



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
DOUTORADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**TESE DE DOUTORADO**

**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO HÍBRIDA DOS RECURSOS  
HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO: PROPOSTA METODOLÓGICA  
DE GESTÃO SISTEMÁTICA**

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO**

Campina Grande – PB

2024

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO**

**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO HÍBRIDA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO  
SEMIÁRIDO: PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO SISTEMÁTICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

**Linha de pesquisa:** Qualidade de Sistemas Ambientais

**Orientador(a):** Prof. Dr. Rui de Oliveira

Campina Grande – PB

2024

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A663a Araújo, Matheus Duarte de.  
Abordagem multicritério híbrida dos recursos hídricos no semiárido [manuscrito] : proposta metodológica de gestão sistemática / Matheus Duarte de Araújo. - 2024.  
120 p. : il. colorido.

Digitado.

Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Rui de Oliveira, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

1. Escassez de água. 2. Análise multicritério. 3. Modelo de rede de fluxo. 4. Região semiárida. 5. Gestão sistemática. I.

Título


21. ed. CDD 628

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO**

**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO HÍBRIDA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO: PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO SISTEMÁTICA**


Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Tese de Doutorado aprovada em 23/02/2024

Documento assinado digitalmente  
 **RUI DE OLIVEIRA**  
Data: 04/03/2024 09:52:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Prof. Dr. Rui de Oliveira**  
*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental*  
*Universidade Estadual da Paraíba - UEPB*

**Orientador**

Documento assinado digitalmente  
 **RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO**  
Data: 05/03/2024 11:05:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento**  
*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental*  
*Universidade Estadual da Paraíba - UEPB*

**Examinadora Externa**

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO FERNANDES VIEIRA**  
Data: 04/03/2024 12:17:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


**Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira**  
*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental*  
*Universidade Estadual da Paraíba – UEPB*

**Examinador Interno**

Documento assinado digitalmente  
 **MAIARA GABRIELLE DE SOUZA MELO**  
Data: 05/03/2024 19:36:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Maiara Gabrielle de Souza Melo**  
*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*

**Examinadora Externa**

Documento assinado digitalmente  
 **ANDRE LUIS CALADO ARAUJO**  
Data: 05/03/2024 15:04:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Andre Luis Calado Araujo**  
*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN*  
**Examinador Externo**

**CAMPINA GRANDE – PB**  
**2024**

*“Longe de muita água vi poucos homens felizes, talvez nenhum, mas perto dela vi muitas vezes corações contentes e sorrisos largos(...).”*

*Iran Schleder*

**Dedico**

à minha esposa, Karollinne Duarte,  
e aos meus pais, Rosemary Duarte e Olisvaldo de Araújo,  
por todo amor e incentivo para que eu chegasse até aqui.

**AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela presença constante em minha vida e pela oportunidade de realizar essa conquista.

À minha esposa, Karollinne Duarte, por ser suporte e o encorajamento da minha caminhada.

À minha família, em especial aos meus pais Rosemary e Olisvaldo, e à minha irmã Déborah, por todo amor, apoio e incentivo para que eu pudesse concretizar esse sonho.

Ao meu orientador, professor Dr. Rui de Oliveira, por sua amizade, orientação e confiança para realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pela dedicação de seu tempo na contribuição deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

A cada pessoa que contribuiu com minha evolução pessoal e profissional, meu muito obrigado!

## APRESENTAÇÃO

Esta tese foi desenvolvida ao longo de 4 anos de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), como exigência final para obtenção do título de doutor em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Qualidade de Sistemas Ambientais.

Minha história acadêmica se desenvolve no município de Campina Grande, Paraíba, com a graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (2010-2014) na UEPB. Em seguida, foi realizado o mestrado em Engenharia Civil e Ambiental (2015-2017) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde desenvolvi a dissertação “Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil”.

Ao longo do mestrado, aprofundei meus conhecimentos na temática de gerenciamento de recursos hídricos com ênfase em desenvolvimento de metodologias integradas. De modo que no doutorado, com início em 2020, continuei os estudos até desenvolver uma proposta de gestão sistemática por abordagens multicritério híbrida. Nesse contexto, tive a satisfação de estudar a sistematização do gerenciamento de recursos hídricos em regiões semiáridas, principalmente no que se refere à integração dos aspectos quantitativos e qualitativos da disponibilidade hídrica.

O presente estudo busca sua relevância ao desenvolver uma proposta metodológica que permita dar suporte à decisão de gestores da água, de modo que contribua na gestão sob percepção holística do uso da água. O tema é útil à demanda social devido ao histórico de seca na região Semiárida, e possui contribuição científica significativa por discutir as escolhas de métodos como determinantes às respostas de modelos utilizados por peritos na literatura.

O desenvolvimento da tese buscou respaldo nos Multi-Criteria Decision Making (MCDM), ou Métodos de Tomada de Decisão Multicritério, sobretudo ao discutir as aplicabilidades e diferenciações de modelos diversos. A modelagem de rede de fluxo e o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG) também estiveram presentes nas etapas de evolução do estudo, permitindo o desenvolvimento de um arcabouço metodológico de gestão racional e sustentável, com orientações que possam ser úteis para os tomadores de decisão em regiões semiáridas.



## RESUMO

A escassez de água no semiárido brasileiro é uma crise multifacetada, envolvendo aspectos ambientais, sociais e econômicos. A gestão eficiente da água nesta área torna-se crucial para satisfazer as necessidades presentes e futuras de forma sustentável. A tese propõe uma abordagem metodológica inovadora, utilizando modelos híbridos para identificar e avaliar a vulnerabilidade dos sistemas hídricos, classificando alternativas de gestão em termos de quantidade e qualidade da água. Esta abordagem está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas e a Gestão Sistemática dos Recursos Hídricos (GSRH). Este estudo concentrou-se em bacias hidrográficas localizadas na região semiárida do Nordeste do Brasil, considerando a particularidade desse cenário. A metodologia divide-se em três etapas fundamentais alinhadas às metas do ODS6 Água limpa e Esgotamento Sanitário. Inicialmente, emprega-se um modelo multicritério híbrido, baseado em SIG, para mapear regiões vulneráveis à escassez hídrica em uma região doadora e outra receptora de águas no semiárido. Posteriormente, desenvolve-se um modelo híbrido combinando a modelagem de rede de fluxo e entropia-multicritério, utilizado para avaliar alternativas de gerenciamento da demanda de água em escala de reservatório. Por fim, são desenvolvidos e comparados modelos multicritério híbridos para a seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias. Os resultados apontam que a vulnerabilidade à escassez de água na região doadora de água para a transposição pode ser mais crítica do que na região receptora, influenciada pela escolha do método de ponderação. Os resultados das simulações da rede de fluxo, a partir da simulação do cenário de referência (A0), demonstraram que o sistema ausente de medidas de gerenciamento apresenta uma frequência de atendimento às demandas humanas de apenas 65% do período simulado. A classificação de alternativas permite sugerir mecanismos de economia e aumento da eficiência no uso da água, ressaltando a necessidade de abordagens baseadas em racionalidade, modernização e sustentabilidade. A hierarquia do tratamento de águas residuárias apresentou os Jardins Filtrantes como a alternativa mais bem classificada, enquanto o sistema de Lodo Ativado ocupou a última posição. A presente abordagem híbrida pode orientar tomadores de decisão e gestores de águas nas regiões estudadas, fornecendo medidas de gestão em resposta aos modelos propostos.

**Palavras-chave:** Escassez de Água; Análise Multicritério; Modelo de rede de fluxo; Região Semiárida; Gestão Sistemática.

## ABSTRACT

The water scarcity in the Brazilian semiarid region is a multifaceted crisis, involving environmental, social, and economic aspects. Efficient water management in this area becomes crucial to meet present and future needs sustainably. The thesis proposes an innovative methodological approach, using hybrid models to identify and assess the vulnerability of water systems, classifying management alternatives in terms of quantity and quality of water. This approach aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) proposed by the United Nations and the Systematic Management of Water Resources (SMWR). This study focused on watersheds located in the semiarid region of Northeast Brazil, considering the uniqueness of this scenario. The methodology is divided into three fundamental stages aligned with the targets of SDG 6 Clean Water and Sanitation. Initially, a hybrid multicriteria model, based on GIS, is employed to map regions vulnerable to water scarcity in both donor and recipient regions of water in the semiarid. Subsequently, a hybrid model combining flow network modeling and entropy-multicriteria is developed to assess water demand management alternatives at a reservoir scale. Finally, hybrid multicriteria models are developed and compared for the selection and classification of wastewater treatment technologies. The results indicate that vulnerability to water scarcity in the donor region for transposition may be more critical than in the recipient region, influenced by the choice of weighting method. The results of flow network simulations, based on the reference scenario (A0), showed that the system without management measures has a human demand fulfillment frequency of only 65% of the simulated period. The classification of alternatives suggests mechanisms for water conservation and increased efficiency in water use, emphasizing the need for rational, modernization, and sustainable approaches. The hierarchy of wastewater treatment ranked Filtration Gardens as the top-performing alternative, while the Activated Sludge system occupied the lowest position. This hybrid approach can guide decision-makers and water managers in the studied regions, providing management measures in response to the proposed models.

