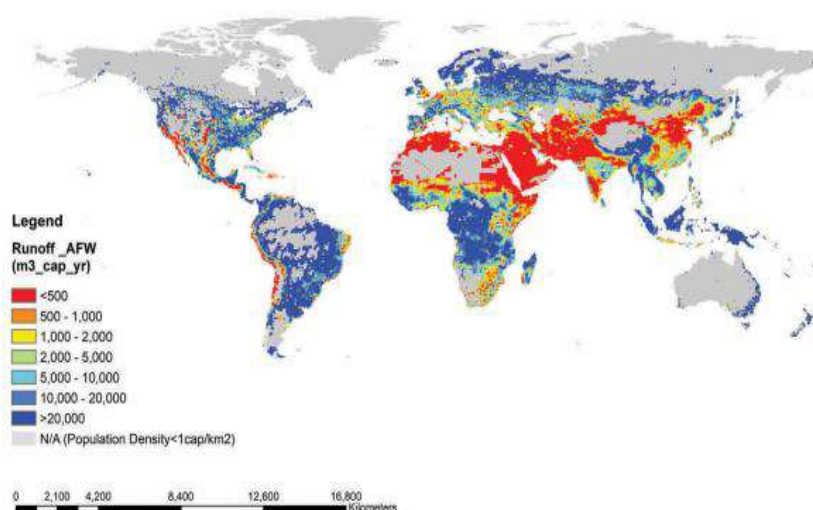


Figura 2. Distribuição espacial de água doce disponível no mundo (m³/capita/ano). Fonte: Oki & Quiócho, 2020.

A escassez hídrica é, em grande parte, consequência ao crescimento populacional em áreas onde os recursos hídricos são limitados. Estima-se que cerca de 40,7 milhões de pessoas residem em áreas que enfrentam sérias restrições econômicas e escassez de água. Essas regiões estão predominantemente localizadas em zonas semiáridas da África Subsaariana, Oriente Médio e Ásia Central. Em uma perspectiva global, áreas com recursos hídricos limitados, como regiões áridas, mostram-se particularmente vulneráveis a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e ondas de calor intenso (Oki & Quiócho, 2020).

2.1 Secas

A seca é um evento natural que ocorre em praticamente todas as regiões climáticas. Trata-se de um perigo natural, complexo e generalizado, frequentemente referido como um "fenômeno rastejante" devido à sua evolução lenta e dificuldade de determinar com precisão seu início e fim (Wilhite, 2011). Diferentemente de outros desastres naturais, a seca se desenvolve gradualmente e muitas vezes não atrai a atenção da comunidade em seus estágios iniciais. Seus impactos, contudo, podem se estender por períodos prolongados, mesmo após o término do evento, abrangendo uma vasta extensão espacial e temporal (Molinas & Lima, 1999).

Uma das principais dificuldades no estudo da seca decorre da ausência de uma definição padronizada e mundialmente reconhecida. Visto que existem múltiplas definições, a existência da seca e seu grau de severidade devem ser determinados por região, considerando-se as características climáticas e os impactos resultantes do período seco (WMO, 2006).

É fundamental diferenciar a seca de outros conceitos relacionados, como aridez, escassez hídrica e desertificação. A aridez refere-se à condição climática permanente de uma região, caracterizada por baixa umidade, alta radiação solar e amplas variações de temperatura. A escassez hídrica ocorre quando a demanda por água supera a disponibilidade hídrica local. Já a desertificação está associada a mudanças ambientais de longo prazo, geralmente impulsionadas por alterações climáticas e atividades antrópicas, como a degradação do solo e a remoção de mata ciliar. E finalmente, a seca decorre do déficit de precipitação (Santos, 2020).

A percepção da seca está muito relacionada à perspectiva do observador. Para agricultores, a seca pode ser percebida através da ausência de chuva e redução da umidade do solo. As companhias de abastecimento podem se basear muitas vezes no monitoramento frequente dos níveis dos reservatórios. Já a Defesa Civil aborda a estiagem como a redução e ausência da precipitação em determinado período ou, atraso do período chuvoso, levando à perda da umidade do solo, e, como seca, um período de estiagem prolongada, com consequente redução das reservas de água e problemas socioeconômicos. Essas diferenças na percepção e o fato de que as magnitudes de cada um desses efeitos não são necessariamente as mesmas, dificultam a escolha de uma conceituação única para o fenômeno.

Diante dessa complexidade, para descrever a seca, busca-se adequar o tema de abordagem, seja ele relacionado à precipitação, agricultura, hidrologia e à socioeconomia. De acordo com Wilhite (2003), os tipos de seca podem ser caracterizados em estágios, conforme Figura 3.

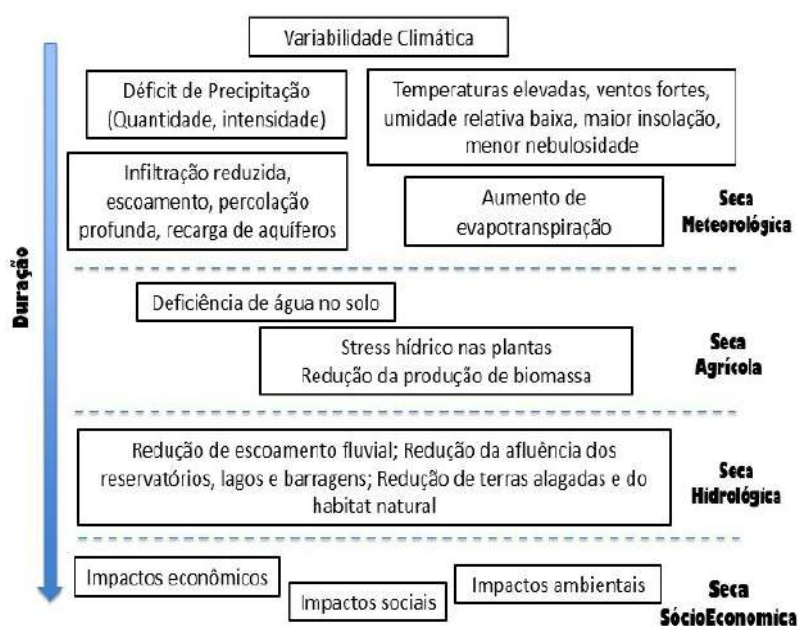


Figura 3. Estágios da seca. Fonte: Costa *et al.*, 2022.

Como reflexo de sua complexidade, existem diversas definições de seca, refletindo diferentes características climáticas por região e impactos específicos por setor (Wilhite & Glantz, 1985). Os impactos das secas repercutem na economia e produzem impactos em cascata, aumentando em intensidade à medida que a deficiência de precipitação evolui. Inicialmente, a falta de chuvas de curto prazo caracteriza a seca meteorológica. Caso a deficiência persista, surge a seca agrícola, associada à redução da umidade do solo, afetando a produção agrícola. Com a continuidade da escassez hídrica, instala-se a seca hidrológica, impactando os sistemas hídricos, como reservatórios, lagos, vazões e níveis freáticos, comprometendo diversos setores dependentes da água (Wilhite, 2011).

A severidade da seca, tanto no âmbito temporal quanto espacial, pode ser agravada por outros fatores, como altas temperaturas, baixa umidade relativa e ventos fortes, comprometendo a capacidade de atender às demandas das atividades humanas. As secas, sendo fenômenos ubíquos, apresentam desafios emergentes para planejamento e gestão, incluindo a incorporação de processos físicos e a interação com o ambiente circundante, que são altamente complexos (Karavitis, 1998).

2.2 Escassez Hídrica

Enquanto as secas são fenômenos naturais decorrentes da insuficiência de precipitação, a escassez hídrica é, em grande parte, resultante das ações humanas, especialmente quando a infraestrutura de gestão dos recursos hídricos não consegue acompanhar a crescente demanda hídrica (Thomaz, 2023).

Rijsberman (2006) classifica a escassez hídrica em dois tipos principais: física e econômica. A escassez física de água refere-se à insuficiência ou à própria falta de água, sendo frequentemente observada em regiões áridas. Por outro lado, a escassez econômica de água ocorre quando, apesar da disponibilidade de recursos hídricos, a deficiência na infraestrutura e na gestão impede o acesso adequado à água (Oki & Quioco, 2020). A escassez econômica reflete uma condição em que a água pode estar em quantidade total de água suficiente, mas a ausência de recursos financeiros, tecnológicos ou humanos não garante sua distribuição e uso eficiente.

Para um entendimento mais abrangente, Hussain *et al.* (2022) propõem outras categorias de escassez hídrica: a escassez institucional, que ocorre quando há falhas na formulação de políticas e na implementação de tecnologias que poderiam equilibrar oferta e demanda de água; e a escassez política, que manifesta-se quando determinadas populações são privadas do acesso aos recursos hídricos devido a restrições políticas ou desigualdades estruturais.

A escassez de água frequentemente resulta em estresse hídrico, manifestado em insegurança no fornecimento de água potável, acesso inadequado, problemas de saúde, conflitos pelo uso dos recursos hídricos, falhas nas colheitas, insegurança alimentar e/ou energética (Moura *et al.*, 2020).

Altos níveis de escassez de água são observados em diferentes cenários. Regiões densamente povoadas, como Londres, enfrentam desafios devido à elevada demanda, enquanto áreas com extensa agricultura irrigada, como nos Estados Unidos, apresentam pressão significativa sobre os recursos hídricos. Em locais onde ambas as condições coexistem, como a Índia, o leste da China e o delta do Nilo, o estresse hídrico é ainda mais crítico (Mekonnen & Hoekstra, 2016).

Também há regiões que, apesar de não apresentarem populações densas nem agricultura irrigada intensa, enfrentam escassez hídrica devido à baixa disponibilidade natural de água, como os desertos do Saara (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Por outro lado, países que possuem reservas hídricas significativas, mas enfrentam limitações econômicas para desenvolver infraestrutura adequada, sofrem impactos severos da escassez, como observado em diversas nações africanas (Liu *et al.*, 2017).

A mesma seca pode gerar impactos distintos em diferentes regiões, mesmo que apresente intensidade, duração e características espaciais semelhantes. Essas variações decorrem das diferenças nas condições socioeconômicas e nos níveis de vulnerabilidade da população afetada (Dakova & Stanev, 2007).

Diante desses desafios, estratégias para aprimorar a gestão da água e mitigar os efeitos da escassez hídrica devem considerar abordagens inovadoras. Estudos futuros devem explorar temas como o comércio virtual de água, a variabilidade interanual da escassez, as flutuações espaciais e temporais dos recursos hídricos e o aperfeiçoamento de metodologias para estimar os requisitos de fluxo ambiental por bacia hidrográfica. Além disso, é fundamental avaliar os impactos das mudanças climáticas, que podem intensificar significativamente os cenários de escassez hídrica (Liu *et al.*, 2017).

2.3 Vulnerabilidade

Há diferentes abordagens que caracterizam a vulnerabilidade por meio de diversos componentes. Birkmann & Wisner (2006) identificaram cinco dimensões principais: físico, social, econômico, ambiental e institucional. Optando pela abordagem consensual de vulnerabilidade, combinando três elementos fundamentais – exposição, sensibilidade e capacidade de enfrentamento – permite-se levar em conta as fontes de perigo, mas também a resposta das sociedades aos eventos. O cálculo de vulnerabilidade tem limitações como a escolha dos dados, pela complexidade dos fatores geradores de vulnerabilidade e a subjetividade dos indicadores usados (Paegelow *et al.*, 2022).

Segundo o IPCC (2007), a vulnerabilidade é compreendida por três dimensões: (i) exposição à variabilidade e aos extremos climáticos, como secas e seus atributos de intensidade, duração e alcance; (ii) sensibilidade, que define o grau de impacto sofrido pelo sistema afetado; e (iii) capacidade adaptativa, relacionada à habilidade de resposta e adaptação às mudanças ambientais. Conforme ilustrado na Figura 4, essa estrutura facilita a análise integrada da vulnerabilidade no contexto das mudanças climáticas.



Figura 4. Estrutura representativa para definição da vulnerabilidade, no contexto de mudanças climáticas. Fonte: MMA, 2017.

Assim, a estrutura definida pelo IPCC (2007) para vulnerabilidade apresenta as seguintes definições:

- Exposição à seca representa todas as mudanças do clima relacionadas às componentes que causam a seca meteorológica, como a alteração da média de precipitação (acréscimo ou decréscimo), a variabilidade (maior dificuldade de manter o equilíbrio hidrológico, sobretudo relacionado aos níveis de umidade do solo) e a ocorrência de extremos climáticos de secas (sua frequência/magnitude).
- Sensibilidade à seca representa o efeito biofísico da mudança do clima, considerando o contexto socioeconômico e também ambiental. A união da exposição e sensibilidade configura os impactos potenciais.
- Capacidade Adaptativa à seca refere-se à capacidade de resposta e reorganização dos sistemas humanos diante de mudanças climáticas, sejam elas relacionadas à variabilidade climática ou à ocorrência de extremos.

Em muitos cenários, a vulnerabilidade também é influenciada por respostas inadequadas às mudanças climáticas, que podem não atingir os objetivos pretendidos ou gerar impactos negativos em outras áreas sociais (Gallopín, 2006).

Uma das dimensões fundamentais da vulnerabilidade é a vulnerabilidade social, que diz respeito à suscetibilidade de uma população, sistema ou território a ser adversamente impactado por perigos ambientais, tecnológicos ou econômicos. Essa vulnerabilidade influencia diretamente a capacidade de preparação, resposta e recuperação diante de desastres e é determinada por fatores espaciais, sociais, econômicos, demográficos, ambientais, culturais e institucionais. Além disso, sua manifestação pode variar ao longo do tempo e do espaço, de acordo com as diferenças geográficas, as condições locais e os riscos externos (Li & Wang, 2022)

Estudos recentes sobre vulnerabilidade social abordam mudanças climáticas, desastres naturais, urbanização, desenvolvimento do turismo, doenças infecciosas, poluição, segurança pública e resiliência (Li & Wang, 2022). Os sistemas sociais, enquanto estruturas complexas, frequentemente enfrentam múltiplas pressões simultaneamente, o que influencia a gestão de riscos e a tomada de decisões adaptativas. Essa complexidade pode tornar a vulnerabilidade um fenômeno dinâmico e mutável ao longo do tempo.

Diante disso, a implementação de mecanismos eficientes de monitoramento e controle da vulnerabilidade é essencial para mitigar os impactos de desastres desde sua origem, contribuindo para a resiliência das populações e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Embora o conceito de vulnerabilidade seja multidimensional e tenha evoluído ao longo do tempo, ainda existem desafios significativos tanto na sua definição quanto na sua operacionalização. A complexidade desse conceito dificulta a obtenção de um consenso entre diferentes áreas do conhecimento, o que impacta sua aplicabilidade em análises e políticas públicas (Moura *et al.*, 2020).

No contexto específico da vulnerabilidade relacionada à escassez hídrica, Perveen & James (2011) a definem como a “vulnerabilidade de uma região resultante da disponibilidade finita de recursos hídricos e do uso intensivo da água”.

Nesse caso, a avaliação da vulnerabilidade contribui para identificar insuficiências, ausências ou fragilidades relacionadas aos recursos hídricos e à sua correlação com outros sistemas em uma determinada região. Para serem úteis aos atores e formuladores de políticas de água no suporte à tomada de decisões, essas avaliações precisam ser holísticas. Entretanto, a avaliação dessas vulnerabilidades enfrenta limitações, como a escolha dos indicadores, a subjetividade inerente ao processo, a complexidade dos fatores que influenciam a vulnerabilidade, além da qualidade e disponibilidade dos dados, bem como as especificidades regionais (Gleick, 2015).

As diferenças na vulnerabilidade variam em escalas regionais e locais devido às interações entre estressores climáticos, contextos e condições específicas, como localização geográfica, políticas, condições socioeconômicas, globalização, urbanização e desenvolvimento de infraestrutura.

Um conceito que sintetiza os diferentes fatores contextuais que afetam a vulnerabilidade é o da "dupla exposição" (*double exposure*), que expressa a ação combinada das mudanças climáticas e da globalização sobre populações, grupos sociais e setores. Essa abordagem indica que os problemas sociais, políticos e econômicos interagem com os fatores de mudanças climáticas, aumentando a vulnerabilidade de alguns atores enquanto diminuem a de outros (O'Brien & Leichenko, 2000).

Em regiões com escassez hídrica, políticas de gestão da água são fatores críticos que podem intensificar ou mitigar a vulnerabilidade. Zúñiga-Terán *et al.* (2020) demonstram que as políticas hídricas em regiões áridas interagem com políticas fundiárias e neoliberais entre setores em diferentes escalas, exacerbando vulnerabilidades desproporcionalmente para grupos menos privilegiados e aumentando as disparidades. As populações mais pobres geralmente são as mais vulneráveis a desastres e mudanças climáticas.

Miguez, Gregório e Verol (2017) afirmam que a vulnerabilidade atua no sentido oposto à resiliência, reduzindo a capacidade de recuperação e de resistência dos sistemas e a resiliência da comunidade como um todo. Um caminho mais eficaz para aumentar a resiliência às mudanças do clima é o desenvolvimento sustentável, pois aborda os problemas subjacentes que tornam as populações mais vulneráveis (Suassuna, 2014).

2.4 Gestão de Riscos

Segundo a Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres (UNISDR), o risco é uma função da ameaça (perigo), da exposição de pessoas e bens a essa ameaça, e das condições de vulnerabilidade das populações e bens expostos (UNISDR, 2012). Assim, torna-se essencial que seja feita uma abordagem holística para a compreensão do risco e da vulnerabilidade (Dos Santos *et al.*, 2015). O conceito de risco é polissêmico, sua análise tem se tornado fragmentada em função das diferentes perspectivas de entendimento (Dos Santos *et al.*, 2015). Uma das formas de classificar o risco é de acordo com os fenômenos que constituem o perigo. A seca, por exemplo, é um fenômeno natural que, dependendo da sua magnitude, pode ser desastrosa, com impactos nas esferas socioeconômica, agrícola e ambiental. O aumento da população e o comprometimento crescente da disponibilidade hídrica fazem com que a escassez de água, principalmente durante os períodos de baixas precipitações, se torne uma ameaça/perigo cada vez mais presente (Costa *et al.*, 2019). Portanto, tal risco tem origem tanto em questões sociais como naturais.

O risco associado à seca é um reflexo tanto da exposição de uma região às condições de estiagem quanto de sua vulnerabilidade. A exposição é definida pela frequência e gravidade das secas históricas ocorridas e pelas tendências atuais, enquanto a vulnerabilidade é determinada por uma série de fatores, como crescimento populacional, migração, mudanças no uso da terra, tecnologia, urbanização, degradação ambiental, uso da água e políticas governamentais. Esses fatores evidenciam a importância de acompanhar as mudanças e tendências em cada um deles como parte de uma estratégia de planejamento e mitigação da seca (Wilhite, 2011).