**Keywords:** Water Scarcity; Multicriteria Analysis; Flow network model; Semiarid Region; Systematic Management.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Metas do ODS 6: Água limpa e Esgotamento Sanitário.....	23
<b>Figura 2</b> - Eixos de abastecimento do PISF no Estado da Paraíba.....	29
<b>Figura 3</b> - Dimensões da Segurança Hídrica .....	36
<b>Figura 4</b> - Interface usuário-sistema do modelo de rede de fluxo AcquaNet.....	38
<b>Figura 5</b> - Esquema do processo de estruturação metodológica.....	53
<b>Figura 6</b> - Delimitações geográficas abordadas da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – doadora de águas de transposição, e a BHPB – receptora das águas da transposição do rio São Francisco. ....	55
<b>Figura 7</b> - Localização do reservatório Epitácio Pessoa na bacia hidrográfica do rio Paraíba.....	56
<b>Figura 8</b> - Representação esquemática proposta para a análise e mapeamento da vulnerabilidade à escassez hídrica .....	58
<b>Figura 9</b> - Rede de Fluxo do hidrossistema Epitácio Pessoa na região do Alto Curso do Rio Paraíba. ....	62
<b>Figura 10</b> - Indicadores/Critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica para a região do médio São Francisco.....	71
<b>Figura 11</b> – Indicadores/Critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica para a Bacia do rio Paraíba. ....	72
<b>Figura 12</b> - Mapeamento da escassez hídrica da Região do Médio São Francisco – Região doadora e da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba – região receptora, pela combinação dos métodos: a) AHP simplificado-VIKOR; b) Entropy-VIKOR; c) CRITIC-VIKOR.....	76
<b>Figura 13</b> - Sensibilidade da combinação do método de ponderação -VIKOR.....	79
<b>Figura 14</b> - Vazões demandadas por alternativa de gerenciamento, vazões médias alocadas e o percentual de atendimento da demanda necessária: a) abastecimento humano; b) Irrigação. ....	82
<b>Figura 15</b> - Análise de sensibilidade por mudança do peso .....	89
<b>Figura 16</b> - Coeficiente de sensibilidade por alteração dos pesos no VIKOR, AHP, WSM e TOPSIS. ....	90
<b>Figura 17</b> - Gráfico de radar para a classificação em termos de diferentes métodos e cenários. ...	91

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Estratégias envolvidas na gestão da água em projetos de transposição expostos pela literatura .....	26
<b>Quadro 2</b> - Estudos recentes sobre SIG associados à análise multicritério .....	33
<b>Quadro 3</b> - Critérios selecionados relacionados à vulnerabilidade à escassez hídrica .....	59
<b>Quadro 4</b> - Alternativas de gerenciamento da demanda hídrica consideradas na abordagem.....	63
<b>Quadro 5</b> - Avaliação relativa das tecnologias de tratamento (fase líquida) de efluente doméstico selecionadas.....	68
<b>Quadro 6</b> - Pesos sugeridos para os diferentes critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica obtidos por 10 especialistas e média geométrica .....	73
<b>Quadro 7</b> - Ranking em termos dos diferentes cenários de prioridades.....	84
<b>Quadro 8</b> - Resultados a partir da Entropia de Shannon.....	86
<b>Quadro 9</b> - Ranking nos métodos e cenários .....	88
<b>Quadro 10</b> - Recomendações propostas à política de tratamento de águas residuárias em regiões semiáridas .....	92
<b>Quadro 10</b> - Proposição de medidas de gestão sistemática com base nos modelos desenvolvidos .....	94
<b>Quadro 11</b> - Quadro síntese para a aplicabilidade dos métodos de ponderação e métodos multicritério utilizados .....	95
<b>Quadro 12</b> - Estrutura de implementação da metodologia e estratégias de GSRH propostas .....	96

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Pesos de critérios em diferentes cenários .....	67
<b>Tabela 2</b> - Pesos dos métodos AHP simplificado, entropia de Shannon e CRITIC. ....	73
<b>Tabela 3</b> - Coeficientes de correlação de Spearman para os métodos de ponderação .....	74
<b>Tabela 4</b> - Coeficientes de correlação de Spearman para a classificação VIKOR sob os diferentes métodos de ponderação .....	76
<b>Tabela 5</b> - Mudanças de classificações no ajuste dos critérios .....	77
<b>Tabela 6</b> - Características e resultados do atendimento às demandas por alternativa de gerenciamento da demanda. ....	81
<b>Tabela 7</b> - Pesos da Entropia de Shannon. ....	83
<b>Tabela 8</b> - Pesos dos critérios no Shannon Entropy.....	85
<b>Tabela 9</b> - Coeficiente de sensibilidade .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANA	Agência Nacional de Àguas e Saneamento Básico
BHRPB	Bacia Hidrográfica do rio Paraíba
BHRSF	Bacia Hidrográfica do rio São Franscisco
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRITIC	Criteria Importance Through Intercriteria Correlation
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
ELECTREE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GPS	Gestão Pública Sustentável
GSRH	Gestão Sistemática dos Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFDM	Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISH	Índice de Segurança Hídrica
LF	Lagoa Facultativa
MODSIM	Modelagem e Simulação
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBF	Programa Bolsa Família
PIB	Produto Interno Bruto
PISF	Projeto de Integração do rio São Francisco
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RMSF	Região Fisiográfica do Médio São Francisco
ROM	Rank order method
SAW	Statistical analysis e Simple Additive Weighting
SE	Situação de Emergência
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SSD	Sistemas de Suporte à Decisão
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manto de Lodo
VIKOR	Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje
WSM	Weighted Sum Model

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 Objetivo geral .....	20
2.2 Objetivos específicos .....	20
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Objetivo do Desenvolvimento Sustentável: Água Limpa e Esgotamento Sanitário... 22</b>	
<b>3.2 Gestão sistemática dos recursos hídricos no semiárido brasileiro..... 23</b>	
3.2.1 Transferência de águas entre bacias hidrográfica .....	25
3.2.2 Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional .....	27
3.2.3 Análise espacial: identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica..... 30	
3.2.4 Preservação da disponibilidade quantitativa: alternativas de gerenciamento da demanda hídrica..... 33	
3.2.5 Preservação da disponibilidade qualitativa: tratamento de águas residuárias domésticas .....	36
<b>3.3 Modelagem de rede de fluxo..... 37</b>	
<b>3.4 Métodos de apoio à decisão multicritério..... 39</b>	
3.4.1 Modelo WSM..... 40	
3.4.2 Modelo AHP..... 41	
3.4.3 Modelo TOPSIS..... 42	
3.4.4 Modelo VIKOR .....	44
<b>3.5 Métodos de ponderação associados a modelos multicritério..... 46</b>	
3.5.1 Entropia de Shannon .....	47
3.5.2 CRITIC .....	49
3.5.3 AHP Simplificada..... 50	
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>51</b>
4.1 Caracterização da área de estudo .....	52



<b>4.2 Proposta metodológica de gestão sistemática dos recursos hídricos .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.1 Abordagem híbrida de identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2 Abordagem híbrida de avaliação de alternativas de gerenciamento da demanda de água.....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.3 Abordagem híbrida de seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias domésticas .....</b>	<b>64</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
<b>5.1 Identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica.....</b>	<b>69</b>
<b>5.2 Simulação e classificação de alternativas de gerenciamento de demanda de água....</b>	<b>80</b>
<b>5.3 Simulação e classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas .....</b>	<b>85</b>
<b>5.4 Síntese dos resultados da GSRH.....</b>	<b>93</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os episódios históricos de escassez hídrica em regiões semiáridas brasileiras fazem parte do cotidiano nordestino, desafiando a ciência e a tecnologia de recursos naturais na busca por atender às múltiplas demandas de água (Araújo, Ribeiro e Braga, 2019). A crescente demanda hídrica, agravada pela poluição dos mananciais, exerce pressão crescente sobre os recursos hídricos, tornando-se um obstáculo ao desenvolvimento social e econômico nessas regiões (Amorim, Ribeiro e Braga, 2016).

As regiões semiáridas apresentam médias de precipitação com grande irregularidade espacial e temporal, além de alta taxa de evaporação (Barros et al., 2020). Nesse sentido, o atendimento às múltiplas demandas se constitui em um desafio da gestão de recursos hídricos, principalmente em virtude do aumento populacional, do desenvolvimento econômico, dos incrementos nas taxas de urbanização e da realidade de mudanças climáticas em regiões de clima semiárido (Cirilo et al., 2019).

Caracterizado por chuvas irregulares, com níveis de precipitação anual geralmente abaixo de 800 mm, o semiárido enfrenta dificuldades significativas na disponibilidade de água, sobretudo na região do nordeste brasileiro (Rodrigues, 2022). Essa escassez é agravada por fatores como solos rasos e cristalinos, que causam a intermitência de muitos rios, e taxas de evaporação que frequentemente excedem 2.000 mm por ano (Silva, 2022). A combinação desses fatores torna o acesso à água potável e a gestão sustentável dos recursos hídricos uma tarefa desafiadora, de modo que encontrar soluções para esses desafios é fundamental para promover o desenvolvimento sustentável e a resiliência em uma região onde a água é um recurso valioso e escasso (Brito et al., 2021; Cunha et al., 2019).

Ademais, a escassez hídrica é uma preocupação global à medida que os impactos das mudanças climáticas se intensificam. O Relatório Especial Aquecimento Global do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas alerta que até 2030 a escassez será exacerbada em várias partes do mundo devido às mudanças climáticas, o que pode suceder impactos expressivos em regiões semiáridas (Fitton et al., 2019). Nessa conjuntura, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece um conjunto de objetivos globais para o desenvolvimento sustentável, com o propósito de abordar os desafios ambientais, sociais e econômicos, que incluem as preocupações acerca da disponibilidade hídrica (Tsalis et al., 2020).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representam um compromisso global com a promoção de um futuro sustentável para o Planeta na Agenda 2030. De tal modo

que é urgente a necessidade de tomar medidas para enfrentar a crise hídrica e o agravamento das mudanças climáticas, destacando-se a importância da capacitação e do planejamento eficaz nos países menos desenvolvidos para atingimento das metas de sustentabilidade (Leal et al., 2019).

O ODS 6, intitulado “Água Limpa e Esgotamento Sanitário para todos”, representa um plano de ação para a promoção de mecanismos de capacitação e planejamento eficaz em relação às mudanças climáticas e à gestão dos recursos hídricos. Este ODS é intrinsecamente ligado ao ODS 13, denominado “Ação contra a Mudança Global do Clima”, e ambos os objetivos convergem em direção a um futuro sustentável e se inserem na problemática de disponibilidade hídrica (Kroll et al., 2019).

A gestão da água e o saneamento adequado desempenham um papel fundamental na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, tornando-se cruciais na busca por um ambiente mais resiliente (Brito et al., 2021). O ODS 6 apresenta metas ambiciosas para garantir o acesso universal à água potável segura e promover a gestão sustentável dos recursos hídricos em uma agenda de cumprimento até 2030. As metas do ODS 6 incluem alcançar o acesso universal e equitativo à água potável segura (Meta 6.1), aumentar substancialmente a eficiência do uso de água em todos os setores (Meta 6.2), assegurar a sustentabilidade de captação e abastecimento de água doce (Meta 6.3), proteção e restauração de ecossistemas relacionados com a água, fortalecimento e participação das comunidades locais na melhoria da gestão da água e do esgotamento sanitário (Meta 6.6), entre outras (ONU, 2015). Essas metas representam um compromisso global para garantir que todos tenham acesso à água potável e esgotamento sanitário adequado, promovendo a gestão sustentável dos recursos hídricos e a qualidade da água (Arora and Mishra, 2019).

Para alcançar as metas dos ODS, Asr et al. (2019) afirmam que é necessária uma abordagem multidisciplinar que envolva não apenas os governos, mas também a sociedade civil, empresas e organizações não governamentais. Zhang et al. (2019) discutem ainda que a gestão de recursos hídricos e a mitigação das mudanças climáticas devem ser realizadas de forma integrada, ou seja, devem abranger desde a disponibilização quantitativa da água até aspectos de uso e descarte dos efluentes. Ou seja, é urgente a necessidade de desenvolvimento de abordagens metodológicas modernas de planejamento e gerenciamento, fomentando a adoção de práticas contemporâneas, racionais, e sustentáveis, fundamentando uma mudança de paradigma em relação à gestão dos recursos hídricos (Fraisl et al., 2020; Fatimah et al., 2020).

Silva, Ribeiro e Miranda (2017) corroboram com essa narrativa, atribuindo o fornecimento insuficiente em quantidade e qualidade de água nessas regiões em decorrência de

uma ineficiente gestão do recurso, sendo assim, de forma primária, um problema de governança. Segundo Nguyen et al. (2019), uma gestão ativa e eficiente é pré-requisito para oferta e uso correto desse recurso, uma vez que se percebe que, além do desafio de atendimento às demandas, concorre o uso irracional e desmedido da água em grandes cidades (Bailone e Roça, 2017; Kosolapova et al., 2017; Bolgov e Demin, 2018).

De acordo com os objetivos da Lei Nº 9.433 de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), uma gestão eficiente da água deve assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos. Para auxiliar a gestão dos recursos hídricos na otimização da tomada de decisão, Nassery et al. (2017) e Rad et al. (2017) destacam que a solução aponta para que os atores envolvidos contem com o emprego de modelos de gerenciamento de recursos hídricos.

A modelagem é uma ferramenta capaz de simular e explicar os fatores naturais e antropogênicos que governam e interferem na eficiência de sistemas hídricos complexos (Mamede et al., 2018). Como referem Zhang et al. (2017), os modelos adequados à realidade de regiões de clima semiárido devem ter a capacidade de reconhecer e remediar a vulnerabilidade à escassez hídrica de forma sistemática, como preconiza a PNRH.

Para a análise holística de sistemas naturais, modelos podem contribuir como abordagens metodológicas para interpretar os processos e características de uso dos recursos (Siniscalchi et al., 2018; Moura et al., 2020; Pereira et al., 2019). Os modelos são ferramentais úteis na prática do gerenciamento, podendo, por exemplo, realizar um diagnóstico da atual situação de um sistema hídrico, o que possibilita projetar um cenário de otimização para o processo e sua real condição de atendimento (Nassery et al., 2017).

Diversos estudos têm sido feitos para diagnósticos e projeções futuras no gerenciamento de recursos naturais a partir de modelos e proposições metodológicas, exemplificados pelos estudos de Lanini et al. (2019), Camelo et al. (2020) e Araujo et al. (2020), percebendo-se que, na medida em que a complexidade de um processo aumenta, a complexidade dos modelos também tende a aumentar. Os inúmeros trabalhos, que utilizam modelos como ferramentas de suporte, apresentam metodologias que variam entre o uso isolado, a exemplo dos modelos matemáticos de rede de fluxo, modelos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), modelos de análise multicritério, e o uso de modelos híbridos, que são modelos e/ou métodos combinados (Tena et al., 2019, Araújo et al., 2022, Cordão et al., 2020).

A modelagem de rede de fluxo, por exemplo, é ordinariamente utilizada para resolução de problemas de alocação de água em bacias complexas (Yan et al., 2018). Como abordagem híbrida, os modelos de rede de fluxo foram associados, dentre outros, à construção de cenários

para avaliar capacidades de transferência de água entre bacias (Shourian et al., 2017), à base SIG para avaliar o impacto de atividades planejadas em um sistema de recursos hídricos (Li et al., 2017), e à análise multicritério para análises de preservação de sistemas hídricos (Shabbir e Ahmad, 2016; Alamanos et al., 2018; Santos et al., 2019).

Ainda como exemplo de modelos aplicáveis ao gerenciamento de recursos hídricos, os modelos de análise multicritério têm sido amplamente utilizados como ferramenta de gestão, haja vista a capacidade de sintetizar problemas com critérios conflitantes, e apresentarem uma diversidade de opções que sistematizam problemas complexos em funções matemáticas, derivando diferentes informações (Piegat e Salabun, 2015). Associado metodologicamente a modelos multicritério, alguns autores passaram a integrar o conceito de entropia, proveniente da teoria da informação, chamada de entropia de Shannon, a exemplo dos estudos de Chen e Qu, (2006), Krylovas et al. (2017), e Li et al. (2020).