A abordagem adotada por praticamente todos os governos para gestão de secas, tanto em nível nacional quanto local, é reagir à seca através do que é comumente chamado de "ciclo hidro-ilógico". O "ciclo hidro-ilógico", baseado nas observações de Wilhite (2011) em casos de grandes secas, funciona, resumidamente, assim: dentro de uma seca que parece não ter fim, surge o pânico e o desespero; com a chegada da chuva, vem o alívio e, com o tempo, uma irracional apatia, na qual tanto a população quanto o Poder Público deixam de se preparar para uma nova seca. Quando a seca novamente ocorre, o pânico ressurgue, em um círculo vicioso totalmente desprovido de lógica, chamado de "ciclo hidro-ilógico", pode ser observado na Figura 5.

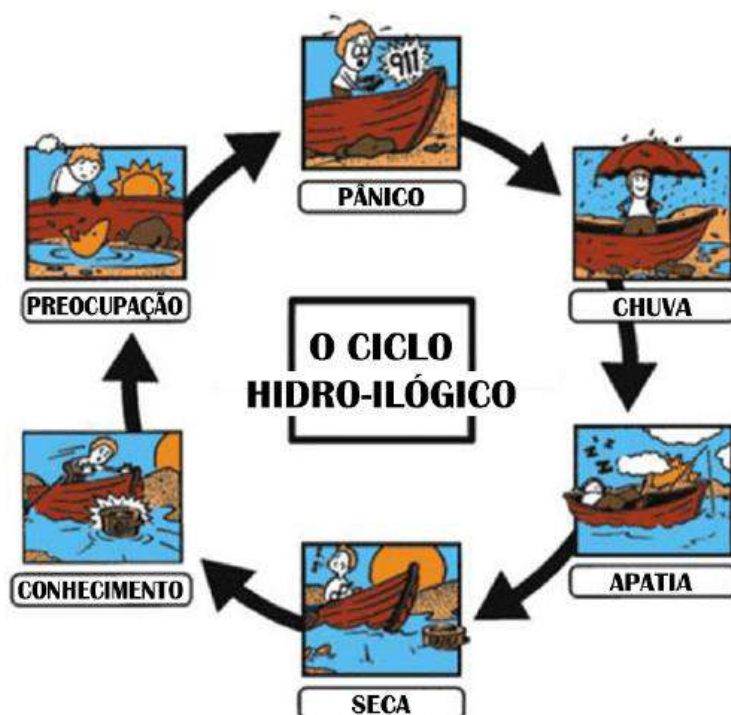


Figura 5. O ciclo hidro-ilógico. Fonte: adaptado de NDMC (2019).

Essa abordagem reativa é caracterizada por um nível crescente de preocupação à medida que a severidade da seca aumenta durante um período de vários meses ou mais. Esse tipo de resposta à crise é geralmente direcionado para lidar com os impactos sociais, ambientais e econômicos, que refletem a vulnerabilidade da região. Apenas fornecendo recursos para sobreviver à crise, essa estratégia desencoraja o desenvolvimento e a implementação de uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos (Wilhite, 2011).

Para reduzir a vulnerabilidade da sociedade, é imperativo que as nações se afastem da abordagem reativa de gestão de crises para adotar uma gestão proativa baseada no risco da seca (Wilhite, 2011). Esta abordagem baseada no gerenciamento de riscos é ilustrada na Figura 6, demonstrando a composição do ciclo de desastres, pelos elementos de gerenciamento de crises e de riscos.



Figura 6. Ciclo de gestão de desastres. Fonte: Costa *et al.*, 2022.

No contexto da transformação da sociedade rumo a um futuro sustentável, a Gestão Estratégica de Risco de Seca (GERS) estabelece conexões mais estreitas com o planejamento urbano em comparação com a Gestão Convencional de Risco de Desastres. Essa abordagem prioriza estratégias para ampliar a oferta hídrica excedente e influenciar padrões de desenvolvimento urbano, de modo a promover eficiência e resiliência ao risco de seca. Para promover maior resiliência, é imprescindível priorizar para a parte de gerenciamento de risco do ciclo de desastres (Sayers *et al.*, 2016).

Uma forma crucial de promover resiliência é a diversificação das fontes para aumento da oferta hídrica, promovendo redundâncias no abastecimento de uma região. A criação de sistemas alternativos e locais, como coleta de águas pluviais, reutilização de águas residuais e dessalinização, reduz a dependência de uma única fonte de abastecimento. Essas estratégias buscam criar uma infraestrutura mais robusta e diversificada, garantindo que a sociedade disponha de recursos suficientes e resilientes para enfrentar períodos de seca e outros desafios relacionados (Sayers *et al.*, 2016).

2.5 Resiliência

O conceito de resiliência, originalmente aplicado na Ecologia, foi expandido para as ciências sociais, sendo definido como a capacidade de um sistema de absorver perturbações e se reorganizar, mantendo suas funções essenciais (Walker *et al.*, 2004).

Holling (1973) define resiliência como a capacidade de um sistema de preservar ou recuperar sua funcionalidade diante de perturbações, sendo um conceito aplicável a sistemas complexos em condições dinâmicas. Adger (2000) expandiu o conceito ao introduzir a resiliência social, definida como a capacidade de grupos ou comunidades de lidar com tensões externas e distúrbios causados por fatores sociais, políticos e ambientais. Em 2004, Walker *et al.* apresentaram a resiliência socioecológica, que enfatiza a adaptabilidade e a reorganização de sistemas em cenários onde o futuro é incerto (Garzón & Castaño, 2018).

O Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR, 2010) amplia essa definição, descrevendo resiliência como a capacidade de um sistema (ou sociedade) exposto a perigos de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se de seus efeitos de maneira eficiente, preservando e restaurando suas estruturas e funções básicas essenciais.

No contexto do desenvolvimento sustentável, a resiliência é um fator essencial para aumentar a capacidade das sociedades de se adaptar a desastres, preservando o status quo em cenários de rápidas transformações (Munn, 1992). A sustentabilidade de sistemas complexos depende de poucas variáveis críticas como o potencial, que define as opções futuras disponíveis para o sistema; a conectividade, que mede a flexibilidade ou rigidez do sistema; e a resiliência, que avalia a capacidade do sistema em lidar a choques inesperados (HOLLING, 2001).

A Figura 7 evidencia a interconexão entre os conceitos de resiliência, vulnerabilidade, capacidade de adaptação e sustentabilidade (Suassuna, 2014).



Figura 7. Conceitos relacionados. Fonte: Suassuna, 2014.

O Plano Nacional de Mudanças Climáticas (2008) reforça que, quanto menores as vulnerabilidades e maior a resiliência, melhores serão as condições de adaptação de um sistema aos impactos climáticos. Nesse contexto, a capacidade adaptativa envolve respostas que minimizam danos e aproveitam oportunidades, dependendo da vulnerabilidade e resiliência do sistema. Enquanto a vulnerabilidade reflete a suscetibilidade às mudanças climáticas, a resiliência representa a habilidade de absorver impactos, mantendo sua estrutura e funcionamento básicos.

No âmbito urbano, Godschalk (2003) define uma cidade resiliente como uma rede sustentável que integra sistemas físicos (como infraestrutura urbana e cursos d'água) e comunidades humanas. A UNISDR (2009) complementa esse conceito, destacando que uma cidade resiliente deve:

- Assegurar participação popular no planejamento e tomada de decisões, otimizando capacidades e recursos.
- Promover uma gestão pública eficiente e prevenir desastres por meio de infraestrutura e serviços adequados.
- Conscientizar a população sobre riscos e vulnerabilidades.
- Priorizar medidas de prevenção, preparação e mitigação de perdas em desastres.
- Investir na redução de riscos e garantir a rápida restauração de serviços básicos e atividades socioeconômicas após desastres.
- Incorporar a adaptação às mudanças climáticas ao planejamento urbano (UNISDR, 2009).

Nos sistemas de drenagem urbana, a resiliência é um elemento central para enfrentar eventos críticos que impactam a dinâmica das cidades, garantindo níveis adequados de proteção e sustentabilidade. A resiliência tem sido tradicionalmente associada à integridade estrutural dos sistemas, representando a capacidade de suas partes físicas em assegurar um desempenho contínuo mesmo sob condições extremas. Esse desempenho é sustentado por princípios básicos como robustez, redundância, recursos e rapidez (Yusta *et al.*, 2011; Gay, 2016). A robustez refere-se à capacidade intrínseca do sistema em suportar demandas externas sem sofrer

degradações significativas ou perda de funcionalidade. A rapidez está relacionada à velocidade com que o sistema pode retornar à normalidade após uma interrupção. Recursos representam a capacidade de mobilizar capital humano, financeiro e materiais necessários para lidar com emergências. E, por último, a redundância aponta as propriedades que permitem ao sistema contar com alternativas ou substituições em situações de estresse (Bruneau *et al.*, 2003).

A redundância é frequentemente avaliada pela magnitude e duração de uma perturbação, funcionando como um indicador-chave de resiliência. Estratégias para aumentar a redundância fortalecem a capacidade dos sistemas de drenagem de suportar eventos adversos e acelerar o processo de recuperação, promovendo não apenas a resiliência, mas também a sustentabilidade das infraestruturas urbanas em longo prazo (Bruneau *et al.*, 2003).

2.5.1 Redundância

A redundância refere-se à capacidade de um sistema contar com elementos de reposição, sistemas de apoio e recursos alternativos, garantindo a continuidade de funções essenciais mesmo diante de falhas ou tensões na infraestrutura. Esse planejamento deliberado de capacidades excedentes reduz a probabilidade de colapso do sistema, promovendo resiliência e estabilidade frente a eventos adversos (Garzón & Castaño, 2018).

Esse conceito pode ser entendido como uma ferramenta estratégica para fortalecer a capacidade de resposta a riscos, como a seca, por meio de soluções flexíveis e multifuncionais. Tais abordagens permitem que as comunidades gerenciem melhor os riscos hídricos e mantenham a segurança hídrica mesmo em condições adversas (Sayers *et al.*, 2016).

No contexto da gestão de recursos hídricos, o desenvolvimento de redundância e excedente de oferta são fundamentais para mitigar os riscos associados à seca. Essa abordagem envolve a diversificação de fontes alternativas de água, como reutilização e armazenamento, aliada à implementação de medidas para reduzir a demanda. A incorporação dessas estratégias torna a infraestrutura mais resiliente e preparada para lidar com variações extremas de disponibilidade hídrica. A inclusão de fontes alternativas e a gestão progressiva da demanda representam uma inovação na gestão de riscos de seca (Sayers *et al.*, 2016).

No contexto urbano, Mugume *et al.* (2015) foram pioneiros na avaliação de alternativas redundantes para aumentar a resiliência de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável, enfrentando desafios como inundações causadas por falhas estruturais ou funcionais.

De forma geral, a introdução de redundância em sistemas críticos tem o potencial de reduzir tanto a magnitude quanto a duração das falhas no sistema, ao mesmo tempo em que melhora a capacidade de absorção e diminui a severidade dos impactos. Além disso, a capacidade de absorção atua ao longo de toda a duração da perturbação, contribuindo significativamente para a redução da severidade do impacto. Cada unidade de severidade, mitigada pelo excedente, reforça a resiliência geral do sistema, tornando-o mais robusto e preparado para enfrentar eventos futuros em comparação ao estado inicial. Esse conjunto de benefícios demonstra como a redundância pode ser fator central na promoção de sistemas mais resilientes, garantindo maior capacidade de adaptação e recuperação frente a perturbações.

Em cenários de escassez hídrica, a implementação de portfólios de medidas redundantes oferece maior segurança na gestão dos riscos em comparação com uma abordagem baseada em uma única solução. Por exemplo, um sistema que dependa exclusivamente de um único reservatório terá maior probabilidade de falhar durante uma seca severa. Em contrapartida, estratégias combinadas, como reaproveitamento de águas residuais, redução de vazamentos, construção de reservatórios e de zonas úmidas para recarga de aquíferos, sistemas flexíveis de alocação e gestão de direitos hídricos adaptados à seca, podem criar uma abordagem mais robusta e eficaz (Sayers *et al.*, 2016).

O saldo entre oferta e demanda hídrica é acompanhado de uma margem de segurança ("headroom") ou capacidade de reserva para lidar com incertezas no planejamento. A capacidade de reserva pode ser gerada tanto no lado da oferta (recarga de aquíferos, aumento de capacidade de reservatórios, dessalinização) quanto no lado da demanda (uso mais eficiente, mudanças de comportamento e restrições obrigatórias) (Sayers *et al.*, 2016).

A criação dessa capacidade de reserva é crucial para a preparação contra futuras secas e segue quatro etapas principais:

- Redução da demanda – Minimizar o consumo de água em níveis inferiores à sua taxa natural de renovação, promovendo eficiência no uso e mudanças

comportamentais, como o deslocamento de atividades industriais com usos intensivos de água para áreas com menor vulnerabilidade hídrica.

- Melhor aproveitamento da oferta existente – Implementar alocação flexível de água para atender demandas mínimas e prioritárias, além de incentivar a redistribuição de direitos de uso de água excedente.
- Diversificação das fontes de abastecimento – Incorporar múltiplas fontes, como águas subterrâneas e superficiais, criando uma reserva que pode ser ativada em condições de seca.
- Desenvolvimento de novas fontes de água: Expandir a infraestrutura tradicional, como a construção de novos reservatórios e transferências de água inter-regionais, além de adotar infraestrutura verde, como a restauração de zonas úmidas para recarga de aquíferos.

Essas medidas criam um sistema mais resiliente e flexível para lidar com a variabilidade hídrica, garantindo que o excesso de oferta e a capacidade de reserva estejam disponíveis para enfrentar futuras secas. Ao mesmo tempo, soluções como redes inteligentes para transferência de água, dessalinização e construção de reservatórios enfrentam desafios técnicos, econômicos e ambientais. Por isso, o sucesso dessas iniciativas requer um planejamento cuidadoso e uma avaliação criteriosa dos impactos a longo prazo (Sayers *et al.*, 2016).

2.6 Indicadores como instrumentos de gestão

O conceito de análises integradas, como onexo água-energia-alimento (FEW), baseia-se em abordagens holísticas previamente estabelecidas, como a gestão integrada de recursos hídricos, a gestão integrada de recursos naturais e os princípios do desenvolvimento sustentável. Uma das ferramentas fundamentais para avaliar o nexo FEW é o uso de indicadores, que permitem mensurar e analisar as inter-relações entre diferentes dimensões de um sistema.

Os sistemas de indicadores são compostos por conjuntos de métricas organizadas de maneira lógica para refletir as múltiplas dimensões de um fenômeno (Lira, 2009). O uso de indicadores como suporte para decisões governamentais ganhou relevância na década de 1960, em resposta à insuficiência de dados sociais de qualidade. Durante os anos 1970, houve um

avanço significativo nesse campo, marcado por um otimismo crescente quanto ao potencial dos indicadores sociais para orientar políticas públicas (Carley, 1985).

Na avaliação da escassez hídrica, historicamente, uma diversidade de indicadores tem sido empregada. Os mais amplamente utilizados são a razão retirada/disponibilidade de água (WWR) e a disponibilidade hídrica per capita, ambos com classificações específicas de níveis de escassez (Oki & Quiocho, 2020). Paralelamente, o Produto Interno Bruto (PIB) é frequentemente utilizado para quantificar a atividade econômica. Segundo OKI *et al.* (2017), é raro encontrar países simultaneamente enfrentando desafios econômicos severos e escassez extrema de água. Essa aparente correlação pode ser explicada pela heterogeneidade na distribuição de recursos hídricos e financeiros dentro das nações.

Alguns estudos sugerem que avaliações mais abrangentes da escassez hídrica podem ser realizadas com o uso de múltiplos indicadores numéricos, integrando diferentes dimensões do problema (Falkenmark, Lundqvist & Widstrand, 1989).

Em referência à modelagem da seca, existem várias abordagens, que podem ser probabilísticas, baseado em neurônios artificiais, ou híbridas (geralmente com base em um ou mais índices). Independentemente dos modelos aplicados, os índices utilizados são geralmente uma combinação de fatores climáticos e variáveis hidrometeorológicas (Ihinegbu & Ogunwumi, 2021).

A modelagem de seca envolve múltiplos parâmetros e a análise de decisão multicritério. A abordagem multicritério (MCA) deve ser aplicada para tomar uma decisão mais informada na modelagem da seca (Ihinegbu & Ogunwumi, 2021). As abordagens quantitativas são confrontadas com várias dificuldades relacionadas ao acesso a dados, com dados não homogêneos e dados indisponíveis no espaço ou escalas temporais, e à escolha dos dados, dada a complexidade dos fatores geradores de vulnerabilidade e a natureza por vezes subjetiva dos indicadores utilizados.

Para analisar vulnerabilidades, são considerados vários critérios, combinados por MCA, por um procedimento de padronização de fatores (cada fator, mapeado em unidades originais, convertido em um índice (0 a 1) usando várias funções de associação exigentes) e de ponderação do fator (uma vez padronizado, cada fator é ponderado por várias técnicas, levando

ao fator autovetor). Quanto a qualquer estatística multivariada, como a análise multicritério, são importantes a qualidade e significância dos dados e seu processamento. Os resultados obtidos podem variar muito, e por esta razão, a análise de sensibilidade é necessária (Paegelow, 2022).

Nesse contexto de análise multicritério, destaca-se o Índice de Risco de Escassez Hídrica (W-ScaRI), desenvolvido por Fernanda Rocha Thomaz (2023), como uma alternativa inovadora e eficaz para a avaliação da escassez hídrica. O índice adota uma abordagem integrada, considerando o risco de seca a partir de dois componentes principais: perigo e consequência. Por meio de um conjunto de indicadores e índices selecionados na literatura técnica, o W-ScaRI possibilita representar, de forma abrangente, o risco de escassez hídrica em uma região. Essa abordagem oferece uma visão ampla e detalhada, permitindo um melhor embasamento para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação.

2.6.1 Indicadores de resiliência

A utilização de indicadores como ferramentas fundamentais para a avaliação de políticas públicas e fenômenos sociais, especialmente no âmbito da gestão territorial e da resiliência a desastres, destaca-se pela capacidade de simplificar informações complexas. Os indicadores traduzem dados multidimensionais em métricas acessíveis, facilitando a interpretação de fenômenos sociais, ambientais e econômicos, além de promover a tomada de decisões fundamentadas (Lira, 2009).

Um dos modelos mais amplamente utilizados para a quantificação da resiliência em sistemas urbanos foi desenvolvido por Bruneau *et al.* (2003). Inicialmente aplicado à análise da resiliência de comunidades frente a eventos sísmicos, a versatilidade do modelo permitiu sua aplicação em diferentes contextos, incluindo a resiliência de sistemas de drenagem urbana, fornecendo uma base sólida para análises quantitativas e qualitativas.

Para avaliar a resiliência às condições de escassez hídrica, outros autores como, Barrera *et al.* (2011) utilizaram um indicador de capacidade de resposta na formulação do Índice Holístico de Risco (IHR), que considera três componentes principais para gerar o risco: Ameaça e Vulnerabilidade e a Capacidade de Resposta.

Diferentes abordagens podem ser adaptadas para mensurar a resiliência em sistemas urbanos e outros cenários críticos. Esses modelos têm desempenhado um papel essencial na formulação de estratégias de mitigação e na preparação para desastres, oferecendo insights que contribuem para o planejamento e a gestão eficaz dos sistemas.