Apesar de existirem metodologias híbridas que sugerem e orientam a gestão de recursos hídricos em vista à sustentabilidade, entende-se que estas abordagens focam no gerenciamento de recursos hídricos em aspectos restritos à quantidade ou qualidade da água. Ainda é possível destacar que a utilização de modelos e métodos multicritério por escolha singular, ou seja, aplicação de modelos e métodos únicos em desempenho de sustentabilidade, desfavorecem a tomada de decisão global e sistemática, isto é, não proporcionam a gestão holística e eficiente da disponibilidade hídrica.

Dessa forma, entende-se que através da utilização de modelos matemáticos de rede de fluxo, modelos de base SIG e de métodos entropia-multicritério aplicados à gestão de recursos naturais, assim como observando-se a demanda por modelos mais complexos e robustos na gestão de recursos hídricos, o presente estudo insere-se entre os que desenvolvem uma abordagem híbrida, através dos modelos citados, como proposta metodológica inovadora para a promoção de uma gestão sistemática dos recursos hídricos, isto é, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, preconizada pela 1ª diretriz da PNRH.

A premissa desse estudo, objetivo geral da tese, é que o desenvolvimento de uma estrutura metodológica híbrida justifica-se por identificar (através da modelagem de rede de fluxo), espacializar (por base SIG), e ordenar alternativas de gerenciamento (em aspectos de quantidade e qualidade) em classificação hierárquica (através da entropia - análise multicritério), a fim de proporcionar uma adequada gestão sistemática dos recursos hídricos no semiárido alinhada com as metas do ODS 6. A hipótese consiste que o arcabouço metodológico pode apoiar a definição de políticas públicas, possivelmente dando suporte à tomada de decisão e considerando a perspectiva sistemática de integração de qualidade e quantidade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma estrutura metodológica por modelos híbridos para identificar e espacializar a vulnerabilidade de sistemas hídricos, e que seja capaz de classificar hierarquicamente alternativas de gerenciamento (em aspectos de quantidade e qualidade) com vistas à gestão sistemática dos recursos hídricos e promoção do ODS 6 – Água Limpa e Esgotamento Sanitário para todos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma abordagem para identificação, mapeamento e avaliação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica, com o propósito de contribuir para o acesso universal à água potável segura (alinhado à Meta 6.1 do ODS 6);
- Propor uma abordagem para classificação hierárquica de alternativas de gerenciamento da demanda de água em reservatório do semiárido, com vistas a melhorar a eficiência no uso da água e assegurar seu uso sustentável (alinhado à Meta 6.4 do ODS 6);
- Estabelecer uma classificação hierárquica de alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas para proteção dos ecossistemas e universalização do esgotamento sanitário no semiárido (alinhado as Metas 6.3 e 6.6 do ODS 6);
- Comparar métodos multicritérios aplicados ao gerenciamento dos recursos hídricos, identificando as vantagens e limitações para tomada de decisões relacionadas à água;
- Propor estratégias de gestão sistemática para lidar com a escassez hídrica em diferentes escalas com foco na disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Água Potável e Saneamento (ODS 6) e Ação Contra a Mudança Global do Clima (ODS 13)**

A Agenda 2030 das Nações Unidas estabeleceu os ODS como um chamado global para enfrentar desafios críticos em direção a um mundo mais sustentável (ONU, 2015). O ODS 6, "Água Limpa e Esgotamento Sanitário para todos", desempenha um papel central para uma abordagem multidisciplinar, haja visto que uma gestão sistemática dos recursos hídricos em regiões semiáridas deve estar em conformidade com as metas estabelecidas pela Agenda (Lacerda et al., 2020).

A gestão sustentável da água desempenha um papel fundamental entre os ODS interconectados das Nações Unidas. Especificamente, o objetivo "Água Limpa Esgotamento Sanitário para todos", concentra-se na garantia de acesso universal à água potável segura e na gestão sustentável dos recursos hídricos. Em regiões semiáridas, onde a água é escassa e vulnerável à escassez, essa gestão otimizada é crucial (Hussain et al., 2019). Simultaneamente, o ODS13, "Ação Contra a Mudança Global do Clima", busca enfrentar os desafios da mudança climática, que têm implicações significativas na disponibilidade de água.

As mudanças climáticas afetam a disponibilidade e distribuição da água, tornando a gestão eficaz dos recursos hídricos ainda mais essencial. Medidas para melhorar a qualidade da água, reduzir a poluição e promover a eficiência no uso da água, como proposto no ODS 6, desempenham um papel vital na adaptação às mudanças climáticas (Zhang et, 2019). Além disso, a gestão adequada da água contribui para a redução da pressão sobre os ecossistemas aquáticos, em consonância com as metas do ODS 13 de proteção e restauração dos ecossistemas (Anton et al., 2019).

Ademais, a gestão sustentável da água em regiões semiáridas, de acordo com o ODS 6, não apenas promove o acesso à água potável segura e a gestão dos recursos hídricos, mas também contribui para a mitigação dos impactos da mudança global do clima, conforme expresso no ODS 13. A interconexão entre esses objetivos ilustra a importância da abordagem integrada para enfrentar os desafios complexos da água e da mudança climática em um mundo mais sustentável (Mio et al., 2020). Nesse contexto de esforço mundial, o ODS 6 estabelece metas específicas (Figura 1) no contexto de sustentabilidade.

**Figura 1** – Metas do ODS 6: Água limpa e Esgotamento sanitário.



Fonte: Baseado em ONU (2015).

- Meta 6.1: Alcançar o acesso universal e equitativo à água potável segura e acessível para todos até 2030.
- Meta 6.2: Alcançar o acesso ao esgotamento sanitário e higiene adequados e equitativos para todos, e pôr fim à defecação a céu aberto, com especial atenção às necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situações de vulnerabilidade até 2030.
- Meta 6.3: Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente o reciclo e resuo seguro.
- Meta 6.4: Aumentar substancialmente a eficiência do uso de água em todos os setores e assegurar a sustentabilidade de captação e abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a falta de água até 2030.
- Meta 6.5: Implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis de governo, inclusive por meio da cooperação transfronteiriça, conforme apropriado.



- Meta 6.6: Proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos.
- Meta 6.A: Expandir a cooperação internacional e o apoio técnico aos países em desenvolvimento na capacitação de recursos humanos, transferência de tecnologia e acesso a conhecimentos, pesquisa e inovação.
- Meta 6.B: Apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais na melhoria da gestão da água e do saneamento. Essas metas representam um compromisso global para garantir que todos tenham acesso à água potável e esgotamento sanitário, promovendo a gestão sustentável dos recursos hídricos e a qualidade da água.

As metas apresentadas desempenham um papel essencial na fomentação do desenvolvimento sustentável em escala global. Na particularidade das regiões semiáridas, marcadas pela escassez recorrente de água e por desafios múltiplos, a tese alinha-se com essas metas em diversas dimensões.

### **3.2 Gestão sistemática dos recursos hídricos no semiárido brasileiro**

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é regida pela PNRH, que estabelece os princípios, diretrizes e instrumentos para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos em todo o território nacional. Por gestão sistemática, a ANA (2020) dispõe que os recursos hídricos devem ser cuidados de maneira contínua e organizada, mobilizando-se instituições e os recursos humanos e financeiros necessários, por meio de planejamento, monitoramento e avaliação regular dos resultados. Além disso, é definido que o gerenciamento das águas deve contemplar as questões relacionadas à sua quantidade e qualidade (Brasil, 1997).

Embora o Brasil seja um dos países com maior disponibilidade hídrica no mundo, algumas regiões apresentam elevado risco à escassez hídrica (Jacobi, Empinotti e Schmidt, 2016; Freitas et al., 2020). Nesse sentido, é importante destacar que, espacialmente, há uma má distribuição da água ao longo do território brasileiro (Rocha e Soares, 2015), mesmo que o volume total de água doce disponível seja bastante expressivo. A gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro historicamente tem sido um desafio complexo para o planejamento nacional, haja visto que a região enfrenta condições climáticas adversas, com chuvas escassas e irregulares, tornando a disponibilidade de água um recurso crítico (Soares et al., 2021).

Por seu clima, vegetação e solo, regiões no semiárido apresentam precipitação de grande irregularidade espacial e temporal, com média anual de 750 mm e alta taxa de evaporação,

representando alto risco à segurança hídrica (Souza et al., 2017; Silva et al., 2017; Medeiros et al., 2018).

Soares et al. (2021) referem que para garantir a efetividade da gestão dos recursos hídricos no semiárido, é necessário avançar na implementação dos instrumentos previstos na PNRH, tais como a outorga de direito de uso da água, cobrança pelo uso da água, enquadramento dos corpos d'água em classes de qualidade e planos de recursos hídricos. Além disso, Crispim et al. (2022) destacam que é importante aprimorar a gestão integrada e participativa, desenvolvendo abordagens holísticas, envolvendo diferentes setores da sociedade no processo de tomada de decisão e na definição de prioridades para o uso dos recursos hídricos em cada região hidrográfica.

Ademais, a gestão sistemática dos recursos hídricos (preconizada nas diretrizes da PNRH) deve consistir em um processo integrado e contínuo que contemple desde a administração, proteção, conservação, desenvolvimento, até o uso racional dos recursos hídricos (ANA, 2020). Para alcançar este objetivo, é necessário implementar um conjunto de políticas, planos, programas e projetos que buscam assegurar a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para atender às diversas atividades humanas e à preservação dos ecossistemas aquáticos (Lima et al., 2020).

Como referem Cordão et al. (2020), sabendo-se que os eventos climáticos não podem ser controlados, que a PNRH no Brasil objetiva a preservação da disponibilidade hídrica para atuais e futuras gerações, considerando o crescimento da demanda em regiões semiáridas, uma gestão sistemática dos recursos hídricos deve buscar modelos de gestão eficientes que integrem práticas de manutenção da disponibilidade, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.

A gestão desses recursos no semiárido tem sido desempenhada por Comitês de Bacias Hidrográficas, que são órgãos colegiados compostos por representantes de diversos setores, como governos, sociedade civil, usuários de água e organizações não governamentais (ANA, 2020). Esses comitês têm a responsabilidade de aprovar planos de recursos hídricos, estabelecer critérios para outorga de direitos de uso da água, e promover a participação da comunidade na gestão dos recursos hídricos (Jacobi e Fracalanza, 2005). No entanto, a gestão de recursos hídricos no semiárido enfrenta várias questões críticas devido às características da região. Segundo Soares et al. (2021) algumas dessas questões incluem:

- Escassez de água: a disponibilidade de água é limitada na região, o que leva à competição e, até mesmo, conflitos entre diversos setores, como agricultura,

indústria e abastecimento público. A gestão equitativa e sustentável dos recursos hídricos é essencial.

- Desigualdades sociais: A região do semiárido é marcada por desigualdades socioeconômicas, o que pode resultar em acesso desigual à água e agravar a vulnerabilidade de comunidades mais carentes.
- Impactos das mudanças climáticas: as mudanças climáticas estão tornando a variabilidade das chuvas ainda mais acentuada, o que exige adaptação e planejamento de longo prazo na gestão de recursos hídricos.
- Uso inadequado da água: Práticas de uso inadequado da água, como o desperdício, a irrigação ineficiente e o desmatamento, podem agravar a escassez de água.

Dadas essas questões críticas, Leite et al. (2023) referem ainda que há um mau funcionamento flagrante de governança da água no semiárido. A presença de critérios conflitantes na gestão, sejam estes ambientais, operacionais, sociais e econômicos, bem como a não perspectiva holística histórica da gestão, promovem as falhas presentes na sustentabilidade do uso da água (Brito et al., 2021).

### **3.2.1 Transferência de águas entre bacias hidrográficas**

A transposição hídrica é uma medida adotada para enfrentar a escassez hídrica em regiões afetadas pela falta de água (ANA, 2020). Esse processo envolve a transferência de água de uma bacia hidrográfica, denominada bacia doadora, para outra, chamada bacia receptora, com o objetivo de suprir a demanda por água em áreas que sofrem com a escassez (Roque, 2023). A transposição hídrica pode ser uma estratégia para melhorar o abastecimento de água para usos diversos, como consumo humano, agricultura e indústria, além de mitigar os impactos da seca (Cruz et al, 2021). No entanto, os impactos negativos devem ser considerados em sua escolha, bem como a gestão deve ser realizada de forma sustentável, considerando os impactos ambientais, sociais e econômicos, além do monitoramento do uso da água e promoção da equidade na sua distribuição (Medeiros et al., 2022).

Ferrarini et al. (2020) destacam que a gestão da transposição hídrica deve envolver planejamento, controles de construção e operação e a manutenção de infraestruturas que permitam a transferência controlada de água entre bacias. Como vivenciado mundialmente, a gestão de recursos hídricos em escala internacional é uma prática complexa, especialmente em projetos de transposição de bacias que atravessam fronteiras regionais e nacionais (Calado, 2020; Pêgo et al., 2022).

Exemplos notáveis incluem a Transposição do Rio Colorado, compartilhado pelos Estados Unidos e México, regulado pelo Tratado da Água de 1944. Acordo que visa garantir uma parcela específica da água para o México, impactando o abastecimento e a agricultura nas regiões fronteiriças. O Projeto de Alqueva, uma grande infraestrutura que integra Portugal e Espanha. Na Ásia Central, países como Cazaquistão e Uzbequistão compartilham os rios Amu Darya e Syr Darya. Na Europa, o Sistema de Transposição do Danúbio-Tisza-Danúbio envolve Hungria, Sérvia e Croácia. Nos Estados Unidos, a Transposição do Rio Mississippi lida com o controle de inundações, impactando várias bacias e envolvendo acordos entre estados e jurisdições locais, entre outros (Rodrigues, 2020).

A prática na gestão da água em experiências internacionais de transposição tem se apresentado desafiadora, exigindo cooperação, negociação e compromissos sustentáveis (Marcovitch, 2022). A colaboração entre nações é fundamental para garantir benefícios justos e o uso responsável dos recursos hídricos. No Brasil, o histórico de projetos de integração de bacias destaca a necessidade de visão estratégica na gestão hídrica. Exemplos como a transposição do Rio Tietê para a Baixada Santista no início do Século XX mostram a busca por atender às crescentes demandas de energia e abastecimento (Santos, 2014).

O Sistema Cantareira em São Paulo, uma complexa rede de reservatórios, túneis e canais, exemplifica como a engenharia hídrica pode ser aplicada para incrementar o abastecimento em áreas metropolitanas densamente povoadas (Chodi e Souza, 2022). O Projeto Várzeas de Souza, na Paraíba, destaca esforços integrados de desenvolvimento regional e gestão hídrica, interligando reservatórios (Hackbart, et al., 2015).

Essas experiências, tanto no cenário internacional quanto nacional, ressaltam a importância da gestão cuidadosa e da busca por soluções sustentáveis para enfrentar os desafios relacionados aos recursos hídricos. Algumas das principais estratégias e elementos envolvidos na gestão da água em projetos de transposição expostos pela literatura incluem (Rosa et al., 2021; Martin et al., 2021):

**Quadro 1** – Estratégias envolvidas na gestão da água em projetos de transposição expostos pela literatura.

<b>Estratégia proposta</b>	<b>Características principais</b>
<b>Acordos e tratados bilaterais ou multilaterais</b>	A base para a gestão da água em projetos de transposição é a celebração de acordos e tratados entre regiões ou países envolvidos. Esses acordos estabelecem os princípios e regras para a transposição, incluindo a quantidade de água a ser compartilhada, os mecanismos de resolução de conflitos, as obrigações de monitoramento e relatórios, entre outros.
<b>Comitês de gestão conjunta</b>	: Para implementar os acordos de transposição, muitas vezes são criados comitês ou órgãos conjuntos compostos por representantes dos países envolvidos. Esses comitês têm a responsabilidade de supervisionar a operação e a manutenção das infraestruturas, bem como garantir que os acordos sejam cumpridos.

<b>Monitoramento e avaliação</b>	A gestão eficaz da água requer a coleta regular de dados e informações sobre a disponibilidade, a qualidade e a distribuição da água transposta. Isso permite avaliar o desempenho do projeto e tomar medidas corretivas quando necessário.
<b>Transparência e prestação de contas</b>	A prestação de contas e a transparência são fundamentais para garantir que os acordos sejam cumpridos de maneira justa e equitativa. Isso envolve a divulgação de informações relevantes para as partes envolvidas e para o público em geral.
<b>Gestão adaptativa</b>	A gestão da água em projetos de transposição deve ser adaptativa, ou seja, capaz de se ajustar às mudanças nas condições ambientais, climáticas e sociais ao longo do tempo. Isso requer a flexibilidade para alterar as operações, se necessário, com base em novos dados e informações.
<b>Conservação e proteção ambiental</b>	Projetos de transposição frequentemente acarretam impactos ambientais, demandando a implementação de ações efetivas para minimizar e mitigar esses efeitos. Isso pode envolver a proteção de habitats aquáticos, a preservação de áreas de recarga de aquíferos e a restauração de ecossistemas afetados.
<b>Participação pública</b>	Participação pública: Envolver as comunidades locais e partes interessadas no processo de gestão é essencial para garantir que suas preocupações sejam ouvidas e que o projeto beneficie a todos de forma justa.
<b>Resolução de conflitos</b>	Os acordos de transposição devem estabelecer mecanismos eficazes de resolução de conflitos para lidar com disputas que possam surgir ao longo do tempo. Isso pode envolver a mediação, a arbitragem ou outras formas de solução de litígios.