3. METODOLOGIA

Autores variados reconhecem que o uso de índices compostos por diferentes indicadores, representando variados aspectos, originalmente com diferentes escalas de medição, evidencia o caráter multidimensional do risco, da vulnerabilidade e da resiliência, podendo ser utilizados em processos de tomada de decisão (Thomaz, 2023). Desta forma, questões complexas podem ser expressas, de forma aproximada, por meio de uma abordagem multifacetada. O uso de uma abordagem multicritério dá suporte a este tipo de representação.

Neste contexto e como base para o desenvolvimento dos estudos referentes à representação do risco de escassez hídrica, o Índice de Risco de Escassez Hídrica (W-ScaRI, ou Water Scarcity Risk Index) foi escolhido como ponto de partida para as pesquisas desta dissertação, com objetivo de integrar um indicador de resiliência a esta ferramenta, uma vez que ele determina o risco de seca, a partir do produto de dois subíndices de perigo e consequência, onde o perigo indica a possibilidade física de escassez de água, enquanto a vulnerabilidade mapeia possíveis efeitos sobre o sistema socioeconômico afetado pela seca, mas sem considerar e aspectos de resiliência.

Neste índice, para a determinação do subíndice de perigo de seca, são utilizados indicadores representativos para caracterização da seca meteorológica, agrícola e hidrológica. Já as consequências refletem subíndices de exposição e vulnerabilidade do sistema aos possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos da seca.

O subíndice de exposição, que reflete a possibilidade de a falta d'água afetar parte do sistema socioeconômico (representando o quanto a demanda se aproxima da disponibilidade), será modificado para introduzir o efeito de fontes alternativas de água, que tornam a disponibilidade mais elástica e afastam a chance de a escassez atingir o sistema em estudo. Essa proposta, relativamente simples, sob o ponto de vista de equacionamento, traz uma nova abordagem conceitual que incrementa a representatividade do W-ScaRI.

É importante ressaltar que a componente de resiliência, que dá o indicativo da capacidade de resistência de um sistema frente a desafios inesperados, bem como da capacidade de reação e recuperação do sistema, não foi contemplada no desenvolvimento do W-ScaRI. Com a nova proposta, fontes alternativas às captações superficiais diretas, associadas ao aproveitamento de águas subterrâneas, uso de dessalinização ou a regularização de vazões com o uso de reservatórios, aparecem como possibilidades de redução do risco de escassez, podendo ser mapeadas na nova versão do W-ScaRI.

Portanto, a partir da revisão do W-scaRI, esta metodologia propõe uma forma de aprimoramento do subíndice de consequências, através de uma alteração na variável de exposição e consequentemente, para que seu uso esteja inserido na gestão estratégica de risco de seca em bacias. Neste trabalho, portanto, é adicionado, especificamente, o indicador *Qresiliência* na componente de exposição.

Este aprimoramento pode auxiliar na análise e avaliação do risco e no planejamento e implantação de ações contínuas e eficazes de planejamento e gestão de recursos hídricos para fins de uma segurança aprimorada do abastecimento.

A avaliação do efeito da modificação proposta será feita com uma aplicação a um estudo de caso, para a Bacia do Rio Paraíba do Sul, tomando um ponto de captação unificado para as cidades de Barra Mansa e Volta Redonda, escolhidas por sua proximidade e suas diferentes características hidrográficas e de uso da água. Hoje, Barra Mansa e Volta Redonda têm pontos de captação próprios, mas, para evitar diferenças associadas a diferentes pontos de avaliação da escassez na bacia, ambas as captações foram consideradas no mesmo ponto do Rio Paraíba do Sul. As características hidrográficas locais mostram que Barra Mansa tem um rio mais caudaloso correndo em seu território, o Rio Bananal, enquanto Volta Redonda conta com um ribeirão mais modesto, o Ribeirão Brandão. Além disso, Barra Mansa capta, basicamente, água para abastecimento humano, enquanto Volta Redonda tem significativo uso industrial. Essas diferenças permitirão uma avaliação exploratória da nova versão do W-ScaRI em casos distintos. Nessa avaliação exploratória, a adição de uma alternativa de abastecimento, para aumento de resiliência, será dada pela consideração, por hipótese, da possibilidade de se introduzir reservatórios de regularização de vazões em todos os afluentes mais significativos do rio Paraíba do Sul, incrementando a disponibilidade de vazões na estiagem.

3.1 Índice de Risco de Escassez Hídrica (W-ScaRI)

Na apresentação da metodologia de pesquisa, cumpre resgatar as principais características do Índice de Risco de Escassez Hídrica (W-ScaRI) desenvolvido por Fernanda Rocha Thomaz (2023). Este índice é determinado a partir de dois componentes principais, como já destacado anteriormente, perigo e consequência.

O perigo é uma situação de ameaça potencial de danos ou prejuízos, formado pela combinação de processos atmosféricos e respostas hidrológicas, que produzem a redução ou perda completa de água, seja em lagos, rios, reservatórios e/ou no solo (Thomaz, 2023). Para determinação do subíndice de perigo de seca, são utilizados 3 indicadores representativos da seca meteorológica, agrícola e hidrológica.

Para a seca meteorológica, é utilizado o índice SPI (Standardized Precipitation Index), desenvolvido por McKee *et al.* (1993). Para a seca agrícola, utilizou-se o índice RDI (Reconnaissance Drought Index), desenvolvido por Tsakiris, Vangelis (2005). Em relação à seca hidrológica, foi usado o índice SDI (Streamflow Drought Index) descrito em Tigkas *et al.* (2015) (Thomaz, 2023).

Já para as consequências, estas refletem a exposição e a vulnerabilidade do sistema aos impactos ambientais, sociais e econômicos da seca. No que diz respeito à exposição foram usados 2 (dois) indicadores: percentual de uso do volume equivalente dos reservatórios presentes no sistema de abastecimento e o estresse hídrico (relação entre as demandas dos diversos usos e a disponibilidade hídrica). No que diz respeito à vulnerabilidade, foram usados 3 (três) indicadores. Em relação ao indicador que representa o impacto ambiental, foi utilizado o indicador balanço hídrico qualitativo, que tem relação com a qualidade da água. Para a vulnerabilidade social, foi utilizado o indicador de densidade populacional, indicando o potencial efeito sobre a população abastecida. Por fim, para a vulnerabilidade econômica, foram usados os seguintes indicadores: PIB per capita e nível de competição com abastecimento humano (Thomaz, 2023). Estes indicadores procuram refletir o risco associado ao funcionamento de atividades industriais.

A relação entre os indicadores e subíndices do índice W-ScaRI é observada na Figura 8. Diagrama dos indicadores do índice W-ScaRI. Fonte: Adaptado de Thomaz (2023).

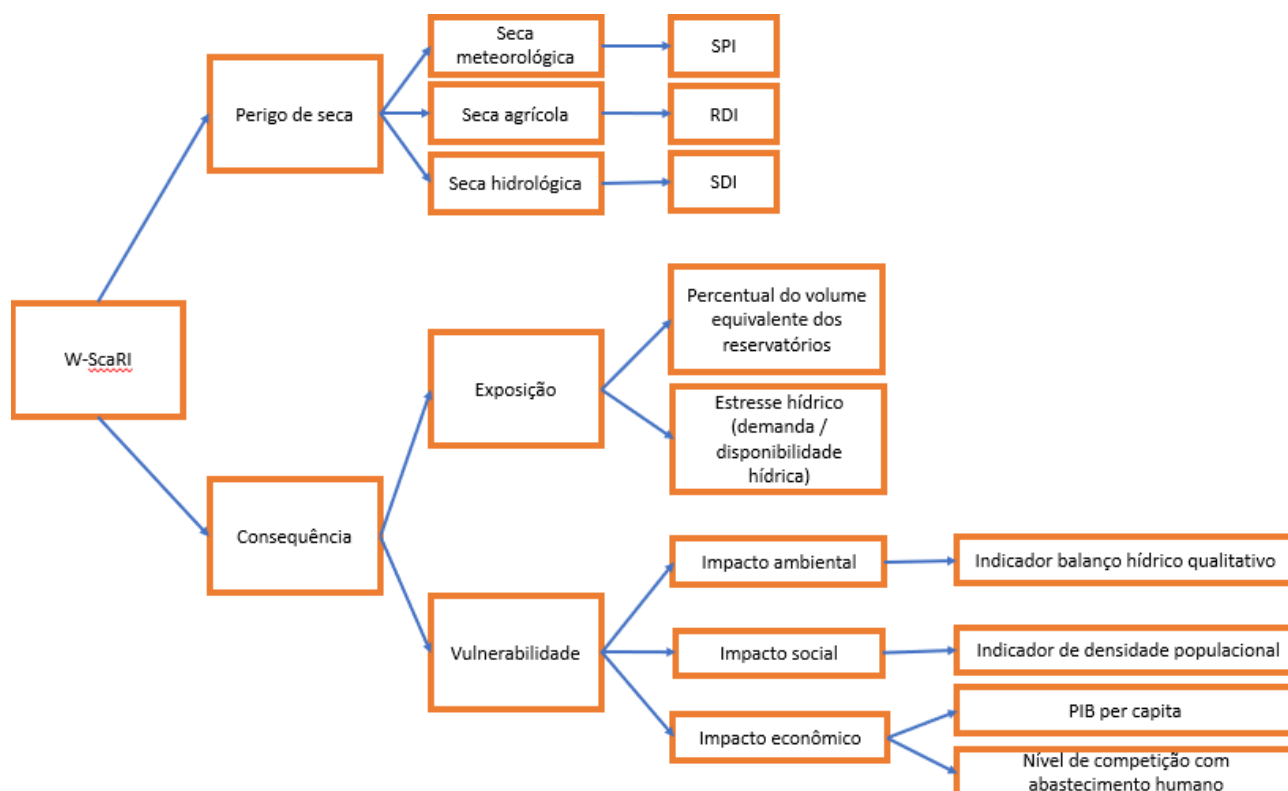


Figura 8. Diagrama dos indicadores do índice W-ScaRI. Fonte: Adaptado de Thomaz (2023).

Cada subíndice (perigo e consequência) é formado por somatórios ponderados e, posteriormente, multiplicados e também ponderados para compor o W-ScaRI. Assim, os componentes de perigo, exposição e vulnerabilidade só serão nulos quando todos os indicadores integrantes da sua formulação forem nulos.

Destaca-se que todos os indicadores variam entre 0 e 1, onde “0” corresponde ao risco mínimo (ou ausência de risco) e o valor de “1” ao risco máximo. Na avaliação final de cada subíndice, são aplicados pesos a cada um desses grupos de indicadores avaliados. Da mesma forma, também são usados pesos para os subíndices no cálculo final do W-ScaRI (Thomaz, 2023).

As equações (1), (2) e (3) mostram a formulação geral do W-ScaRI.

$$W - ScaRI = IP^{pp} \times IC^{pc} \quad (1)$$

Onde:

W-ScaRI – Índice de risco de escassez hídrica, onde “0” é o menor risco e “1” é o maior risco;

IP – Subíndice de Perigo de Seca, onde $0 \leq IP \leq 1$;

IC – Subíndice de Consequência, onde $0 \leq IC \leq 1$;

pp – peso associado ao subíndice de Perigo (IP);

pc – peso associado ao subíndice de Consequência (IC).

$$IP = IPM \times pm + IPA \times pa + IPH \times ph \quad (2)$$

Onde:

IPM – Indicador de Perigo de Seca Meteorológica;

IPA – Indicador de Perigo de Seca de Água Verde ou Agrícola;

IPH – Indicador de Perigo de Seca de Água Azul ou Hidrológica;

pm – peso associado ao indicador de Perigo Seca Meteorológica (IPM);

pa – peso associado ao indicador de Perigo Seca Agrícola (IPA);

ph – peso associado ao indicador de Perigo Seca Hidrológica (IPH);

Os indicadores do subíndice de perigo estão relacionados aos processos atmosféricos (intensidade, duração e frequência das chuvas) e às respostas hidrológicas em lagos, reservatórios, cursos d'água ou aquíferos. Os indicadores utilizados no presente estudo para compor o subíndice de perigo são mostrados na Figura 9.

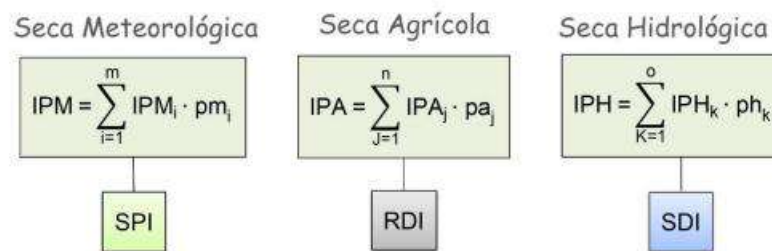


Figura 9. Indicadores de Perigo de Seca. Fonte: Thomaz, 2023.

O Indicador de Perigo Meteorológico (IPM) é obtido através do SPI, índice de padronização da precipitação, sendo este um indicador de chuva que reflete a diferença entre a precipitação medida e a média dos registros de longo termo de dados passados, dividida pelo desvio padrão (Mckee et al., 1993). O cálculo do SPI consiste inicialmente em ajustar a função

densidade de probabilidade Gama à distribuição de frequência da precipitação em diferentes escalas de tempo (1, 3, 6, 12, 24 e/ou 48 meses).

O Indicador de Perigo Agrícola (seca verde) (IPA), obtido através do RDI - Reconnaissance Drought Index, reflete a umidade do solo, balanço entre entrada e saída de água do sistema hídrico. O RDI tem como base a precipitação acumulada (P) e a evapotranspiração potencial (PET) (Tsakiris, Vangelis, 2005). O valor inicial “ α_k ” do RDI é calculado para o i -ésimo ano em uma base de tempo de k meses (duração), através da equação (3):

$$\alpha_k(i) = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ijk}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, i = 1, (1) N \text{ e } j = 1 (1) k \quad (3)$$

Onde:

N é o número total de anos da série de dados disponível,

P_{ij} é a precipitação,

PET_{ij} é a evapotranspiração potencial, correspondentes ao j -ésimo mês do i -ésimo ano e.

Os valores de α_k usada na distribuição Lognormal, a seguinte equação (4) é usada para o cálculo do RDIST:

$$RDIST(i) = \frac{(y(i) - \bar{y})}{\sigma_y} \quad (4)$$

Onde:

$y(i)$ é $\ln(\alpha_k(i))$,

$\bar{y}$ é a média,

σ_y é o desvio padrão e

RDIST é o índice RDI padronizado.

O Indicador de Perigo Hidrológico (seca azul) (IPH), obtido através do SDI - Streamflow Drought Index, reflete as vazões naturais do trecho, é definido pelo volume acumulado de vazão do ano hidrológico, a média e o desvio padrão dos volumes acumulados de vazão e do período de referência (Tigkas et al., 2015).

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad (5)$$

Onde:

$V_{i,k}$ - volume acumulado de vazão do ano hidrológico i e período de referência k .

$\bar{V}_k$ e s_k - média e desvio padrão dos volumes acumulados de vazão do período de referência k em um longo período de tempo.

Para a componente de consequência, temos o indicador de Exposição (IEx) e o Indicador de vulnerabilidade (IV).

$$IC = IEx^{pex} \times IV^{pv} \quad (6)$$

Onde:

IEx – Componente de Exposição;

IV – Componente de Vulnerabilidade;

pex - peso associado ao componente de Exposição;

pv - peso associado ao componente de Vulnerabilidade.

Para a componente de exposição, temos o indicador de Estresse Hídrico (IEx1) e o Indicador do percentual do volume equivalente disponível dos reservatórios do sistema (IEx2).

O indicador de Estresse Hídrico (IEx1) relaciona as demandas de consumo dos diversos usos da água na bacia e a disponibilidade hídrica da bacia, expressa pela equação (7):

$$IEx1 = \frac{Q_{cap}}{Q_{disp}} \quad (7)$$

Onde:

Q_{cap} – Vazão de consumo dos diversos usuários da bacia, (m³ /s);

Q_{disp} – Vazão disponível no curso d'água (m³ /s).

O Indicador do percentual do volume equivalente dos reservatórios (VEqR) – IEx2, obtido através da relação entre o somatório dos volumes úteis acumulados nos reservatórios

existentes na bacia e o somatório dos volumes úteis totais desses reservatórios. Obter o VEqR é uma forma estratégica para representar o efeito conjunto de vários reservatórios em linha. O IEx2 a partir de valores de VEqR, expressos nas equações (8) e (9):

$$\text{VEqR (\%)} = \frac{\sum \text{Vol.útil acumulado Reservatórios na Bacia}}{\sum \text{Vol.útil total Reservatórios Bacia} \times 100} \quad (8)$$

$$\text{IEx2} = 1 - \text{VEqR} / 100 \quad (9)$$

Destaca-se que o indicador ExI2 não poderá ser utilizado em bacias onde não há reservatórios implantados. Assim, nesta situação, o peso do indicador é zero e o peso do indicador ExI1 é 1.

A Componente de Vulnerabilidade urbana à seca (IV) é calculado a partir do somatório ponderado dos indicadores representativos dos componentes de impacto ambiental, social e econômico. Esses indicadores são previamente normalizados, entre 0 e 1, e o subíndice descrito, conforme a Equação (10):

$$\text{IV} = \text{IVA} \times \text{pam} + \text{IVS} \times \text{ps} + \text{IVE} \times \text{pe} \quad (10)$$

Onde:

IVA – Indicador de Vulnerabilidade Ambiental;

IVS – Indicador de Vulnerabilidade Social;

IVE – Indicador de Vulnerabilidade Econômica;

pam - peso associado ao indicador de Vulnerabilidade Ambiental;

ps - peso associado ao indicador de Vulnerabilidade Social;

pe - peso associado ao indicador de Vulnerabilidade Econômica.

Os indicadores de vulnerabilidade são observados na Figura 10.

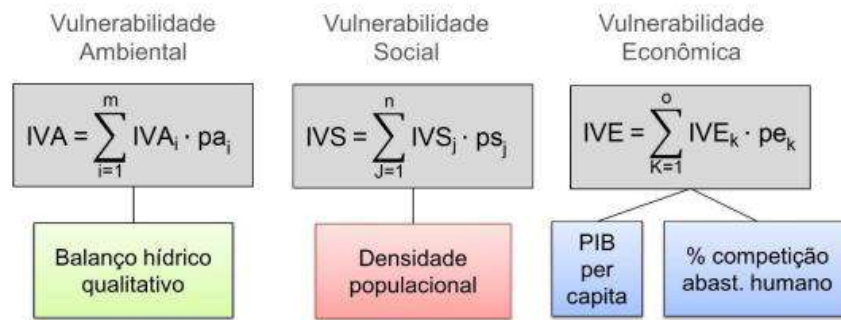


Figura 10. Indicadores de Vulnerabilidade a Seca. Fonte: Thomaz, 2023.