Fonte: Baseado em Rosa et al. (2021) e Martin et al. (2021).

Além dessas experiências mencionadas, diversos outros projetos de integração de bacias de menor porte foram executados no Brasil, visando atender às demandas específicas de diferentes regiões do país. No entanto, o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) continua a se destacar como o maior e mais complexo projeto de interligação de bacias hidrográficas do Brasil, desempenhando um papel fundamental na busca por soluções para a escassez hídrica na Região Nordeste do país. A gestão cuidadosa e a busca de soluções sustentáveis são elementos essenciais para garantir o sucesso desses projetos e para atender às necessidades de abastecimento de água e desenvolvimento regional (Ferrarini et al., 2020; Coutinho e Cataldi, 2021).

### **3.2.2 Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional**

O Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) transpõe água do Rio São Francisco, uma bacia doadora, para áreas do Nordeste brasileiro que sofrem com a escassez hídrica, como os estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte (SUDENE, 2018). No entanto, essa obra de engenharia é objeto de debates e controvérsias, devido a impactos ambientais, sociais e econômicos, bem como os desafios na sua implementação, como a manutenção da qualidade da água e a gestão dos recursos hídricos nas regiões doadoras e receptoras.

A transposição do Rio São Francisco evidencia a complexidade da gestão da água em contextos de escassez hídrica (Gonçalves et al., 2023). O PISF é composto por dois eixos de

transposição, o Eixo Norte e o Eixo Leste, que juntos totalizam centenas de quilômetros de canais, aquedutos e estações de bombeamento (MI, 2019). A transferência de água do Rio São Francisco para as áreas receptoras é realizada por meio dessas infraestruturas, possibilitando o aumento da disponibilidade hídrica nas regiões áridas do Nordeste. A Figura 2 apresenta os Eixos de abastecimento do PISF no Estado da Paraíba.

**Figura 2** – Eixos de abastecimento do PISF no Estado da Paraíba.



Fonte: Ministério da Economia (2019).

Como dispõem Rosa et al. (2021), Calado (2020) e Costa (2022), o PISF é emblemático não apenas pela sua magnitude, mas também pelas complexas questões envolvidas em projetos de transposição hídrica, como a necessidade de equilibrar o desenvolvimento econômico e o bem-estar social com a preservação ambiental e a gestão sustentável dos recursos hídricos. A discussão contínua sobre o projeto destaca a importância de avaliar cuidadosamente os impactos e benefícios, bem como de estabelecer estratégias de gestão e mitigação de problemas relacionados à transposição de água em regiões vulneráveis.

Segundo Costa (2022), alguns dos principais pontos de discussão incluem:

- Impactos ambientais: A transposição do São Francisco tem suscitado preocupações em relação aos possíveis impactos ambientais, como a alteração de ecossistemas aquáticos, a redução da vazão e a qualidade da água no próprio São Francisco e nos rios receptores.

- Conflitos sociais: A construção do PISF envolveu o deslocamento de comunidades locais e desapropriações de terras, gerando conflitos sociais e tensões.
- Custo e prazos: O projeto enfrentou atrasos e aumentos nos custos, tornando-se mais oneroso do que inicialmente planejado.
- Manutenção e gestão: A operação e manutenção das infraestruturas são desafios significativos para garantir o funcionamento adequado do sistema de transposição.
- Equidade na distribuição: A distribuição da água entre os estados receptores e a garantia de que as comunidades mais carentes sejam beneficiadas são questões cruciais.

Cordão et al. (2020) referem que em uma política de águas pautada na PNRH, é preciso considerar os múltiplos usos da água, seja para abastecimento humano, dessedentação, seja para a agricultura, entre outras. Araújo et al. (2022) discutem ainda que é importante observar e analisar o recebimento de água às cidades ao longo dos eixos, e refletir se as cidades estão preparadas para tal, especificamente no que se refere à gestão dessas águas, no que inclui distribuição, acessibilidade, reuso, ações de revitalização, entre outros.

Quando se observam esses eixos e as cidades são avaliadas, Silva et al. (2022) destacam que se verifica a necessidade de uma gestão mais efetiva, uma vez que reservatórios, municípios, bacias hidrográficas e não têm uma Política de Meio Ambiente bem definida, conquanto ainda não possuem uma efetiva Política de Saneamento. O relatório do SNIS (BRASIL, 2017) demonstra que há um descumprimento flagrante dos pressupostos das regras de saneamento básico no Brasil, conforme estabelecido na Lei n.11.445/2007, principalmente no que mencionam os princípios fundamentais do saneamento básico no Brasil, quais sejam: universalidade, disponibilidade, esgotamento, tratamento dos esgotos, articulação com as políticas de desenvolvimento urbano e regional, de habitação, de combate à pobreza e de sua erradicação, de proteção ambiental, de promoção da saúde e outras de relevante interesse social voltadas para a melhoria da qualidade de vida, para as quais o saneamento básico seja fator determinante; eficiência, segurança, qualidade, regularidade e controle social (Custódio, 2023).

Garcia e Wanderley (2023) corroboram com este discurso, de modo que referem que os municípios que estão na zona de influência do PISF não estão adequados. Existe ineficiência na governança, na alocação da água, reuso das águas residuais de esgotos residenciais, industriais e comerciais, gestão dos resíduos sólidos, entre outros, evidenciando uma distância para o cenário ideal de cidades sustentáveis. Ao longo dos eixos de transposição, ainda é

presente uma “felicidade imediatista” pela chegada das águas, pouco se discutindo o uso racional da água, saneamento básico, e estratégias de resiliência a eventos de seca (Rossiter et al., 2021).

Considerando a importância da preservação qualitativa e quantitativa da água em regiões semiáridas e das dificuldades citadas de gestão de águas transpostas, é fundamental buscar alternativas de gestão que considerem a integração dos mais diferentes aspectos. Desse modo, é possível considerar, objetivo da presente tese, que uma abordagem multicritério possa auxiliar na gestão de recursos hídricos no semiárido envolvendo os fatores citados como águas transpostas, uso da água, operação de reservatórios e lançamento de efluentes.

### **3.2.3 Análise espacial: identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica**

O mapeamento de regiões hídricas vulneráveis é um processo importante na prevenção do desabastecimento hídrico em áreas de risco (Paungarttem., 2022). Tucci e Chagas (2017) definem que regiões hídricas vulneráveis são áreas geográficas onde os recursos hídricos, como rios, lagos, aquíferos e/ou reservatórios de água, enfrentam ameaças significativas de degradação, escassez, poluição ou esgotamento, tornando essas áreas suscetíveis a problemas relacionados à disponibilidade e qualidade da água.

Um planejamento efetivo inicia-se essencialmente com um diagnóstico dos recursos hídricos municipais para uma boa gestão da demanda, uma vez que a partir da identificação de áreas prioritárias, pode-se ter um panorama mais acurado da situação da bacia hidrográfica frente aos municípios que a compõem (Johnsson et al., 2018). O diagnóstico eficaz é aquele que deve ser elaborado com a sistematização das informações disponíveis por diferentes fontes de dados, e pode ser utilizado para o monitoramento ambiental tanto dos espaços urbanos quanto de espaços rurais dos municípios, servindo para a tomada de medidas proativas e reativas ao risco (Gesualdo et al., 2021).

Nesse sentido, a bacia hidrográfica é a unidade territorial de implementação da PNRH, o que lhes confere um papel indutor de desenvolvimento e conservação, simultaneamente em que as dimensões ambientais, sociais e econômicas interagem e interdependem entre si no contexto local da bacia hidrográfica (ANA, 2020). A vulnerabilidade à escassez hídrica em bacias hidrográficas pode afetar uma série de elementos relacionados ao abastecimento de água, irrigação, geração de energia hidrelétrica, entre outros (Pakmehr et al., 2020).



A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BRSF), que é uma das mais importantes do Brasil pelo elevado volume de água de atendimento a regiões semiáridas, apresenta crises hídricas históricas relacionadas à seca (Rocha et al., 2022). A escassez hídrica na bacia provém da irregularidade temporal e espacial da precipitação, e é pressionada por modelos de gestão hídrica ineficazes (Barros et al., 2022; Rocha et al., 2022). Corrobora a esse contexto o disposto por Brito et al. (2021), segundo os autores, a disponibilidade hídrica deficitária é um risco de natureza ambiental, social e econômica, o que caracteriza uma crise da governança da sustentabilidade dos recursos naturais.