O indicador de Vulnerabilidade Ambiental – IVA é avaliado a partir da utilização do indicador de “Balanço hídrico qualitativo”, expresso na equação (11):

$$Bqual = \frac{(Qdil + Qcons)}{(Qdisp \times 100)} \quad (11)$$

Onde:

Bqual - Balanço qualitativo (%);

Qdil - Vazão de diluição. Vazão necessária para diluir as cargas remanescentes de DBO, considerando o curso d’água com uma concentração de classe 2, referente ao CONAMA 357/95 (m^3/s);

Qdisp - Vazão de permanência de 95% do tempo, disponível na foz do curso d’água ou UHP (m^3/s);

Qcons - Vazão de consumo (m^3/s)

O Indicador de Vulnerabilidade Social - IVS é representado pela densidade populacional, que expressa a relação entre um grupo populacional e a área ocupada por esse grupo. O indicador IVS é calculado para cada município da área de estudo, usando a equação apresentada na Tabela 2. O indicador integrado final é calculado a partir da média ponderada da população de cada município.

Tabela 2. Indicadores de Vulnerabilidade Social. Fonte: Thomaz, 2023.

Densidade Populacional —DP (habitantes/km ²)	Indicador de Vulnerabilidade Social - IVS (0–1)	Equação Ajustada
Município com a maior densidade populacional	1	IVS = a x DP + b Onde DP é a densidade populacional; “a” e “b” são os parâmetros ajustados da equação.
Densidade populacional média do país	0,5	

Para normalizar a densidade populacional, foi utilizada a equação (12).

$$IVS = 6E - 05 \times PD + 0,4985 \quad (12)$$

Esta equação foi ajustada utilizando a densidade populacional média brasileira (vulnerabilidade igual a 0,5) e da cidade de SP (com vulnerabilidade igual a 1). No entanto, esta normalização pode ser revista futuramente, caso se mostre necessário.

O Indicador de Vulnerabilidade Econômica (IVE) utiliza dois indicadores: “PIB per capita” (IVE1), e “Nível de Competição com Abastecimento Humano” (IVE2). O IVE1, a partir da normalização proposta para este indicador, considera apenas o PIB como variável, calculado no Brasil pelo IBGE, é um indicador que mede a atividade econômica de uma região, exposto na Tabela 3.

PIB per capita	Indicador de Vulnerabilidade Econômica – IVE ₁ (0–1)	Equação Ajustada
Município com o maior PIB per capita	1	IVE ₁ = a x PIB + b Onde: “a” e “b” são os parâmetros ajustados da equação.
PIB per capita médio do país	0,5	

Tabela 3. Indicadores de Vulnerabilidade Econômica. Fonte: Thomaz, 2023.

Para normalizar o PIB per capita utilizou-se a equação (13).

$$IVE1 = 0,02 \times \text{PIB per capita} - 0,0856 \quad (13)$$

Thomaz (2023) ajustou a equação utilizando o PIB per capita médio brasileiro, associado a uma vulnerabilidade igual a 0,5, e o PIB per capita da cidade de São Paulo (tomada como referência, por ser a cidade mais importante do Estado com maior PIB) associado ao valor 1. No entanto, esta normalização também pode ser revista futuramente.

O Indicador de Nível de Competição com Abastecimento Humano (IVE2) foi considerado como uma simples relação entre a vazão de captação para abastecimento humano e a vazão total captada na bacia, expresso na equação (14).

$$IVE2 = 1 - \left[\frac{(Q_i - Q_a)}{Q_{cap}} \right] \quad (14)$$

Onde:

Q_i = vazão total captada pelo setor produtivo (m³ /s);

Q_a = vazão total captada pelo setor de abastecimento humano (m³ /s);

Q_{cap} = vazão total captada (m³ /s).

Foram atribuídos valores iguais de peso aos componentes e subíndices de forma que a soma igualasse 1. Desta forma, a soma dos pesos dos indicadores de seca meteorológica (IPM), agrícola (IPA) e hidrológica (IPH) são considerados iguais a 1 no cálculo do subíndice de perigo. Os pesos dos indicadores de exposição e vulnerabilidade são considerados iguais a 0,50, conforme apresentados na Tabela 4.

. Tabela 4. Pesos utilizados no cálculo do W-ScaRI. Fonte: Thomaz, 2023.

Subíndice de Perigo de Seca				Subíndice de Consequência			
Indicadores		Peso	Exposição		Vulnerabilidade		
			Indicadores	Peso	Indicadores		Peso
Seca Meteorológica (IPM)	SPI	0,333	Estresse Hídrico	0,5	Vulnerabilidade Ambiental (IVA)	Bqual	0,333
Seca Agrícola (IPA)	RDI	0,333	% VEqR	0,5	Vulnerabilidade Social (IVS)	DP	0,333
Seca Hidrológica (IPH)	SDI	0,333			Vulnerabilidade Econômica (IVE)	PIB per capita	0,1665
						Competição com abast. humano	0,1665
			Peso exposição = 0,5		Peso Vulnerabilidade = 0,5		
Peso Subíndice de Perigo = 0,5			Peso Subíndice de Consequência = 0,5				

Os pesos representam a importância relativa dos indicadores e subíndices para o valor do risco. A importância de cada indicador é também determinada pela percepção do risco do tomador de decisão, da população ou da política de gestão de risco adotada (Thomaz, 2023).

A adoção de pesos iguais não é uma escolha fixa - ela representa apenas uma escolha inicial, para testes de validação, sem pretensão de representar as escolhas dos usuários e tomadores de decisão.

3.2 Indicador de resiliência

Considerando o conceito global de resiliência abordado no tópico 2.5, que diz que é preciso ter condições de manter o sistema funcionando em situações de estresse hídrico, e que uma das características fundamentais da resiliência é oferecer alternativas ao abastecimento, a proposta deste trabalho se insere em uma reinterpretação da exposição, introduzindo uma exposição atenuada no indicador de estresse hídrico (IEx1) do W-ScaRi, pela existência de uma redundância. A introdução de redundâncias pode reduzir o risco do sistema como um todo (efeito global) ou criar alternativas sustentáveis para um Município ou localidade que pode se beneficiar desta alternativa (efeito local).

Para que os sistemas sejam sustentáveis em condições futuras, é necessário equipá-los com ferramentas que lhes permitam tolerar perturbações e manter níveis aceitáveis de funcionamento. A redundância, como um dos fatores de resiliência, representa a disponibilidade de elementos substituíveis ou alternativos que podem ser ativados em caso de

interrupções dos sistemas de drenagem ou abastecimento atuais (Dominguez Garzón & Galvis Castaño, 2018).

Considerando que a investigação de águas subterrâneas, o reuso industrial, o reaproveitamento da água da chuva, a construção de barragens poderiam ser possibilidades para o aumento da resiliência, para este trabalho foi adotada a opção de construção de pequenos barramentos de reservação de água local como uma oferta de fontes alternativas de captação, como um cenário de teste da metodologia em estudo.

Considerando a hipótese de que as barragens são passíveis de serem construídas na região, esta opção foi escolhida como uma forma de regularizar e armazenar água nos afluentes para aumento da disponibilidade hídrica. Note-se que esta é apenas uma escolha arbitrária para testes, dado que esta possibilidade demanda estudos específicos de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Foi calculado o aumento da resiliência pela consideração da construção de barragens nos principais afluentes da bacia de estudo, arbitrando como padrão (apenas para fins de cálculo rápido) uma capacidade de regularização de 80% das suas vazões médias, considerando a soma das vazões regularizadas destas bacias como um incremento da disponibilidade hídrica.

Os principais afluentes da bacia incremental, entre a Barragem de Funil e as cidades consideradas, foram então identificados pelo viés de mananciais alternativos. A partir de estudos de regionalização de vazões para estas bacias, foram determinadas as possíveis vazões regularizadas.

As análises de resiliência foram divididas em duas: análise de resiliência global, olhando para a bacia em estudo e resiliência local, olhando para o município em relação à bacia principal de captação.

3.2.1 Resiliência global

Olhando para o aumento da disponibilidade hídrica da bacia, com as construções das barragens, foi modificado o indicador de exposição do W-ScaRI da bacia como um todo. Neste trabalho, a redundância está sendo chamada de disponibilidade extra de água, sendo realizado um acréscimo de uma fonte alternativa adicional ao abastecimento atual, somando Qresiliência (Qres) na disponibilidade hídrica, no denominador da equação do indicador de exposição (IEx1), expressos pela equação (15) e (16):

$$IEx1res = \frac{Qcap}{(Qdisp + Qres)} \quad (15)$$

$$Qres = \sum (0,8 * QMédia \text{ dos afluentes na bacia de interesse}) \quad (16)$$

Onde:

Qcap – Vazão de consumo dos diversos usuários da bacia, (m³ /s);

Qdisp – Vazão disponível no curso d'água (m³ /s)

Qres – Vazão de resiliência disponível no manancial alternativo (m³ /s)

Ao aumentar a parcela de disponibilidade hídrica, localizada no denominador da equação, vai ocorrer a redução da exposição, que pode significar uma redução na possibilidade de a população ser exposta ao risco de escassez hídrica e a melhora do funcionamento da bacia com maior armazenamento disponível.

3.2.2 Resiliência local

Após avaliação da resiliência global, foi feito uma análise adicional, com uma comparação entre a demanda local de água em relação à sua produção local de água adicional (com a reservação e regularização do afluente que pode servir diretamente ao município em análise), com o consequente reflexo deste valor no W-ScaRI.

Na análise local de cada município, caso haja uma fonte de água adicional (produção local), cuja quantidade de água captada no município seja menor do que a água produzida, esta fonte alternativa ajudaria na disponibilidade local, por estar disponível “na porta” do próprio município. A partir da introdução de um multiplicador de resiliência local (ResLocal), expresso na equação (17) diminui-se o resultado do índice de risco de escassez, conforme equação (18):

$$ResLocal = \frac{(Qdemanda \text{ local} - Qproduzida \text{ localmente})}{Qdemanda \text{ local}} \quad (17)$$

$$W - ScaRI - ResLocal = (P \times Exp \times V) \times ResLocal \quad (18)$$

Caso a demanda local seja maior do que a quantidade de água armazenada localmente, o fator de resiliência local diminuirá proporcionalmente o W-ScaRI, mapeando um risco de escassez local menor, em relação a situação geral de escassez hídrica.

Caso a demanda local seja menor do que a quantidade de água produzida, o valor do indicador ResLocal será um número negativo, e, neste caso, igualado a zero (limite inferior da escala). Consequentemente, o índice W-ScaRI se anulará para aquela localidade – na prática, isso significa que a fonte local é suficiente para eliminar a dependência do manancial global. Entretanto, não seria verdade admitir que o risco foi levado a zero. O que ocorre é que cortada a dependência do manancial global, torna-se necessário agora aplicar o W-ScaRI ao reservatório de regularização local, para avaliar o seu nível de segurança, dado que este poderia deixar de ser uma fonte alternativa, para se tornar uma fonte principal local.

Caso não haja outra fonte de abastecimento, o município não tem benefícios adicionais, além daqueles já mapeados em nível global, que afetam toda a bacia, reduzindo a sua vantagem na busca por maior segurança hídrica.

Esta é uma proposta de aprimoramento do índice pela incorporação do efeito da resiliência, sujeita a estudos mais amplos e aprofundados no futuro, caso este teste seja funcional.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Caracterização da área de estudo

O rio Paraíba do Sul é o curso d'água de maior importância para o estado do Rio de Janeiro, responsável pelo abastecimento de cerca de 12 milhões de habitantes. Para avaliar a metodologia proposta nesta dissertação, foi selecionada a região do médio curso do Paraíba do Sul, que sofreu situações de redução de vazões no período de 2014-2015. Assim, a aplicação considera o Rio Paraíba do Sul, nos locais de captação das cidades de Volta Redonda e Barra Mansa, selecionadas por apresentarem demandas pelo uso da água e afluentes secundários distintos.

O Rio Paraíba do Sul origina-se da confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, ambos no estado de São Paulo, e desagua no Oceano Atlântico, percorrendo aproximadamente 1.137 km até a sua foz no município de São João da Barra. Sua calha principal delimita, em parte, a divisa do estado do RJ com o estado de Minas Gerais (CPRM, 2017).

Topograficamente, sua bacia hidrográfica abrange uma área de aproximadamente 61.307 km², envolvendo três dos mais desenvolvidos estados do país – São Paulo (13.934 km²), Minas Gerais (20.699 km²) e Rio de Janeiro (26.674 km²), e se divide em sete principais sub-bacias: Paraíba do Sul, no estado de São Paulo; Pomba, Muriaé, Preto e Paraibuna, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro; e Médio Paraíba do Sul, Piabanha, Rio Dois Rios e Baixo Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro (Cohidro/Agevap, 2014).

Seus principais afluentes são: o Rio Pomba, de cerca de 300 km e foz no limite entre o médio e o baixo Paraíba; o rio Paraibuna, com 180 km, localizado em Minas Gerais, na cidade de Juiz de Fora; Dois Rios, este sendo oriundo da união entre os rios Negro e Grande; o rio Piraí; o rio Muriaé, de 250 km e curso inferior plano no trecho fluminense; Piabanha, medindo cerca de 80 km, situado nos municípios fluminenses de Petrópolis, Areal e Três Rios.

A localização da bacia do rio Paraíba do Sul é apresentada na Figura 11.

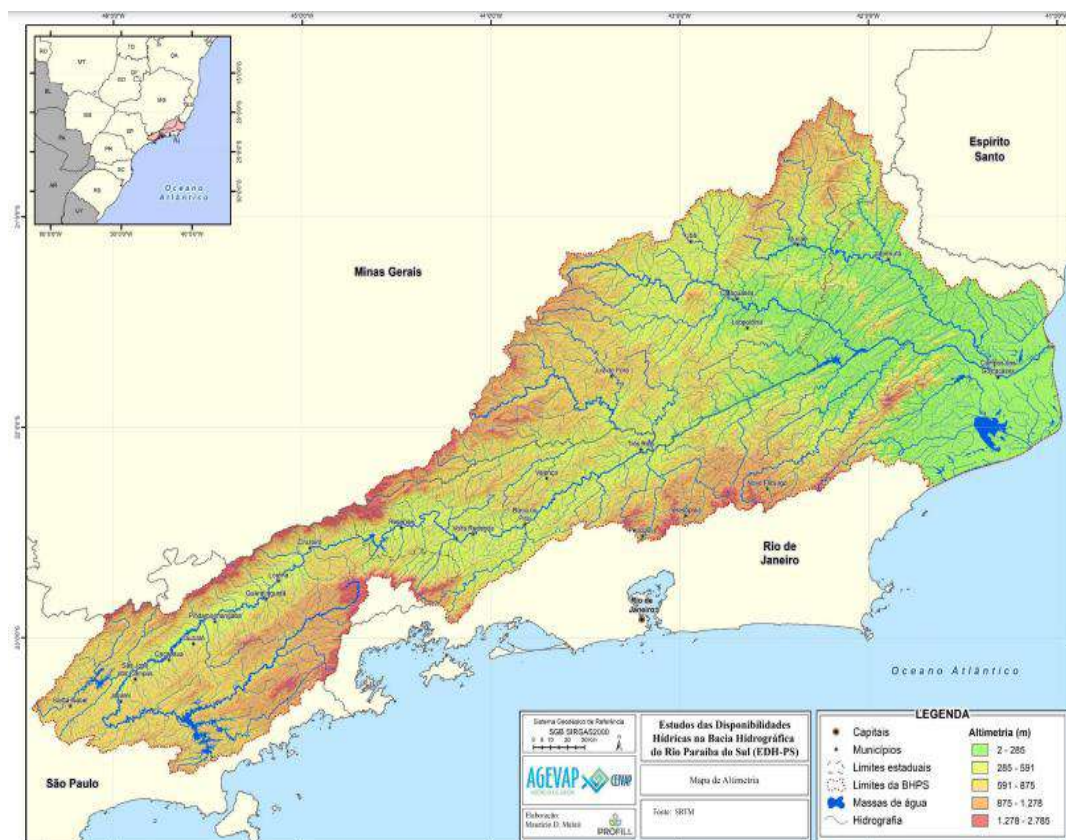


Figura 11. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Fonte: Agevap, 2024.

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul é considerada uma das bacias mais importantes da região sudeste, sendo a mais relevante para o estado do Rio de Janeiro, servindo de manancial de abastecimento para a população residente ao longo de sua calha e para grandes polos industriais, além de abrigar importantes centros urbanos e usinas hidrelétricas. Possui grandes transposições de água para bacias adjacentes (Piraí/Guandu-RJ, Jaguari/Atibainha-SP, Paraíba do Sul/Guandu-RJ), fornecendo uma parte significativa da água para as metrópoles de São Paulo e do Rio de Janeiro, sendo assim um sistema hidráulico de grande importância para o país.

Caracteriza-se pelos usos múltiplos da água e por um refinado sistema de gestão de seus aproveitamentos hidroelétricos, que além de serem usados para geração de energia são operados para garantir a transposição de vazões para o sistema Light e para o abastecimento da RMRJ e da RMSP. A bacia do Rio Paraíba do Sul abrange rios tanto de dominialidade federal e estadual.

A bacia do Paraíba do Sul possui um sistema complexo de aproveitamentos, incluindo usinas com reservatórios de acumulação, usinas a fio d'água e usinas elevatórias. Além disso, conta com dois sistemas de transposição de águas, inicialmente projetados para a geração de energia elétrica no Complexo Hidrelétrico de Lajes (RJ). Esses sistemas também desempenham um papel fundamental no abastecimento de grande parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (Thomaz, 2023).

A primeira transposição da bacia desviou águas do reservatório de Tocos, no Rio Pirai, para o reservatório de Lajes por um túnel, por gravidade. Seu objetivo era aumentar a afluência a Lajes e ampliar a geração de energia na UHE Fontes Velha, atualmente desativada. A outra transposição desvia águas do Rio Paraíba do Sul por uma elevatória próxima à barragem de Santa Cecília, com bombeamento máximo de 160 m³/s. As águas seguem para o reservatório de Santana e, em seguida, são bombeadas até o reservatório de Vigário. De lá, são conduzidas por gravidade para a vertente atlântica da Serra do Mar, aproveitando um desnível de cerca de 300 metros (Thomaz, 2023).

As principais barragens do rio Paraíba do Sul a montante de Santa Cecília foram construídas entre 1930 e 1960, sendo elas: Funil, Santa Cecília, Santa Branca, Paraibuna/Paraitinga e Jaguari. O Sistema Hidráulico do Paraíba do sul é representado na Figura 12.

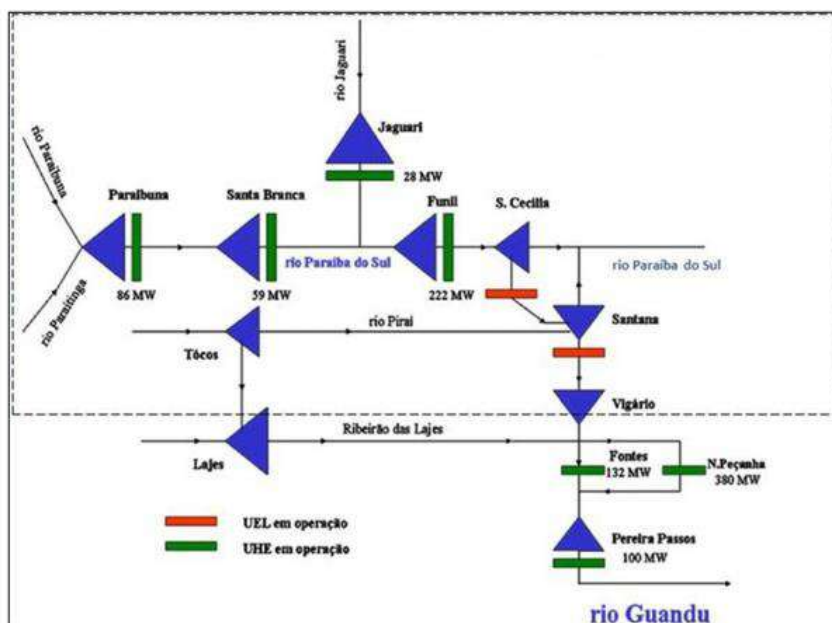


Figura 12. Representação Esquemática do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul. Fonte: ANA, 2015.