Na literatura, encontram-se diversos estudos que abordam a otimização da gestão de recursos naturais, fornecendo experiências aplicáveis à gestão de bacias. Exemplos dessas pesquisas incluem os trabalhos de Othman et al. (2010), Chamanehpour et al. (2017) e Neto et al. (2020). Além disso, no contexto da vulnerabilidade a eventos adversos com abordagem espacial, destacam-se estudos relevantes conduzidos por Al-juaidi et al. (2018), Mosavi et al. (2020) e Samanta et al. (2020). Essas pesquisas oferecem perspectivas valiosas para compreender e lidar com os desafios associados à gestão de bacias e à resposta a eventos adversos.

A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) tem sido uma tendência mundial nestas pesquisas espaciais ambientais, pois é uma ferramenta capaz de contribuir como um complexo de funções com recursos avançados que proporciona o armazenamento, recuperação, manipulação e apresentação de dados geograficamente localizados aos operadores (Nowak et al., 2020).

Os diversos trabalhos que utilizam SIG geralmente se apresentam em metodologias que variam entre seu uso particular, e o uso de abordagens híbridas, que são desenvolvidas a partir de métodos ou sistemas combinados (Chen et al., 2018). Segundo Kabak et al. (2018), entre as abordagens híbridas, destaca-se a utilização de SIG associado a métodos de análise multicritério para potencialização de estudos geoespaciais. Essa abordagem, além de manipular e espacializar dados georreferenciados, pode lidar com a importância dos elementos de um problema de decisão complexo, classificando-os em estrutura classificatória (Souissi et al., 2020). O Quadro 2 apresenta estudos recentes que utilizaram SIG associado a métodos de análise multicritério.

**Quadro 2** – Estudos recentes sobre SIG associado à análise multicritério.

<b>Referência</b>	<b>Objetivo e escopo</b>	<b>Método multicritério associado ao SIG</b>
<b>Nyimbili e Erden (2017)</b>	Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos	Lógica Fuzzy e AHP-Entropia

<b>Feizi et al. (2017)</b>	Mapeamento de potencial mineral	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) e Analytic Hierarchy Process (AHP) - Shannon Entropy
<b>Yalcin et al. (2017)</b>	Determinação e mapeamento de áreas potenciais geotérmicas	AHP
<b>Veronesi et al. (2017)</b>	Seleção de localização ótima de torres de transmissão elétricas	Statistical analysis e Simple Additive Weighting (SAW)
<b>Xu et al. (2018)</b>	Verificação de alocação de estação de carregamento de veículos elétricos de uma perspectiva sustentável	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité-Entropy (ELECTRE)
<b>Ding et al. (2018)</b>	Seleção de localizações de aterro de resíduos de construção	AHP-Entropia
<b>Chakraborty et al. (2018)</b>	Uma avaliação de desempenho de estradas em nível estadual	Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)
<b>Ostovari et al. (2019)</b>	Desenvolvimento e avaliação de um modelo de adequação da terra para cultivo de colza	AHP
<b>Kaya et al. (2020)</b>	Determinação de parâmetros que afetam as estações de carregamento de veículos	AHP, PROMETHEE e Vlsekriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje (VIKOR)
<b>Cogato et al. (2020)</b>	Análises de parâmetros de influência na mecanização da vinha	AHP, Fuzzy AHP, e Rank order method (ROM)
<b>Li et al. (2020)</b>	Seleção do local de parque eólico	Fuzzy AHP e VIKOR
<b>Razavi et al. (2020)</b>	Seleção do local de usinas eólicas	AHP e VIKOR
<b>Kumar et al. (2020)</b>	Mapeamento do potencial da água subterrânea	AHP
<b>Nyimbili et al. (2020)</b>	Avaliação da adequação das instalações de emergência urbanas	AHP-Entropia
<b>Nag et al. (2020)</b>	Priorização ideal de sub-bacias hidrográficas com base em zonas suscetíveis à erosão	TOPSIS-Entropia
<b>Cordão et al. (2020)</b>	Mapeamento de risco de escassez de água em uma cidade de médio porte	AHP
<b>Forootan e Seyedi (2021)</b>	Delineamento de zonas potenciais de água subterrânea	AHP-Entropia
<b>Sari (2021)</b>	Mapeamento de suscetibilidade a incêndios florestais	VIKOR e TOPSIS
<b>Sahin et al. (2021)</b>	Seleção de local para fábricas automotivas	Entropia-VIKOR e CRITIC-VIKOR
<b>Xu et al. (2021)</b>	Avaliação da sustentabilidade das megacidades e identificação de obstáculos urbanos	TOPSIS-Entropia

A partir da revisão de literatura da associação de tecnologia SIG e métodos de análises multicritério aplicados à gestão dos recursos, verifica-se que as aplicações recentes dessas abordagens híbridas são focadas nos aspectos de mapeamento de áreas susceptíveis a problemas ambientais, e, no que concerne à água, aplicações em escala de município. Percebem-se limitações de estudos de abordagens espaciais de múltiplos critérios relacionados a eventos de seca em bacias hidrográficas, bem como de comparações da influência de escolha do método de ponderação nos resultados de análises multicritério de base SIG.

Nesse sentido, uma das etapas propostas neste trabalho objetiva desenvolver e aplicar uma nova abordagem multicritério baseada em SIG para mapeamento de vulnerabilidade à escassez hídrica em bacias hidrográficas, e realizar uma, sem precedentes, comparação da influência da escolha de métodos de ponderação nos resultados da análise espacial.

#### **3.2.4 Preservação da disponibilidade quantitativa: alternativas de gerenciamento da demanda hídrica**

Diante do contexto de escassez hídrica em regiões do semiárido brasileiro, a comunidade técnico-científica de engenharia de recursos hídricos assume um desafio para uma efetiva disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade (Gondim et al., 2018; Cavalcante Júnior et al., 2019; Caetano et al., 2020). O número de conflitos decorrentes do uso da água é considerável, sendo necessário o desenvolvimento da infraestrutura hídrica para atendimento às múltiplas demandas (Lindoso et al., 2018; Santos et al., 2019).

Segundo Albuquerque (2004) e Sousa (2017), as medidas (ou alternativas) de gerenciamento de recursos hídricos que buscam viabilizar o fornecimento em um uso racional e com apropriada qualidade, variam entre:

- Ações tecnológicas: medição individualizada em edifícios, instalações prediais que reduzam o consumo (equipamentos economizadores), sistemas individuais ou comunitários de captação de água de chuva, micro e macromedição na rede, redução de perdas, transposição de águas, reuso de efluente de ETE, tratamento e lançamento apropriado de águas residuárias para proteção dos recursos hídricos, entre outros;
- Ações econômicas: estímulos fiscais para redução de consumo e adoção de novos instrumentos tecnológicos, tarifação que estimule o uso eficiente da água sem penalizar os usuários mais frágeis economicamente, estímulos ou penalização financeira que induzam o aumento da eficiência da concessionária de distribuição de água, cobrança pelo uso da água bruta, entre outros;
- Ações regulatórias/institucionais: legislação que induza o uso racional da água, regulamentação de uso da água para usos externos, regulamentação de novos sistemas construtivos e de instalações prediais, regulamentação mais adequada da prestação do serviço de distribuição de água, outorga pelo uso da água, criação de comitês de bacias, entre outros.

A preservação da disponibilidade quantitativa de recursos hídricos é uma preocupação constante em todo o mundo, especialmente em regiões onde a escassez de água é uma realidade. Nesse sentido, Cordão et al. (2020) referem que alternativas de gerenciamento da demanda hídrica são fundamentais para garantir a sustentabilidade dos sistemas hídricos.

Uma das alternativas mais eficientes é a adoção de práticas de uso racional da água, que podem reduzir significativamente o consumo e a demanda hídrica. Essas práticas podem ser aplicadas em diversos setores, como a agricultura, a indústria e o setor residencial (Araújo e Oliveira, 2021). Medidas como a adoção de tecnologias mais eficientes, a recirculação de água, a reutilização de efluentes tratados e a conscientização da população sobre o uso consciente da água são algumas das estratégias que podem ser adotadas para reduzir o consumo e a demanda hídrica. Além disso, políticas públicas de incentivo à adoção de práticas de uso racional da água por parte dos diversos setores econômicos também são fundamentais para garantir a efetividade dessas medidas (Ungureanu et al., 2020).