O relevo do Rio Paraíba do Sul a jusante da barragem de Funil é caracterizado por uma extensa planície de inundação, curvas suaves e pequenas declividades, até atingir o município de Porto Real. Deste município até Barra Mansa, o relevo passa para um vale bem encaixado e recebe a contribuição do Rio Bananal. O trecho entre a barragem de Santa Cecília, localizada em Barra do Piraí, e o município de Barra Mansa é constituído por margens pouco ocupadas e baixa declividade (Walter, 2019). O trecho entre a UHE-Funil e a elevatória de Santa Cecília é mostrado de forma esquemática na Figura 13.

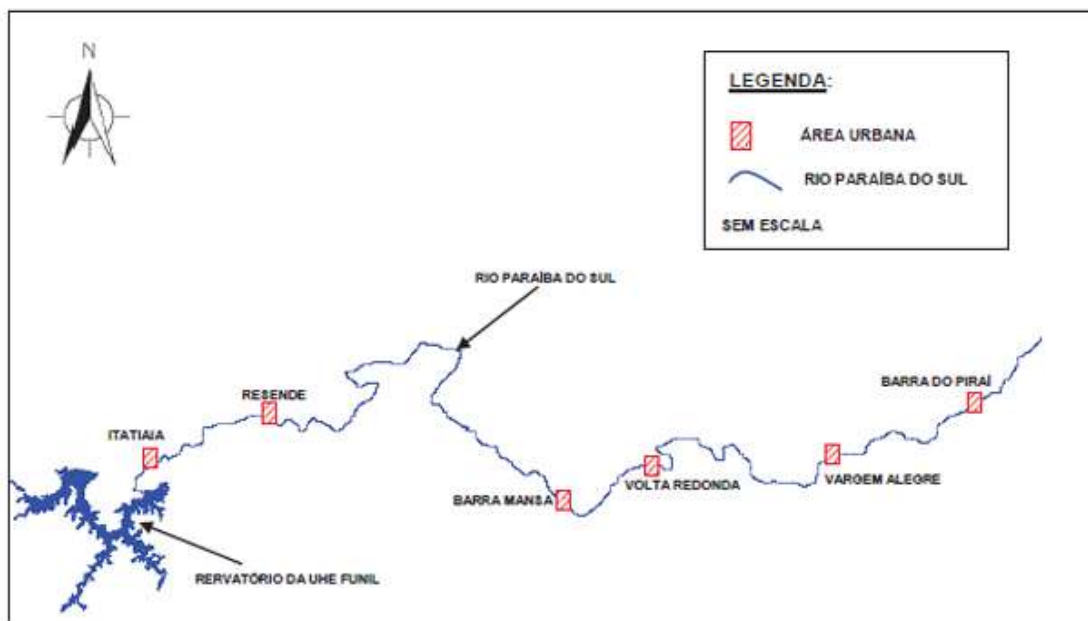


Figura 13. Croqui da área a jusante da UHE Funil. Fonte: Walter, 2019.

A região hidrográfica III - Médio Paraíba do Sul (RH-III) abriga as sedes dos municípios de Itatiaia, Resende, Porto Real, Quatis, Barra Mansa, Volta Redonda, Pinheiral, Valença, Rio das Flores, Comendador Levy Gasparian e parcialmente: Mendes, Rio Claro, Piraí, Barra do Piraí, Vassouras, Miguel Pereira, Paty do Alferes, Paraíba do Sul e Três Rios. Assim, a região de estudo deste trabalho engloba os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, localizados na RH-III, no trecho do Rio Paraíba do Sul entre Funil e Santa Cecília, representada na Figura 14 .

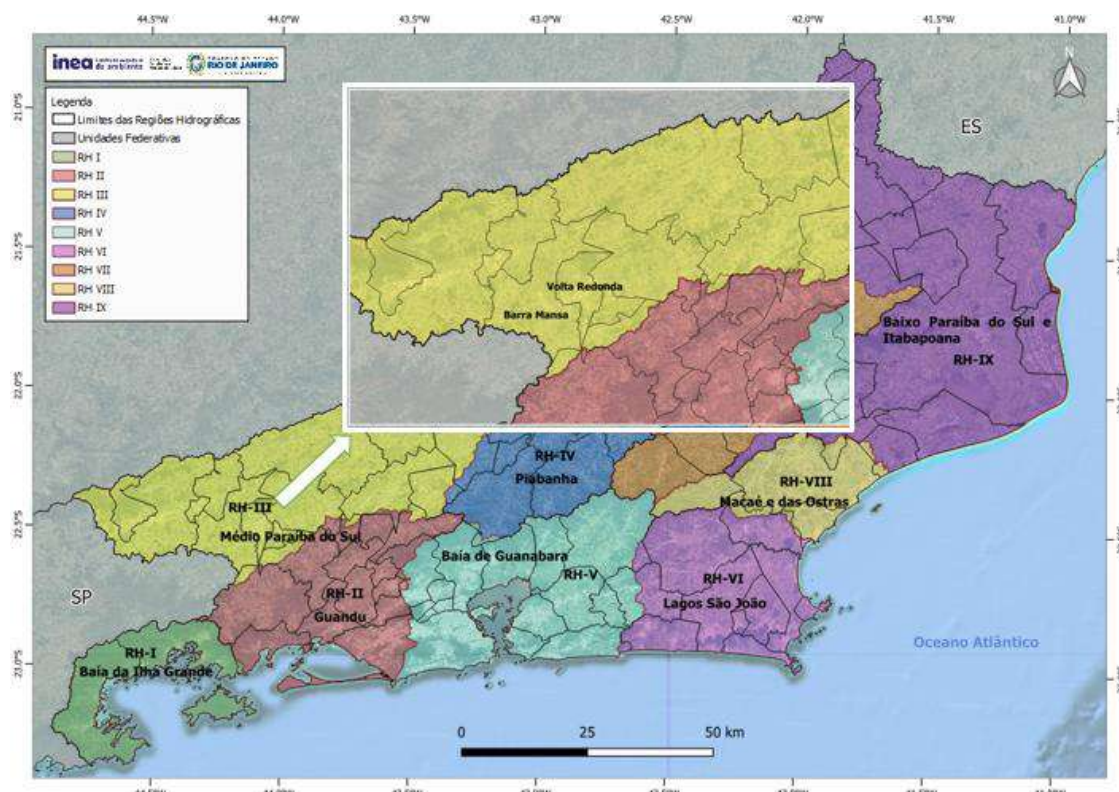


Figura 14. Municípios de Volta Redonda e Barra Mansa.

A RH-III destaca-se por ser uma região altamente industrializada (mais de 50% do PIB composto pela produção industrial), cujo crescimento da atividade industrial, desde 1940, proporcionou em algumas décadas a transição nesta bacia de uma população rural para predominantemente urbana nos dias atuais. A região destaca-se, ainda, pelo processo de atração de indústrias automobilísticas e de sua cadeia produtiva (Fundação Coppetec/Inea, 2014).

O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro (PERHI-RJ, 2014) dividiu o território do estado em Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHPs), que representam a menor unidade territorial de análise. Para essas unidades foram determinadas a disponibilidade hídrica, bem como as demandas pelo uso da água, visando o planejamento sustentável dos recursos hídricos regionais. A UHP engloba um rio principal ou trecho deste rio. Em observação aos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, pode ser concluído, segundo o mapa das UHPs do estado do RJ, que eles pertencem a duas UHPs, dentro da Região Hidrográfica III: *III-a e III-b*, conforme Figura 15.

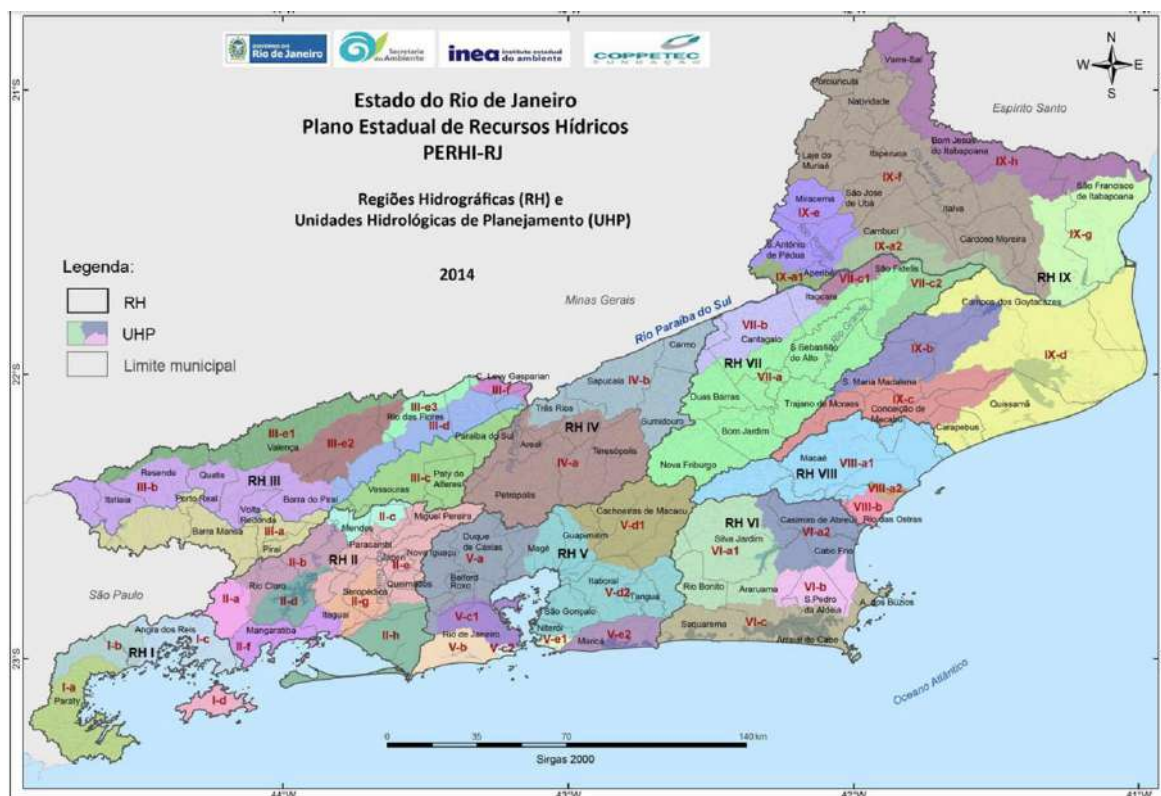


Figura 15. UHPs do estado do RJ. Fonte: PERHI, 2014.

A bacia do Paraíba do Sul sofreu nos últimos 20 anos duas situações de seca, que exigiram a adoção de medidas para evitar racionamentos e escassez hídrica na RMRJ. O primeiro evento ocorreu entre 2003 e 2004, e o segundo, mais severo, entre 2014 e 2015 (ANA, 2017).

Em ambas as situações, foram adotadas medidas de caráter emergencial que levaram, dentre outras, a diversas reduções nas vazões afluentes a Santa Cecília e a jusante da UHE Pereira Passos, com o objetivo de garantir os usos da água e preservar os estoques de água dos reservatórios.

Essas ações, de caráter temporário, foram tomadas sem a preocupação de estabelecer ações continuadas que promovam a recuperação da bacia, aumentem a capacidade de adaptação e recuperação da região e reduzam a vulnerabilidade aos períodos climáticos desfavoráveis (Thomaz, 2023).

Destaca-se que a criação de grupos de trabalho de acompanhamento da operação hidráulica e consequentemente a criação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/INEA/IGAM 1382 de 2015, a integração do cadastro de usos da água dos estados e da ANA, a criação de

salas de situação (ANA), foram algumas iniciativas de planejamento de longo prazo adotadas durante a crise hídrica de 2014-2015, que ajudarão em outras situações futuras de crise hídrica (Thomaz, 2023).

No âmbito da escassez hídrica que a bacia do Paraíba do Sul sofreu no período 2014-2015, como medida para o enfrentamento, a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº1382/2015 estabeleceu novos limites mínimos de vazão a jusante dos aproveitamentos hidroelétricos, com a finalidade de recuperação do armazenamento dos reservatórios da bacia. Os limites adotados foram: UHE-Paraibuna, $10\text{m}^3/\text{s}$; UHE-Santa Branca, $30\text{m}^3/\text{s}$; UHE-Jaguari, $4\text{m}^3/\text{s}$; UHE-Funil, $70\text{m}^3/\text{s}$; barragem de Santa Cecília (jusante), $71\text{m}^3/\text{s}$; bombeamento em Santa Cecília, $119\text{m}^3/\text{s}$; e UHE-Pereira Passos, $120\text{m}^3/\text{s}$. Naquela ocasião, os reservatórios de Paraibuna e Santa Branca chegaram a operar em volume morto.

As cidades de Resende, Barra Mansa e Volta Redonda são as principais restrições para operação da UHE- Funil, durante o período de cheias, sendo a cidade de Barra Mansa, situada a aproximadamente 45 km a jusante de Funil, e Volta Redonda a 10 km a jusante de Barra Mansa.

Por outro lado, este reservatório é o primeiro na ordem de deplecionamento dos reservatórios, e com o objetivo de preservar os estoques disponíveis de água no reservatório equivalente desta Bacia, a vazão defluente da UHE-Funil tem o limite mínimo de $70\text{ m}^3/\text{s}$ (instantânea), com uma afluência em Santa Cecília de $190\text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a soma da vazão objetivo em Santa Cecília de $119\text{ m}^3/\text{s}$ (transposição para o Sistema Light-Guandu) e a vazão mínima defluente de Santa Cecília no valor de $71\text{ m}^3/\text{s}$.

Dada a importância da bacia para o abastecimento do estado do Rio de Janeiro, o histórico de crises hídricas anteriores e a localização desses municípios em relação à transposição que ocorre na região, essa área foi escolhida para a aplicação do índice W-ScaRI e o teste com a nova metodologia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Levantamento de dados

Para aplicação dos indicadores relacionados ao perigo de seca, foram consideradas as séries de precipitações mensais, séries de temperatura mínima média mensal e de temperatura máxima média mensal, séries de vazões naturais médias mensais afluentes aos reservatórios da

bacia do Paraíba do Sul e a montante da barragem de Santa Cecília no Rio Paraíba do Sul, local onde ocorre a transposição para o rio Paraíba do Sul.

Os dados usados para o subíndice de perigo, utilizados por Thomaz (2023) e replicado para este trabalho, estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5. Dados usados para aplicação do subíndice de perigo (Thomaz, 2023).

Indicador	Tipo de informação	Período	Referência
IPM (SPI)	Séries de precipitação mensal das estações: Resende, Taubaté, Fazenda Santa Clara, S. Luiz do Paraitinga, Igaratá e Santa Isabel	1991-2016	(ANA, 2018c) (DAEE, 2018)
IPA (RDI)	Séries de precipitação mensal e séries de temperatura média mensal, máxima e mínima. Estações: Resende e Taubaté	1991-2016	(ANA, 2018c) (INMET, 2018)
IPH (SDI)	Vazões naturais médias mensais na UHE Paraibuna, UHE Santa Branca, UHE Funil e Barragem Santa Cecília	1931-2017	(ANA, 2018a)

Para fins de aplicação da metodologia, foi considerado de forma hipotética, que a captação para o sistema de abastecimento dos dois municípios é feita no Rio Paraíba do Sul, no mesmo local. Já o componente de perigo foi considerado o mesmo para os dois municípios. Neste caso, adotou-se os valores calculados por Thomaz (2023), que aplicou este componente para a bacia do Rio Paraíba do Sul, a montante de Santa Cecília.

Na aplicação do subíndice de consequência, para representar os indicadores dos componentes de exposição e vulnerabilidade, foram usados os dados reunidos na Tabela 6. Destaca-se que os indicadores selecionados para representar os três grupos de impactos referem-se à vulnerabilidade do sistema urbano e, portanto, são representativos da situação atual do sistema (período em análise) (Thomaz, 2023).

Tabela 6. Dados usados para os componentes de exposição e vulnerabilidade.

Indicador	Tipo de informação	Período	Referência
-----------	--------------------	---------	------------

IEx1	Vazões afluentes a Santa Cecília e dados de captação dos diversos usos de Volta Redonda e Barra Mansa.	2014 - 2015	ANA, 2024; FUNDAÇÃO COPPETEC/INEA, 2014
IEx2	Séries diárias de volumes úteis acumulados dos reservatórios na bacia do rio Paraíba do Sul a montante de Santa Cecília e volume útil de cada um dos reservatórios	2014 - 2015	ANA, 2024
IVA	Vazão de consumo, vazão de diluição e disponibilidade hídrica das UHPs	2014	FUNDAÇÃO COPPETEC/INEA, 2014
IVS	Densidade populacional: população e área dos municípios Barra Mansa e Volta Redonda	2017	IBGE, 2017
IVE1	PIB per capita dos municípios do estado do Rio de Janeiro e RMRJ	2015	IBGE, 2021
IVE2	Captações de água nos municípios	2014	FUNDAÇÃO COPPETEC/INEA, 2014

Em relação ao componente de exposição, observa-se que o Indicador de Estresse Hídrico (IEx1) relaciona as demandas de consumo dos diversos usos da água na bacia e a disponibilidade hídrica. Em períodos de seca, a disponibilidade dos corpos hídricos diminui, sem que haja redução das captações, reduzindo assim a folga hídrica da bacia. Para obter a vazão de captação, foram levantadas as demandas de captação dos dois municípios, conforme Tabela 7, considerando os setores usuários de água, utilizando como fonte de dados o PERHI-RJ (2014).

Tabela 7. Captações nos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda. Fonte: PERHI-RJ, 2014.

Município	UHP	Captações	TOTAL
-----------	-----	-----------	-------

		Abastecimento	Indústria	Mineração	Agric.	Criação	Total (L/s)	(m³/s)
Barra Mansa	III-a	805,51	289,73	68,06	-	11,84	1.175,14	1,18
	III-b	-	-	-	-	7,73	7,73	
Volta Redonda	III-a	1.180,41	15.007,30	-	0	2,24	16.189,95	16,25
	III-b	-	22,22	35,42	0	3,06	60,71	

Para o indicador de vulnerabilidade ambiental - IVA (balanço hídrico qualitativo), foram considerados os resultados do PERHI-RJ (2014) para as UHPs III-a e III-b, onde estão localizados os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, na Região Hidrográfica III.

No que diz respeito ao novo componente de resiliência, o cálculo foi realizado de forma a identificar as bacias que pudessem produzir redundância no abastecimento, com a implantação de fontes alternativas de abastecimento. Por hipótese, foi considerada a implantação de barragens de regularização nos cursos d'água afluentes ao rio Paraíba do Sul com mais de 40 km² no trecho Funil-Santa Cecília.

Assim, as vazões médias destes cursos d'água foram obtidas por regionalização de vazões, utilizando o estudo de regionalizações, realizado pela CPRM (2002). A Tabela 8 reúne os rios que existem no trecho Funil-Santa Cecília, suas áreas de drenagem e vazões médias.

Tabela 8. Afluentes com mais de 40km² do trecho entre Funil - Santa Cecília. Fonte: Adaptado de CPRM, 2002.

Trecho Funil - Santa Cecilia	Rios	Área	Qmédia	80% Q media regularizada
Resende	Rio Campo Belo	70	0,75	0,60
	Ribeirão das Pedras	40	0,43	0,34
	Rio São Jerônimo	43	0,46	0,37
	Sesmaria	150	2,71	2,16
	Rio do Barreiro de Baixo	210	2,27	1,82
	Alambari	50	0,54	0,43
	Pirapetinga	220	9,89	7,91
Barra Mansa	Bananal	530	5,77	4,62

	Turvo	410	16,41	13,13
	Rio Bocaina	41	0,44	0,35
	Barra Mansa	103	1,11	0,89
Volta Redonda	Ribeirão Brandão	82	0,88	0,71
	Ribeirão Santa Teresa	50	0,54	0,43
Barra do Piraí	Ribeirão Cachimbal	104	1,12	0,90
Itatiaia	Santo Antônio	40	0,43	0,34
Total				34,99

Assim, considerando a possibilidade de regularização destes rios em 80%, a soma das vazões regularizadas foi considerada como a vazão de resiliência (Q_{Res}) do trecho do rio Paraíba do Sul. Esta vazão de resiliência aumenta a disponibilidade hídrica do rio Paraíba do Sul neste trecho e reduz o estresse hídrico. Por outro lado, as vazões possíveis de serem regularizadas nos cursos d'água dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, podem ser consideradas como vazões de resiliência locais, porque podem agregar redundância aos sistemas de abastecimento destes municípios, tornando-os independentes do Rio Paraíba do Sul.

5.2 Aplicação W-ScaRI em Volta Redonda e Barra Mansa

O W-ScaRI foi aplicado no rio Paraíba do Sul, no local de captação dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, situados a montante da transposição para o Sistema Light/Guandu. Por simplificação, foi considerado apenas um ponto de captação comum para os dois municípios, visto que suas captações são próximas, ambas no rio Paraíba do Sul. No entanto, o componente de vulnerabilidade do sistema urbano é considerado individualmente para cada um dos municípios.

Para sua aplicação, foi utilizada uma planilha em Excel, onde foram feitos os cálculos e inseridos os dados disponíveis levantados. Destaca-se que os indicadores, subíndices e W-ScaRI foram aplicados para o mês de janeiro de 2015, quando o reservatório equivalente do Rio Paraíba do Sul atingiu um dos seus valores mais baixos.

Os indicadores do subíndice de perigo estão relacionados aos processos atmosféricos (intensidade, duração, frequência) e às respostas hidrológicas em lagos, reservatórios, cursos d'água ou aquíferos. Assim, considerando que o Rio Paraíba do Sul é o principal manancial de abastecimento destes dois municípios, foi considerado que o componente de perigo é o mesmo para os dois municípios. Os valores do componente de perigo são iguais aos calculados no trabalho de Thomaz (2023), que é a região da bacia do Paraíba do Sul a montante da transposição para o Sistema Light/Guandu.

Os indicadores do subíndice de consequência referem-se aos impactos ambientais, sociais e econômicos, que incidem sobre os municípios de Volta Redonda e Barra Mansa, abastecidos pelo rio Paraíba do Sul. Assim, os indicadores dos componentes de exposição e vulnerabilidade, que integram o subíndice de consequência, foram aplicados:

- Exposição: O indicador de percentual de reservatório equivalente foi aplicado aos reservatórios localizados no Rio Paraíba do Sul, a montante da transposição em Santa Cecília.
- Exposição: O indicador de Estresse Hídrico foi aplicado no trecho incremental entre Funil e Santa Cecília, nos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, que inclui toda a área de contribuição de montante deste ponto até a UHE-Funil.
- Indicador de Impacto ambiental: aplicado para a área incremental do rio Paraíba do Sul (Funil-Santa Cecília), considerando os resultados do PERHI-RJ para as UHPs III-a e III-b, onde estão localizados os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda. Foi usada a vazão de diluição no cálculo da média ponderada para determinação do indicador final.
- Indicador de Impacto social: densidade populacional dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda.
- Indicador de Impacto Econômico: atividades econômicas dos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, representadas pelo PIB per capita.

5.2.1 Subíndice – Consequência

5.2.1.1 Componente de Exposição

Para aplicação do indicador de Estresse hídrico (IEx1) [demanda/disponibilidade], foram utilizados dados do PERHI-RJ, relativos à captação de água no rio Paraíba do Sul dos

diversos usuários localizados nos municípios de Volta Redonda (QcapVR) e Barra Mansa (QcapBM). Para calcular as demandas totais de captação no Rio Paraíba do Sul, foram somados os usos da água em Barra Mansa e Volta Redonda, com as vazões a serem utilizadas no trecho de jusante, que incluem a transposição média para o Guandu ($105,9 \text{ m}^3/\text{s}$) e a vazão média de defluência em Santa Cecília ($52,6 \text{ m}^3/\text{s}$), no mês de janeiro de 2015. Vale destacar que os usos da água entre Barra Mansa e Santa Cecília foram considerados insignificantes.

Para estimar a disponibilidade hídrica do rio Paraíba do Sul a montante das captações dos municípios, adotou-se uma abordagem simplificada, que considera a soma da vazão média afluente de Santa Cecília em janeiro de 2015 ($158,6 \text{ m}^3/\text{s}$) com as vazões de captação de Barra Mansa e Volta Redonda (QcapBM + QcapVR).

O mesmo índice IEx1 é utilizado para os dois municípios, uma vez que, por simplificação estamos considerando o mesmo ponto de captação, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Aplicação do Indicador de Estresse Hídrico (IEx1) – Rio Paraíba do Sul.

Indicador de Estresse Hídrico (IEx1)	Usos da água na bacia a jusante (m^3/s)	Vazão Disponível (m^3/s)
Local	QcapBM + QcapVR + Transposição Guandu (jan/15) + Qdefluente SC (jan/15)	(Qafluente Santa Cecilia + QcapBM + QcapVR)
Barra Mansa e Volta Redonda	176	176
Indicador de Estresse Hídrico - IEx1		1

O Indicador do percentual do volume equivalente dos reservatórios (Iex2) é calculado através da relação entre o somatório dos volumes úteis acumulados nos reservatórios existentes na bacia (VeqR) e o somatório dos volumes úteis totais desses reservatórios. Ele foi calculado a partir da série diária de volumes acumulados dos reservatórios das UHEs Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, todas localizadas na Bacia do Paraíba do Sul, a montante da transposição, e a soma dos volumes úteis totais de cada reservatório. A Tabela 10 apresenta os valores mensais mínimos do VeqR para o período de 2013 a 2015.

Foi adotado o mesmo índice IEX2 para os dois, porque estamos considerando o mesmo ponto de captação, conforme Tabela 11.

Tabela 10. Valores mínimos mensais do indicador VEQR (%). Fonte: Thomaz, 2023.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2013	42	54	60	68	69	65	62	57	51	48	45	48
2014	48	42	41	39	34	28	23	18	13	7	4	2
2015	0,4	0,3	8	16,3	17,1	15,3	11,6	7,1	6,6	5,4	5,8	9,9
2016	18	27	34	43	44	44	52	50	48	46	45	49

Tabela 11. Aplicação do Indicador de Volume Equivalente (IEx2) – Rio Paraíba do Sul.

Indicador Volume equivalente (Iex2)		0,9960
Local	Volume total	Valor mínimo do volume equivalente dos reservatórios (%)
Reservatório Equivalente	4341,9	0,4

Observa-se que no mês de janeiro de 2015 o volume útil acumulado dos reservatórios estava próximo de zero, indicando que a bacia praticamente não possuía reservas. Nos meses seguintes, houve um aumento modesto no volume equivalente dos reservatórios, atingindo seu pico em maio. No entanto, o volume voltou a cair, chegando a 5,4% em outubro. A partir de novembro, os reservatórios começaram a se recuperar, alcançando 50% de sua capacidade (Thomaz, 2023).

Os valores altos finais para o subíndice de exposição IEx1 e IEx2 representam uma aproximação entre demanda e disponibilidade hídrica, refletindo o cenário da falta d'água da época em que a disponibilidade hídrica era mínima com níveis muito baixos de reservatórios na bacia, afetando parte do sistema socioeconômico.

5.2.1.2 Componente de vulnerabilidade

A Tabela 12 apresenta o cálculo do indicador de Vulnerabilidade Ambiental considerando os dados disponibilizados pelo PERHI (2014), para as UHPs que abrangem os

municípios de Volta Redonda e Barra Mansa. Destaca-se que o estudo do PERHI só levou em consideração as vazões referentes as áreas incrementais do trecho Funil-Santa Cecília.

Tabela 12. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Ambiental (IVA) – Rio Paraíba do Sul.

Balanco hídrico qualitativo (PERHI, 2014)							INDICADOR IVA:	0,97
UHP	Nome	Área (km²)	Disponibilidade Q95% (m3/s)	Vazão de Consumo Total (m3/s)	Vazão de Diluição (m3/s)	Vazão de consumo / Disponibilida de (%)	Bqualitativo (Vazão de consumo_diluição / Disponibilidade (%))	Índice
III-a	rio Paraíba do sul - Margem Direita mont. Sta. Cecília	1147,3	7,9	6,598	51,55	62,9	553,2	1
III-b	rio Paraíba do sul - Margem Esquerda mont. Sta. Cecília	1625,6	15,5	0,3161	3,32	2	23,5	0,235

Conforme mostrado na Figura 15, Barra Mansa e Volta Redonda estão localizadas na área de abrangência de duas UHPs (III-a e III-b). Desta forma, o resultado do IVA é o mesmo para os dois municípios. Destaca-se que os altos valores de vulnerabilidade ambiental apontam para uma região vulnerável aos impactos ambientais em situações prolongadas de estiagem.

Para o cálculo do indicador de densidade populacional (IVS), foram levantadas no IBGE as áreas e estimativas populacionais (ano de 2017) de Volta Redonda e Barra Mansa. O IVS foi determinado para cada um destes municípios, conforme Tabela 13. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS) – Rio Paraíba do Sul. , utilizando a metodologia e normalização descritas no item 3.

Tabela 13. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS) – Rio Paraíba do Sul.

INDICADORES IMPACTO SOCIAL

INDICADOR IVS			0,52
Município	Densidade populacional (hab/km ²)	População	Índice 0-1
Barra Mansa	328,8	179.915	0,52

INDICADOR IVS			0,59
Município	Densidade populacional (hab/km ²)	População	Índice 0-1
Volta Redonda	1444,1	262.970	0,59

Observa-se que a diferença entre os indicadores de vulnerabilidade social obtidos para os dois municípios é função da maior densidade populacional de Volta Redonda. Embora a população seja um pouco maior em Volta Redonda, uma vez que a densidade populacional é o resultado da relação entre o número de habitantes e a área do município, a área do território de Barra Mansa (547,1 km²) é muito maior do que de Volta Redonda (182,5 km²), tornando assim a densidade populacional de Volta Redonda muito maior e, consequentemente, o IVS também.

Para determinação da vulnerabilidade econômica foram utilizados dois indicadores: “PIB per capita” (IVE1), e “Nível de Competição com Abastecimento Humano” (IVE2).

O IVE1 é representado pelo indicador de PIB per capita, cujos dados para sua aplicação foram levantados no IBGE (PIB, PIB Per capita de 2015 e população), conforme indicado na Tabela 14. O IVE1 foi determinado separadamente para Barra Mansa e para Volta Redonda.

Tabela 14. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Econômico (IVE1) – Rio Paraíba do Sul.

INDICADORES IMPACTO ECONÔMICO

INDICADOR PIB Per Capita IVE1				0,47
Município	PIB	População	PIB Per Capita (10 ³ R\$/hab)	Indicador
Barra Mansa	R\$ 4.996.769,99	179.915	27,77	0,47

INDICADOR PIB Per Capita IVE1				0,70
Município	PIB	População	PIB Per Capita (10 ³ R\$/hab)	Indicador
Volta Redonda	R\$ 10.322.954,65	262.970	39,26	0,70

De acordo com o resultado obtido para os dois municípios, observa-se que o valor do PIB per capita é significativo na vulnerabilidade econômica do município. Pode-se concluir que uma região com maior PIB per capita pode ser mais vulnerável a sofrer impactos econômicos em situações de escassez hídrica, considerando que a água é um insumo importante para a maioria das atividades econômicas significativas.

Para determinação da vulnerabilidade econômica com o indicador de nível de competição de captações dos diversos usos com o abastecimento humano (IVE2), foram usadas as vazões de captação de abastecimento humano e industriais, obtidas nos estudos PERHI-RJ (2014), para os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, conforme supracitado na Tabela 7, que reúne dados das captações dos setores usuários destes municípios mais representativos. Os resultados da aplicação são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Aplicação do Indicador de Vulnerabilidade Econômico (IVE2) – Rio Paraíba do Sul.

INDICADORES IMPACTO ECONÔMICO

Indicador de Nível de Competição com Abastecimento Humano – IVE2		
Barra Mansa	INDICADOR IVE2	1

Tipo de Uso	Volume captado (m ³ /s)	Volume %
vazão total captada pelo setor produtivo (Qi)	0,290	26%
vazão total captada pelo setor de abastecimento humano (Qa)	0,806	74%
vazão total captada (Qcap)	1,095	

Volta Redonda	INDICADOR IVE2	0,15
Tipo de Uso	Volume captado (m ³ /s)	Volume %
vazão total captada pelo setor produtivo (Qi)	15,007	93%
vazão total captada pelo setor de abastecimento humano (Qa)	1,180	7%
vazão total captada (Qcap)	16,188	

Para o município de Barra Mansa, o valor obtido para o indicador IVE2 foi igual a 1. Ou seja, a vulnerabilidade é máxima quando as captações industriais são inferiores às captações para abastecimento humano, esses usuários estariam em provável alto risco de restrição de vazões de captação, o que pode causar grande impacto no setor industrial em situações de escassez hídrica. De acordo com a Lei 9.433/97, em situações de escassez hídrica, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. Nestas situações, quaisquer outros usos da água poderão vir a ser restringidos.

Já em Volta Redonda, apesar do volume captado industrial ser muito alto, o abastecimento humano é muito mais baixo, representando 7% do total de volume captado, indicando que em situações de escassez hídrica o impacto nas indústrias será menor (porque a parcela industrial é significativamente maior).

5.2.2 Cálculo do Subíndice de Consequência

As Tabela 16 e Tabela 17 apresentam os resultados da aplicação do subíndice de consequência para os dois municípios. Observa-se que foram considerados pesos iguais para os

indicadores dentro de cada grupo de vulnerabilidade, bem como na composição final do subíndice.

Tabela 16. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Barra Mansa.

Sub-índice de Consequência - Município: Barra Mansa												
Bacia					Rio Paraiba do Sul							
Município/Região					Barra Mansa							
Mês					Janeiro							
Ano hidrologico de referência					2015							
Exposição			Vulnerabilidade									
Indicador de Exposição (IEx)			Indicador de Impacto Ambiental - (IVA)			Indicador de Impacto Social (IVS)			Indicador de Impacto Econômico (IVE)			
Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	
Estresse hidrico	0,5	1,000	Balanço hidrico qualitativo	1	0,97	Densidade populacional	1	0,52	PIB per capita	0,5	0,47	
% Volume equivalente	0,5	0,996							Nível de competição com abastecimento humano	0,5	1,00	
Produtorio		0,998							Soma ponderada	0,97	Soma ponderada	0,52
			Peso		0,33	Peso			0,333	Peso		0,33
Indicador Exposição		0,998	Indicador Vulnerabilidade Final								0,741	
Peso		0,5	peso								0,5	
Subindice de Consequencia											0,86	

Tabela 17. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Volta Redonda.

Sub-índice de Consequência - Volta Redonda												
Bacia						Rio Paraíba do Sul						
Município/Região						Volta Redonda						
Mês						Janeiro						
Ano hidrológico de referência						2015						
Exposição			Vulnerabilidade									
Indicador de Exposição (IEx)			Indicador de Impacto Ambiental -			Indicador de Impacto Social			Indicador de Impacto Econômico (IVE)			
Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	
Estresse hídrico	0,5	1,000	Balanço hídrico qualitativo	1	0,97	Densidade populacional	1	0,59	PIB per capita	0,5	0,70	
% Volume equivalente	0,5	0,996							Nível de competição com abastecimento humano	0,5	0,15	
Produtorio		0,998	Soma ponderada		0,97	Soma ponderada		0,59	Soma ponderada		0,42	
			Peso		0,33	Peso		0,333	Peso		0,33	
Indicador Exposição		0,998	Indicador Vulnerabilidade Final									0,659
Peso		0,5	peso									0,5
Subíndice de Consequencia											0,81	

Os resultados mostram que, em situações de escassez hídrica, ambos municípios estavam vulneráveis aos impactos ambientais, sociais e econômicos, apresentando um valor entre 0,8 e 0,9.

Embora ambos os municípios tenham apresentado valor alto para o subíndice de consequência, o município de Volta Redonda apresentou um valor um pouco mais baixo (0,81) no indicador de vulnerabilidade final se comparado ao município de Barra Mansa (0,86). Essa

diferença ocorre devido aos indicadores de vulnerabilidade econômica, tanto o PIB per capita como o nível de competição com abastecimento humano.

5.2.3 Cálculo do Índice Final

Considerando os mesmos valores de perigo calculados na tese de Thomaz (2023), a Tabela 18 apresenta a aplicação para os três componentes de seca considerados na representação do perigo: a seca meteorológica, a seca agrícola e a seca hidrológica.

Tabela 18. Indicadores de perigo. Fonte: Thomaz, 2023.

PERIGO								
Indicador de Seca Meteorológica			Indicador de Seca Agrícola			Indicador de Seca Hidrológica		
Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor
SPI	1	0,87	RDI	1	0,93	SDI	1,00	1,00
Peso subíndice meteorológico	0,33		Peso subíndice agrícola	0,33		Peso subíndice hidrológico	0,33	
Subíndice de Perigo			0,9333			Peso	0,5	

Os resultados altos dos índices (SPI, RDI e SDI) corroboram para um período de estiagem severa na bacia: a seca começou no final de 2013; em jan/2015, UHE Paraibuna (SP) atingiu o volume útil igual a zero; em fev/2015, houve um aumento nas chuvas, mas a situação de estresse hídrico na bacia se estendeu até fim de 2015, com o início da recuperação dos reservatórios em nov/2015 (Thomaz, 2023).

Os cálculos finais do índice W-ScaRI, com o produtório dos subíndices de consequência e de perigo, são apresentados na Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19. Cálculo final do Índice W-ScaRI para Barra Mansa.

Índice Final W-ScaRI - Município: Barra Mansa			
Bacia		Rio Paraíba do Sul	
Município/Região		Barra Mansa	
Mês		Janeiro	
Ano hidrológico de referência		2015	
Subíndice de Consequência	0,860	Peso	0,5
Subíndice de Perigo	0,933	Peso	0,5
W-ScaRI		0,90	

Tabela 20. Cálculo final do Índice W-ScaRI para Volta Redonda.

Índice Final W-ScaRI - Volta Redonda			
Bacia		Rio Paraíba do Sul	
Município/Região		Volta Redonda	
Mês		Janeiro	
Ano hidrológico de referência		2015	
Subíndice de Consequência	0,811	Peso	0,5
Subíndice de Perigo	0,933	Peso	0,5
W-ScaRI		0,87	

Os índices de risco de seca obtidos para o W-ScaRI em Barra Mansa e Volta Redonda apresentaram valores altos, próximos a 0,9 e próximos entre si. Em janeiro de 2015, os altos valores dos indicadores de seca meteorológica (SPI), agrícola (RDI) e hidrológica (SDI) resultaram em um subíndice de perigo igualmente elevado. Além disso, o componente de exposição, representado pelo indicador de estresse hídrico e pelo percentual do volume equivalente, também registrou valores altos. Como consequência, tanto o subíndice de consequência quanto o W-ScaRI apresentaram níveis significativamente elevados. O município de Barra Mansa apresentou um W-ScaRI um pouco maior, em virtude do indicador de vulnerabilidade econômica, conforme mencionado anteriormente.

5.3 Componente de Resiliência

A análise e o desenvolvimento de um sistema de indicadores para avaliar a resiliência a nível das cidades brasileiras em relação a desastres hidrológicos são extremamente relevantes para melhorar a capacidade de enfrentamento e mitigação de riscos (Suassuna, 2014). Observa-se que regiões mais resilientes são mais resistentes aos impactos durante e após os eventos de seca. A construção do componente de resiliência foi realizada com premissas semelhantes a dos demais subíndices e componentes do W-ScaRI, utilizando indicadores preferencialmente simples, que representam a capacidade do sistema em se adaptar e recuperar.

Neste tópico é apresentada a aplicação e discussão dos resultados do W-ScaRI com a introdução do componente de resiliência em sua representação. Assim, é possível representar uma parcela de resistência e adaptação ao risco, em sentido contrário à materialização da vulnerabilidade, refletindo a capacidade de recuperação do sistema em função do impacto da seca.

Olhando por este viés, este estudo mostra o efeito da inclusão de redundâncias de abastecimento no cálculo do W-ScaRI.

5.3.1 Aplicação W-ScaRI-ResGlobal em Volta Redonda e Barra Mansa

A vazão de resiliência global da bacia foi determinada considerando a construção de algumas barragens pequenas nos principais afluentes do trecho Funil-Santa Cecília, com mais de 40 km², que fizessem uma regularização de 80% de sua vazão média. A Tabela 8 apresentada anteriormente mostra a vazão total possível de ser regularizada, que é a vazão de resiliência global.

Em relação às captações na bacia, foram considerados os mesmos critérios e usos da água utilizados na aplicação do W-ScaRI (item 5.1.1). No entanto, visto que houve um aumento na disponibilidade hídrica da bacia e que a vazão de restrição a jusante de Santa Cecília não estava sendo respeitada em janeiro de 2015 (valor médio), optou-se por incluir na parcela total de captação, o valor integral de 71 m³/s, que é a vazão limite mínimo a ser destinada ao Baixo Paraíba do Sul a jusante de Santa Cecília, de acordo com a Resolução Conjunta nº 1.382/2015.

A Tabela 21 apresenta o cálculo do Indicador de Estresse Hídrico incluindo a parcela da vazão de resiliência (IEx1Res).

Tabela 21. Aplicação do Indicador de Estresse Hídrico com Resiliência (IEx1Res) – Rio Paraíba do Sul.

Indicador de Estresse Hídrico (IEx1 – res)	Usos da água na bacia a jusante (m3/s)	Vazão Disponível (m3/s)	Q resiliência (m³/s)
Local	QcapBM + QcapVR + Transposição Guandu (jan/15) + Qrestrição SC	(Q média afluyente Santa Cecilia + QcapBM + QcapVR	
Bacia do Paraíba do Sul - trecho Funil-Sta Cecilia	194,32	176	35,00
Indicador de Estresse Hídrico - IEX1 res		0,921	

Os resultados obtidos com a aplicação da vazão de resiliência no indicador de exposição IEx1Res mostraram uma redução do indicador de estresse hídrico de 1 para 0,92 para os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda.

Os resultados do subíndice de consequência mostraram uma redução de 0,86 para 0,84 para Barra Mansa e de 0,81 para 0,79 para Volta Redonda, em relação aos resultados com a aplicação do subíndice original, conforme Tabela 22 e Tabela 23 .

Tabela 22. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Barra Mansa.

Sub-índice de Consequência - Município: Barra Mansa												
Bacia			Rio Paraíba do Sul									
Município/Região			Barra Mansa									
Mês			Janeiro									
Ano hidrológico de referência			2015									
Exposição			Vulnerabilidade									
Indicador de Exposição (IEx)			Indicador de Impacto Ambiental - (IVA)			Indicador de Impacto Social (IVS)			Indicador de Impacto Econômico (IVE)			
Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	
Estresse hídrico	0,5	0,921							PIB per capita	0,5	0,47	
% Volume equivalente	0,5	0,996	Balanço hídrico	1	0,97	Densidade populacional	1	0,52	Nível de desenvolvimento humano	0,5	1,00	
			Soma ponderada		0,97	Soma ponderada		0,52	Soma ponderada		0,73	
Produtorio		0,958	Peso		0,333333	Peso		0,333333	Peso		0,333333	
Indicador Exposição		0,958	Indicador Vulnerabilidade Final									0,741
Peso		0,5	peso									0,5
Subíndice de Consequência											0,84	

Tabela 23. Aplicação do subíndice de consequência para o município de Volta Redonda.

Sub-índice de Consequência - Volta Redonda												
Bacia			Rio Paraíba do Sul									
Município/Região			Volta Redonda									
Mês			Janeiro									
Ano hidrológico de referência			2015									
Exposição			Vulnerabilidade									
Indicador de Exposição (IEx)			Indicador de Impacto Ambiental - (IVA)			Indicador de Impacto Social (IVS)			Indicador de Impacto Econômico (IVE)			
Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	Indicador	Peso	Valor	
Estresse hídrico	0,5	0,921							PIB per capita	0,5	0,70	
% Volume equivalente	0,5	0,996	Balanço hídrico	1	0,97	Densidade populacional	1	0,59	Nível de desenvolvimento humano	0,5	0,15	
Produtorio			Soma ponderada		0,97	Soma ponderada		0,59	Soma ponderada		0,42	
0,958			Peso		0,333333	Peso		0,333333	Peso		0,333333	
Indicador Exposição		0,958	Indicador Vulnerabilidade Final									0,659
Peso		0,5	peso									0,5
Subíndice de Consequência											0,79	

Mesmo comportamento pode ser observado no W-ScariRes para os dois municípios, de acordo com a Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 24. Índice final W-ScaRI com resiliência para Barra Mansa.

Índice Final W-ScaRI - Município: Barra Mansa				
Bacia		Rio Paraíba do Sul		
Município/Região		Barra Mansa		
Mês		Janeiro		
Ano hidrológico de referência		2015		
Bacia	Rio Paraíba do Sul		Mês	Janeiro
Município/Região		Barra Mansa	Ano hidrológico de referência	2015
Subíndice de Consequência			0,843	Peso 0,5
Subíndice de Perigo			0,933	Peso 0,5
W-ScaRI-Res				0,89

Tabela 25. Índice final W-ScaRI com resiliência para Volta Redonda.

Índice Final W-ScaRI - Volta Redonda				
Bacia		Rio Paraíba do Sul		
Município/Região		Volta Redonda		
Mês		Janeiro		
Ano hidrológico de referência		2015		
Bacia	Rio Paraíba do Sul		Mês	Janeiro
Município/Região		Volta Redonda	Ano hidrológico de referência	2015
Subíndice de Consequência			0,795	Peso 0,5
Subíndice de Perigo			0,933	Peso 0,5
W-ScaRI-Res				0,86

Houve uma pequena diminuição nos valores do índice com a introdução da vazão de resiliência, de 0,90 para 0,89 em Barra Mansa e de 0,87 para 0,86 em Volta Redonda, em comparação com os resultados da aplicação do índice original.

Conclui-se, novamente, que, o fato de o subíndice de perigo apresentar valores elevados neste período e os reservatórios da bacia vazios (indicador de exposição IEx2) torna o valor do W-ScaRI alto também, mesmo com a introdução de redundâncias.

De acordo com os dados de ANA, em janeiro de 2015, a média de defluência em Santa Cecília foi de 52,7 m³/s. Embora a introdução do armazenamento de água, que produz uma vazão de resiliência igual 35 m³/s, não tenha influenciado significativamente o índice final, observa-se que neste momento mais crítico, seria possível suprir os déficits hídricos a jusante de Santa Cecília, considerando a soma das vazão de resiliência (Qres) e da vazão defluente

média em Santa Cecília (Q_{deflSC}), totalizando $87,7 \text{ m}^3/\text{s}$, cujo valor é superior ao limite mínimo estabelecido de $71 \text{ m}^3/\text{s}$ de defluência em SC para o Baixo Paraíba do Sul, de acordo com a Resolução 1382/2015. Assim, a sobra de água no trecho foi menor, com um valor de $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.3.2 Aplicação W-ScaRI-ResLocal em Volta Redonda e Barra Mansa

Levando em consideração que exista esta água adicional regularizada, foi feito um comparativo da vazão que é necessária para captação para os setores usuários de água em cada município, segundo dados do PERHI (2014), em relação à vazão de água produzida com as barragens locais.

No município de Barra Mansa a demanda de captação local é baixa ($1,18 \text{ m}^3/\text{s}$) em comparação à vazão possível de ser produzida neste município ($18,98 \text{ m}^3/\text{s}$). A Tabela 26 reúne a aplicação do W-ScaRIResLocal, e o cálculo do indicador de resiliência local (ResLocal).

Tabela 26. Índice final W-ScaRIResLocal em Barra Mansa.

Barra Mansa	
Demanda de Captação (m^3/s)	1,18
Vazão produzida local (m^3/s)	18,98
ResLocal = $(Q_{\text{demanda local}} - Q_{\text{produzida localmente}}) / Q_{\text{demanda local}}$	-15,09
W-SCARi	0

Observa-se que o multiplicador de resiliência deu negativo, uma vez que este corpo hídrico não precisa de toda a vazão produzida localmente, porque sua demanda é menor do que sua produção. Neste caso, o indicador de resiliência local é zero, fazendo com que o índice de risco a escassez hídrica local também seja igual a zero.

Para Barra Mansa, o índice de risco de escassez hídrica W-ScaRI passou de 0,89 para 0. Assim, pode-se concluir que Barra Mansa conseguiria ficar independente em relação ao uso

da água do rio Paraíba do Sul, uma vez que consegue suprir localmente suas demandas utilizando mananciais em seu território.

No município de Volta Redonda, a demanda local de captação é alta (16,25 m³/s) em comparação à vazão possível de ser produzida neste município (1,14 m³/s).

A Tabela 27 reúne a aplicação do W-ScaRI-ResLocal, e o cálculo do indicador de resiliência local (ResLocal).

Tabela 27. Índice final W-ScaRI-ResLocal em Volta Redonda.

Volta Redonda	
Demanda de Captação (m³/s)	16,25
Vazão produzida local (m³/s)	1,14
ResLocal = (Qdemanda local - Qproduzida localmente) / Qdemanda local	0,93
W-SCARi	0,80

Ou seja, neste caso de Volta Redonda, a demanda por água é muito maior do que a oferta local na área de abrangência do município. Com isso, multiplicando-se o indicador de resiliência local (0,93) ao W-ScaRI, o índice de risco de escassez hídrica passou de 0,86 para 0,80.

De uma forma geral, analisando cada um dos municípios, comparando a aplicação do W-ScaRI original e a adição da componente de resiliência (global e local) para janeiro de 2015, observa-se que houve uma redução do indicador para as duas localidades. No caso de Barra Mansa, o risco foi zerado quando a análise foi feita localmente. Estes resultados podem ser visualizados de forma resumida na Tabela 28.

Tabela 28. Painel de resultados.

JANEIRO / 2015					
Município	Subíndice de Consequência	W-ScaRI	Subíndice de Consequência com Resiliência	W-ScaRI-Res	W-ScaRI-ResLocal
Barra Mansa	0,86	0,90	0,84	0,89	0
Volta Redonda	0,81	0,87	0,79	0,86	0,80

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A presente dissertação propôs revisitar o Índice de Risco de Escassez Hídrica – W-ScaRI (Thomaz, 2023), com objetivo de ampliar sua capacidade de representação, para incluir também um componente de resiliência, complementando os componentes originais de risco, exposição e vulnerabilidade. Após a aplicação do índice W-ScaRI em sua forma original e, em seguida, considerando a versão modificada, que introduz o efeito da existência de redundância parcial de abastecimento na aplicação-teste, foi possível observar uma queda no resultado final do W-ScaRI, permitindo verificar que a proposta de introdução de um componente de resiliência foi funcional.

Adicionalmente, também se introduziu uma análise local, para avaliar a importância da redundância adicionada ao sistema, em termos de capacidade de suprimento da demanda local. Nesse sentido, os municípios de Barra Mansa e Volta Redonda foram trazidos para análise em mais detalhes. De forma local, observou-se a possibilidade de modificar o resultado do W-ScaRI conforme a importância da fonte alternativa para a resiliência local. Observou-se que o município de Barra Mansa poderia se tornar independente em relação ao uso de águas do rio Paraíba do Sul, porque sua demanda é menor do que a possibilidade de produção local de água introduzida na simulação, o que lhe traria uma redundância completa para a fonte atual e, portanto, até a possibilidade de substituição do atual abastecimento. Volta Redonda, com uma demanda maior por água, perceberia uma leve melhoria na redução de risco, com a redundância parcial introduzida, mas manteria sua dependência do sistema global.

Adicionalmente, foi possível concluir que o aumento da disponibilidade hídrica com a vazão de resiliência, obtida através da hipótese de construção de pequenas barragens locais, poderia suprir as necessidades hídricas a jusante de Santa Cecília, que não foram atendidas para o mês crítico de janeiro de 2015, e ainda adicionaria uma sobra de água armazenada para redução da exposição global. Ou seja, nessa simulação de teste para avaliação da metodologia proposta, o sistema do Paraíba do Sul deixaria de falhar em cumprir a vazão de restrição de jusante de Santa Cecília e ainda perceberia uma redução no cálculo do risco de escassez.

A complementação do índice W-ScaRI com a introdução do fator resiliência ampliou a representatividade deste como uma ferramenta de auxílio à gestão de risco de escassez e de planejamento para a situação de secas, apontando para a necessidade de se buscar um aumento

da segurança hídrica, como por exemplo, pela introdução de fontes alternativas de abastecimento.

O trabalho aqui desenvolvido considerou a regularização de vazões como possível alternativa. Esta escolha vai variar de local para local, conforme características específicas. Outras possibilidades podem incluir o uso mais sustentável da água, onde os municípios podem adotar medidas para reduzir as perdas no sistema e no consumo per capita (reduzindo a demanda, o que reflete em aumento de disponibilidade). Um efeito colateral positivo é que um sistema otimizado permite realizar investimentos para melhorar as condições de quantidade e qualidade da água e promover a universalização do acesso aos serviços de abastecimento (INEA,2018). Ainda é possível utilizar águas subterrâneas, dessalinização de água do mar e outras alternativas tecnológicas (reuso de águas industriais, ou de esgoto tratado, ou, ainda, águas de lavagem de filtros de ETAs, por exemplo).

Estudos futuros podem ainda buscar incluir outros aspectos no risco de escassez, o que implicaria em novos indicadores. As etapas do ciclo de gestão de risco de desastres tratam de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação. Uma recuperação eficaz do sistema exposto, frente ao efeito das secas, é essencial e ter estratégias eficientes associadas a um plano de recuperação robusto pode ajudar na recuperação de danos, para restaurar os ecossistemas e apoiar as comunidades afetadas. Isso exige coordenação entre governos, comunidades e empresas para garantir uma recuperação rápida, sustentável e resiliente (Sayers *et al.*, 2016). Portanto, é possível pensar em adicionar ao W-ScaRI um novo multiplicador que considere mecanismos de gestão, governança e financiamento para a recuperação – hipótese esta a ser investigada no futuro.

Ademais, sob o ponto de vista prático, e ainda no contexto de estudos futuros e considerando também a relevância de dados atualizados e bases de dados compatíveis entre as instituições, é pertinente que os planos de referência de informações estejam com informações precisas e mais recentes. No âmbito do Plano Estadual de Recursos Hídricos (2014), desenvolvido há 10 anos, é imprescindível que este estudo seja atualizado para que os dados de demanda hídrica, disponibilidade hídrica e balanço hídrico estejam mais coerentes e representem mais fidedignamente a realidade do estado do Rio de Janeiro para estudos atualizados de gestão de recursos hídricos e escassez hídrica.

Uma vez que a Gestão Estratégica de Riscos de Secas e Recursos Hídricos visa não apenas agir durante períodos de seca, mas também desenvolver a capacidade de mitigar seus impactos e acelerar a recuperação quando ela ocorre, ter um portfólio de medidas e instrumentos para gestão de risco de seca oferece diversas vantagens, em comparação com a abordagem de uma única medida. Isso envolve uma série de medidas e ações tanto durante como após a seca (Sayers *et al.*, 2016):

- Ações Antecipatórias e Preparação: monitoramento da seca e alerta para ações preventivas; atualização do plano de emergência conforme a gravidade da seca; soluções temporárias para o abastecimento de água aos usuários.
- Gestão da alocação de recursos hídricos: distribuição de água disponível, priorizando os usos mais críticos e essenciais; mercado de alocações de água, com a negociação e troca de direitos de uso da água para otimizar a distribuição e uso dos recursos escassos.
- Manutenção de Conexões críticas e Fluxos-base de água: garantir que as áreas de refúgio (habitats e ecossistemas essenciais) recebam a quantidade mínima de água necessária para sobreviver à seca.
- Recuperação Pós-Secas de ecossistemas e sistemas humanos mesmo após o fim da seca, com medidas, por exemplo, de suspensão das restrições de água, após a seca, desde que a disponibilidade o permita, compensações financeiras aos agricultores com apoio financeiro aos que enfrentaram perdas significativas durante o período de seca, restabelecimento dos controles de captação de água com ajuste das restrições de captação de água para garantir a recuperação sustentável dos ecossistemas e dos usuários; ajudar na recuperação de habitats naturais danificados e restaurar as populações de fauna e flora afetadas pela escassez de água.

Essas medidas individuais, quando combinadas, formam um portfólio de respostas que também pode aumentar a resiliência do sistema de gestão da água, dando-lhe mais elasticidade no enfrentamento de possíveis perdas, e reduz os riscos de falhas no abastecimento durante eventos de seca. Essas possibilidades podem ser estudadas no futuro para avaliar outras possíveis complementações no indicador de resiliência, abrindo novas capacidades de representação.

O portfólio incorpora redundância, o que proporciona mais confiança de que os riscos de seca serão gerenciados de maneira eficaz. A importância de um portfólio é garantir que, caso uma medida falhe, outras possam compensar, criando assim uma rede de segurança. Essa é uma construção apoiada no conceito da redundância. Isso torna o sistema mais robusto e melhor preparado para enfrentar desafios futuros (Sayers *et al.*, 2016).

Com base nesta pesquisa, sugere-se que a gestão adaptativa da seca esteja incluída nos planos de gestão de desastres e que o W-ScaRI possa ser usado como ferramenta de acompanhamento e gestão, uma vez que o clima está em constante mudança e isso ajudaria a dar versatilidade para capturar incertezas futuras nas condições climáticas, como sugerido por Ihinegbu & Ogunwumi (2021).

7 REFERÊNCIAS

1. AGEVAP. **Estudo da disponibilidade hídrica do Paraíba do Sul**. Rio de Janeiro, 2024.
2. ALMEIDA, HA.; MARQUES, MPF. **Análises comparativas de índices de seca meteorológica para o polo de Petrolina, PE e Juazeiro, BA**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 6, v6, ed4, p81-98Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/geografia/seca-meteorologica>Acesso em: 01 de janeiro de 2023.
3. ALPINO TMA, Freitas CM, Costa AM. **Seca com um desastre**. Revista Ciência e Trópico 2014; 8(2)109-134.
4. ANA. Resolução ANA nº 1.382/2015. Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA – Dispõe sobre as condições de operações a serem observadas para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul. <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/documentos-relacionados/resolucao-no-1382-2015.pdf/view>
5. ANA, "Crise Hídrica". Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos, Brasília, DF, Br, 2017. p. 127–164.
6. BAM H.N. Razafindrabe; Gulsan Ara Parvin; Akhilesh Surjan; Rajib Shaw. **Climate Disaster Resilience: Focus on Coastal Urban Cities in Asia**. Article in Asian Journal of

Environment and Disaster Management (AJEDM) – Focusing on Pro-active Risk Reduction in Asia. January 2009 DOI:10.3850/S179392402009000088

7. BARRERA J, Gamboa W, Gómez J, Valle J. 2011. **Método Holístico para la toma de decisiones en manejo de plagas**. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) Tapachula, Chiapas, México.
8. BIRKMANN, Jörn & Wisner, Ben . **Measuring the Un-MeasurableThe Challenge of Vulnerability**. Institute for Environmentand Human Security (UNU-EHS)UN Campus. Studies of the University:Research, Counsel, Education’Publication Series of UNU-EHSNo.5/2006. Germany
9. BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Ministério da Integração Nacional. WWF-Brasil. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima. Brasília, DF: MMA, 2017, 125 p
10. BRUNEAU, M. Chang, S. E., Eguchi, R., Lee, G. C. O’ROURKE, T. D., Reinhorn, A. M. Shinozuka, M. Tierney, K., Wallace W. A., Von Winterfeldt, D. **A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities**. Earth q. Spectra, vol. 19, no. 4, pp. 733–752, 2003.
11. CARLEY, Michael. 1985. **Indicadores sociais: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Zahar.
12. COHIDRO e Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul—AGEVAP. **Paraíba Do Sul River Basin Integrated Water Resources Plan and Affluent Basins Water Resources Action Plans: Diagnostic Report**, Tome 1; COHIDRO/AGEVAP: Resende, Brazil, 2014
13. COSTA, Larissa Ferreira da; Izabela Andrade Barcellos; Cinthia Avellar Martins; Vitor Luiz Victalino Galves. **Secas no Estado do Rio de Janeiro: o monitoramento sistêmico como ferramenta de segurança hídrica**. Revista Ineana v.10 n.1jan-jun 2022.
14. COSTA, LF.; FARIAS JÚNIOR, JEF.; JOHNSON, RMF. **Eventos hidrológicos extremos na região do Baixo Paraíba do Sul**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: GTA OH, 2019.
15. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras. Estudo da Vazão de 95% de permanência da sub-bacia 58**. Bacia do Paraíba do Sul. Projeto Disponibilidade Hídrica do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. 132p.: il.; Documento eletrônico - PDF. ISBN 978-85-7499-361-4. Diretoria De Hidrologia E

Gestão Territorial – DHT. Escritório Regional Do Rio De Janeiro – ERJ. Rio de Janeiro 2017. Disponível em www.cprm.gov.br.

16. CPRM - Serviço Geológico do Brasil & Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL. **Regionalização de Vazões Da Sub-Bacia 58 TOMO I – TEXTO**. Diretoria De Hidrologia E Gestão Territorial – DHT. Departamento de Hidrologia. CONVÊNIO: 015/2000 ANEEL – 013/CPRM/00. República Federativa Do Brasil. Ministério De Minas E Energia. Rio De Janeiro, junho de 2002

17. DAKOVA S, STANEV K. **Vulnerability Assessment To Water Scarcity And Drought By Implication Of Climate Changes Of Some Bulgarian Rivers**. National Institute of Hydrology and Meteorology, Sofia, Bulgaria. Variability in space and time of extreme rainfalls, floods and droughts. Proceedings of the AMHY-FRIEND. International Workshop on Hydrological Extremes, held at University of Calabria, Cosenza (Italy), June 6-8, 2007.

18. DOS SANTOS, VJ. *et al.* **O Conceito de Risco**. Revista de Geografia – PPGEIO – UFJF. Juiz de Fora, v.5, n.1, (Jan-Jun) p.33-42, 2015.

19. EM-DAT. The International Disaster Database. Center for Research on the Epidemiology of Disasters-CRED. Disponível em <http://www.emdat.be/database>.

20. FALKENMARK, M., LUNDQVIST, J. and WIDSTRAND, C. (1989) **Macro-Scale Water Scarcity Requires Micro-Scale Approaches: Aspects of Vulnerability in Semi-Arid Development**. Natural Resources Forum, 13, 258-267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>

21. FUNDAÇÃO COPPETEC/INEA. Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERHI-RJ. Relatório de Diagnóstico. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. <https://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/plano-estadual-de-recursos-hidricos/>

22. FUNDAÇÃO COPPETEC/INEA. Plano Estadual de Recursos Hídricos -PERHI-RJ. Relatório de Cenários Economico Demográfico. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. <https://www.agevap.org.br/downloads/Relatorio-Cenarios-Economico-Demografico.pdf>

23. GALLOPIN, Gilberto C. **Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity**. United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), Casilla 179 D, AvdaDag Hammarskjöld s/n, Santiago, Chile Received 28 November 2005; received in revised form 27 February 2006; accepted 28 February 2006.

24. GARRICK, D.; HALL, J. W. **Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways**. Annual Review of Environment and Resources, v. 39, n. 1, p. 611–639, out. 2014. DOI: /10.1146/annurev-environ-013012-093817.
25. GARZÓN, Dominguez, EDINSON Andrés | GALVIS Castaño, Alberto. **Evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano**. 2018
26. GAY, A.L. **Infraestrutura reslente: desempenho sostendo em um mundo smpre cambante**. Entretextos 8/24. 2016.
27. GLEICK, P. H. **On methods for assessing water-resource risks and vulnerabilities**. Environmental Research Letters, v. 10, p. 01–03, 2015. DOI: 10.1088/17489326/10/11/111003.
28. GODSCHALK, D. R. **Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities**. Natural Hazards Review, v. 4, n. 3, p. 136–143. 2003.
29. HOLLING, C. S. **Resilience and Stability of Ecological Systems**, Annual Review of Ecology and Systematics. 4(1), pp. 1–23. 1973. doi: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
30. HOLLING, C. S. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems, Ecosystems v. 4. p. 390 – 405, 2001. Disponível em <ftp://200.89.74.94/pub/Docencia/Sistemas_ecosociales/Literatura/Clase_1/Holling2001.pdf> .
31. HUSSAIN, Zafar□□· Zongmin□Wang1□· Jiaxue□Wang3□· Haibo□Yang1□· Muhammad□Arfan4□· Daniyal□Hassan5□· Wusen□Wang1□· Muhammad Imran□Azam6□· Muhammad□Faisal1. **A comparative Appraisal of Classical and Holistic Water Scarcity Indicators**. Water Resources Managementhttps://doi.org/10.1007/s11269-022-03061-z. Springer Nature B.V. 2022
32. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Municipalities GDP—2015. Available online: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=resultados>
33. IHINEGBU, Christopher; Ogunwumi, Taiwo. Multi-criteria modelling of drought: a study of Brandenburg Federal State, Germany. Modeling Earth Systems and Environment (2022) 8:2035–2049. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01197-2>. June 2021.
34. INEA - Instituto Estadual do Ambiente (RJ). **Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento e ordenamento territorial**. Instituto Estadual do Ambiente ; coordenação geral: Silvia Marie Ikemoto ;

coordenação executiva: Patrícia Rosa Martines Napoleão. – Rio de Janeiro, 2018. 464 p. : il. color.

35. INTEGRAL ENGENHARIA/FIRJAN. **Avaliação da Segurança Hídrica da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**: Relatório Final. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
36. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: novembro 2024.
37. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. fourth assessment report climate change 2007. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
38. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K Pachauri and L. A Meyer (eds.)]IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
39. KARAVITIS, Christos A. **Drought and urban water supplies: the case of metropolitan Athens**. Water Policy Volume 1, Issue 5, October 1998, Pages 505-524.
40. LI, H.; WANG, W. **Knowledge Domain and Emerging Trends of Social Vulnerability Research: A Bibliometric Analysis**.(1991–2021)Int J Environ Res.Public Health 2022, 19, 8342<https://doi.org/10.3390/ijerph19148342>
41. LIRA, Clarice BM, Fernanda Rocha THOMAZ, Marcelo MIGUEZ. **Proposta De Solução Integrada Para As Indústrias Do Baixo-Guandu Em Situações De Escassez Hídrica**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ISSN 2318-0358) Foz do Iguaçu. 2019.
42. LIU, Junguo,; HONG, Yang; Simon N. Gosling; Matti Kummu; Martina Flörke; Stephan Pfister; Naota Hanasaki; Yoshihide Wada; Xinxin Zhang; Chunmiao Zheng; Joseph Alcamo; Taikan Oki. **Water scarcity assessments in the past, resente, and future**. 2017. AGU Publications. Earth's Future. (Tradução: Avaliação da escassez de água no passado, presente e futuro).
43. MCKEE T. B.; DOESKEN N. J.; KLEIST J. (1993). **The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales**. In Anais do Eighth Conference on Applied Climatology. Anahaim, C.A. Jan. 1993. pp. 179 – 184.

44. MEKONNEN, Mesfin M.; Arjen Y. HOEKSTRA. **Four billion people facing severe water scarcity**. Science Advances. (Tradução: Quatro bilhões de pessoas enfrentam grave escassez de água). 2016.
45. MIGUEZ, M.G.; DI GREGORIO, L.T.; VERÓL, A.P. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., v1368 p. 2017.
46. MMA, 2017. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima. Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Integração Nacional, WWF-Brasil. — Brasília, DF: https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/estudo_secas_completo_com_isbn.pdf
47. MOLINAS, PA.; LIMA, LCTM. **Estudo de secas agrícolas no nordeste brasileiro**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. Anais [...]Belo Horizonte: ABRH, 1999.
48. MOURA, Micaella Raíssa Falcão de. **Gestão integrada e desafios à segurança dos recursos hídricos: proposta de índice de vulnerabilidade hídrica (IVH) na bacia do rio Capibaribe**. Micaella Raíssa Falcão de Moura – Recife, 2020.
49. MUGUME, S. N., DIAO, K., *et al.* (2015) **Enhancing resilience in urban water systems for future cities'**, *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(6), pp. 1343–1352. doi: 10.2166/ws.2015.098.
50. MUNN, R. E. **Towards Sustainable Development. Atmospheric Environment**. v. 26A, n. 15, p. 2725 - 2731, Toronto, Canada, 1992.
51. NDMC—National Drought Mitigation Center Us Drought Monitor. **Us Drought Monitor**. 2019. What is the US Drought Monitor. Disponível em: https://droughtmonitor.unl.edu/data/docs/what_is_usdm.pdf.
52. O'Brien, K.L. and Leichenko, R.M. Double Exposure: Assessing the Impact of Climate Change within the Context of Economic Globalization. *Global Environmental Change*, 10, 221-232. 2000.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780\(00\)00021-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780(00)00021-2)
53. ONS. Manual de Procedimentos da Operação Módulo 5 - Submódulo 5.11 Cadastro de Informações Operacionais Cadastro de Informações Operacionais Hidráulicas da Bacia do rio Paraíba do Sul. Vigência 22/11/2023.
54. OKI, Taikan; Rose; QUIOCHO. **Economically challenged and water scarce: identification of global populations most vulnerable to water crises**. *International Journal*

- of Water Resources Development, 36:2-3, 416-428, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1698413>
55. OKI, T., Yano, S., & HANASAKI, N. **Economics of virtual water trade.** Environmental Research Letters, 12, 044002. 2017. doi:10.1088/1748-9326/aa625f
 56. PAEGELOW, Martin, Jorge Quense, Anne Peltiera, Cristian Henríquez Ruizb, Lucie Le Goffa, Federico Arenas Vásquez and Jean-Marc Antoine. **Water vulnerabilities mapping: a multi-criteria and multi-scale assessment in central Chile.** Water Policy. 2022.
 57. PERVEEN S, James LA (2010) **Multiscale effects on spatial variability metrics in global water resources data.** Water Resour Manag 24:1903–1924. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9530-2>
 58. PROCTOR, Kyle; SEYED M. H. TABATABAIE; Ganti S. MURTHY. **Gateway to the perspectives of the Food-Energy-Water nexus.** 2020. Science of the Total Environment. (Tradução: Porta de entrada para as perspectivas do nexo Alimento-Energia-Água).
 59. RIJSBERMAN, FR. **Water scarcity: Fact or fiction?** Agric Water Manag 80:5–22.2006 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
 60. SANTOS, KMS. **Avaliação da eficiência do Monitor de Secas para definição de secas em Sergipe.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2020.
 61. Sayers, P.B., Li Yuanyuan, Moncrieff, C, Li Jianqiang, Tickner, D., Xu Xiangyu, Speed, R., Li Aihua, Lei Gang, Qiu Bing, Wei Yu and Pegram G. (2016) *Drought risk management: A strategic approach. Published by UNESCO, Paris on behalf of WWF.*
 62. SILVA, Semirames do Nascimento; LOPES, Francisco Guimarães; ANDRADE, Francisco Edu de; FERREIRA, Caio Braga; DANTAS, Maria Cândida de Almeida Mariz; SIQUEIRA, Eliezer da Cunha. **Efeitos da escassez hídrica na economia do perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. 12, No 1, p132-137, 2017 Pombal, PB, Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas. DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v12i1.5075>.
 63. SUASSUNA, Cynthia Carneiro de Albuquerque. **Cidade Resiliente: Sistema De Indicadores Dos Aspectos Institucionais.** Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano Universidade Federal de Pernambuco. RECIFE 2014
 64. THOMAZ, Fernanda Rocha. **Proposição de um índice de risco de escassez hídrica - Aplicação à RMRJ abastecida pelo sistema Guandu.** Fernanda Rocha Thomaz. - Rio de

Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2023. XIII, 169 p: il.; 29,7 cm. Orientador: Marcelo Gomes Miguez. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2023.

65. TIGKAS, D., VANGELIS, H. and TSAKIRIS, G. **DrinC: a software for drought analysis based on drought indices**. Earth Science Informatics, vol. 8, no. 3, pp. 697-709. 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>.

66. TSAKIRIS, G. and VANGELIS, H. **Establishing a Drought Index Incorporating Evapo-Transpiration**. European Water Journal, 9, 3-11. 2005.

67. UN-Habitat. World Cities Report 2024 Cities and Climate Action. First published in 2024 by United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2024. https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf

68. UNISDR - UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. Municipality Developing and managing water resources. Local Governments and Disaster Risk Reduction Good Practices and Lessons Learned A contribution to the “Making Cities Resilient” Campaign 2010. <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/13627> (página 52 em inglês, somente).

69. UNISDR - UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. Manual Como Construir Cidades Mais Resilientes Um Guia para Gestores Públicos Locais Uma contribuição à Campanha Global 2010-2015 Construindo Cidades Resilientes – Minha Cidade está se preparando! Genebra, Novembre de 2012. https://www.unisdr.org/files/26462_guiagestorespublicosweb.pdf

70. UN-WATER. Water Scarcity. 2023. Water facts. Disponível em: <http://www.unwater.org/water-facts/scarcity>. Acesso em: 19 jun. 2023.

71. WALKER, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig. 2004. **Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems**. Ecology and Society 9(2): 5. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>

72. WALTER, Isabela Lima Ribeiro. **Análise de Riscos em Usinas Hidrelétricas por Abordagens Complementares: Estudo Prático na Usina de Funil**. Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Civil, 2019.

73. WILHITE, Donald A. and GLANTZ, Michael H., "Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions" Drought Mitigation Center Faculty Publications. 1985. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20>

74. WILHITE, D. A. **Drought**. In: HOLTON, J. R.; PYLE, J. A.; CURRY, J.A. (Ed.). Encyclopedia of atmospheric sciences. New York: Elsevier, 2003. p. 650-658.
75. WILHITE, Donald A. **National Drought Policies: Addressing Impacts and Societal Vulnerability**. University of Nebraska Lincoln, dwilHITE2@unl.edu2011
76. WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION Provisional State of the Global Climate 2023.pdf disponível em: <https://wmo.int/sites/default/files/2023-11/WMO%20Provisional%20State%20of%20the%20Global%20Climate%202023.pdf>
77. WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Atlas da Mortalidade e Perdas Econômicas decorrentes de Extremos Meteorológicos, Climáticos e Hídricos da OMM, 2021. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/57564/download?file=1267_Atlas_of_Mortality_en.pdf&type=pdf&navigator=1
78. WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Provisional State of the Global Climate 2023.pdf disponível em: <https://wmo.int/sites/default/files/2023-11/WMO%20Provisional%20State%20of%20the%20Global%20Climate%202023.pdf>
79. WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges [Sl.]: WMO, 2006.24 p.
80. YUAN, Mei-Hua; Shang-Lien Lo. **Principles of food-energy-water nexus governance**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (Tradução: Princípios de governança do nexo alimento-energia-água). 2022.
81. YUSTA, JOSÉ, CORREA, GABRIEL, y ARANTEGUI, ROBERTO. **Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art**. Energy Policy, Vol. 39, Núm. 10. 2011.
82. ZUNIGA-TERAN Adriana A.; Andrea K Gerlak; Brian Mayer; Tom P Evans. **Urban resilience and green infrastructure systems: towards a multidimensional evaluation**. Current Opinion in Environmental Sustainability. Volume 44, June 2020, Pages 42-47 <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.05.001>.