A gestão sistemática de recursos hídricos pode utilizar-se de medidas de gerenciamento do uso água para uma efetiva preservação dos corpos hídricos no semiárido (Lindoso et al., 2018). De modo que adotar medidas modernas, racionais e sustentáveis torna-se imprescindível no contexto de risco à escassez (Silva, Ribeiro e Miranda, 2017). Nesse contexto, tecnologias de captação e armazenamento de água da chuva., sistemas de cisternas e barragens subterrâneas são exemplos de soluções que podem ajudar a garantir o abastecimento de água em períodos de seca prolongada (Cavalcante Júnior et al., 2019). Ademais, o uso de técnicas de irrigação eficientes, que evitem o desperdício de água, também podem contribuir para a preservação dos recursos hídricos na região. Nesse contexto, as dimensões da segurança hídrica são apresentadas na Figura 3.

**Figura 3** – Dimensões da Segurança Hídrica



Fonte: ANA (2020).

Esta pesquisa insere-se no contexto de desenvolvimento de abordagens metodológicas de escolha e estudo de alternativas tecnológicas de gerenciamento para efetiva disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade, sendo estas: equipamentos economizadores de água, captação de água de chuva, reúso de águas cinzas, reúso de efluente de ETE, transposição de águas e tratamento de águas residuárias.

### **3.2.5 Preservação da disponibilidade qualitativa: tratamento de águas residuárias domésticas**

A escassez de água no Planeta é uma realidade evidente, considerando que apenas 0,63% do volume total é constituído por água doce, encontrada em rios, lagos e aquíferos (Ribeiro e Rolim, 2017). Isso ressalta a importância da preservação desses recursos, especialmente em regiões semiáridas, para evitar a contaminação dessa parcela disponível (Lucena et al., 2018; Salgado et al., 2018; Sperling et al., 2020).

Conforme Maragon et al. (2020), o despejo de águas residuárias domésticas não tratadas representa um alto risco para a disponibilidade hídrica, especialmente em regiões semiáridas.

Sperling (2016) destaca que 38% das famílias no semiárido brasileiro não têm acesso a tecnologias de tratamento de esgoto. Nesse contexto, a escolha apropriada de alternativas de tratamento de águas residuárias torna-se crucial para proteger as fontes de água de abastecimento, e, portanto, a disponibilidade hídrica (Gnansounou et al., 2017; Pivetta et al., 2020). Contudo, a diversidade de tecnologias disponíveis dificulta a seleção da mais sustentável, pois envolve critérios econômicos, ambientais e sociais (Arroyo e Molinos-Senante, 2017).

O semiárido brasileiro, historicamente sujeito à escassez hídrica, enfrenta ameaças à sustentabilidade hídrica devido à contaminação das fontes de água por águas residuárias domésticas não tratadas. Medidas de preservação e uso consciente dos recursos hídricos são fundamentais para evitar danos irreversíveis ao ecossistema. Nesse contexto, a aplicação de modelos híbridos de abordagem multicritério para selecionar tecnologias de tratamento de águas residuárias surge como uma solução eficaz para auxiliar a sustentabilidade hídrica na região.

A tendência global de utilizar abordagens de tomada de decisão multicritério para enfrentar esse desafio é clara. Esses modelos permitem a consideração equilibrada das dimensões econômicas, ambientais e sociais na escolha da alternativa mais sustentável de tratamento de águas residuárias. No âmbito da seleção de tecnologias de tratamento de águas residuárias, diversos métodos multicritério tem sido aplicados em todo o mundo, como exemplificado por Arroyo e Senante (2017), Mahjouri et al. (2017) e Lazim et al. (2017). Este trabalho contribui para esse contexto ao desenvolver e comparar modelos híbridos de abordagem multicritério, combinando métodos de ponderação a modelos multicritério, como ferramentas de apoio à decisão para preservar a disponibilidade de recursos hídricos no semiárido brasileiro.

### **3.2 Modelagem de rede de fluxo**

Para uma gestão sistemática de preservação da disponibilidade hídrica no semiárido, os atores envolvidos na gestão ainda podem contar com ferramentas metodológicas que são geralmente denominadas como sistemas de suporte à decisão – SSD (Wei e Xia, 2017; Yan et al., 2018; Araújo, Ribeiro e Braga, 2019). Uma das técnicas SSD's utilizadas é a simulação matemática através de modelos de rede de fluxo. Diversos autores utilizaram modelos de rede de fluxo para auxiliar na resolução de problemas em sistemas hídricos complexos. Dentre eles,

pode-se citar os relevantes trabalhos de Maliehe e Mulungu (2017), Kishiwa et al. (2018), Dehghanipour et al. (2019) e Maniranjan et al. (2020).

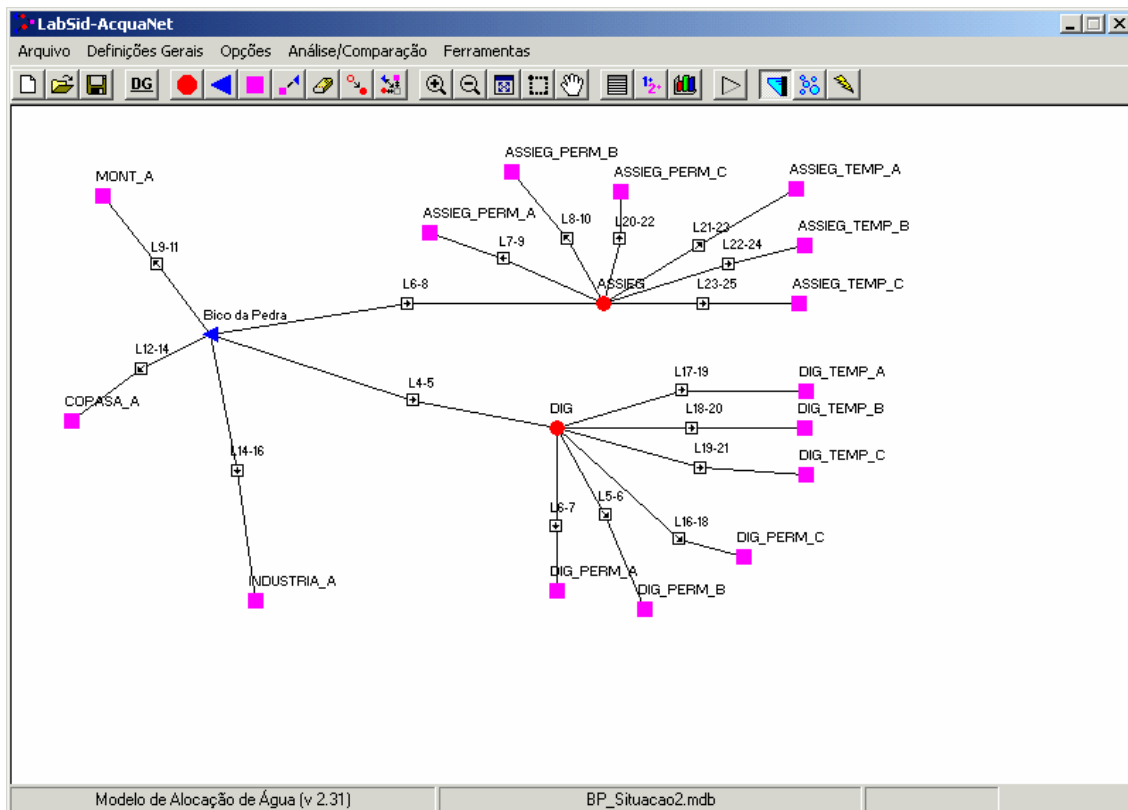
A modelagem matemática de rede de fluxo tem como principal vantagem a flexibilidade em representar os sistemas complexos a partir de softwares computacionais de modo sistêmico e mais didático (Kou et al., 2018). Essa ferramenta atua como um sistema de suporte à decisão a partir de técnicas específicas entre operador e sistema (Zhang, 2017).

No procedimento de gestão de reservatórios, a modelagem de rede de fluxo permite simular a alocação da água disponível segundo os diversos usos, de modo que as condições sociais, econômicas e legislativas sejam verificadas (Kishiwa et al., 2018; Amin et al., 2018). Os modelos de rede de fluxo podem auxiliar na operação de reservatório, tendo como base de cálculo o balanço hídrico entre as afluências, efluências e variações no armazenamento. Assim, é possível realizar avaliações e simulações quantitativas de impacto (positivo ou negativo) em relação a métodos de gerenciamento (Osoro et al., 2018).

Para simular a alocação de água e analisar o atendimento às demandas, um dos softwares disponíveis é o software de rede de fluxo AcquaNet, que é uma modificação do MODSIM, modelo desenvolvido na Colorado State University (Porto, 2003). No modelo original foi inserida uma interface gráfica para facilitar sua aplicação, chamada de ModSimP32, desenvolvida pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões da Escola Politécnica da USP.

A escolha do AcquaNet para o presente estudo se deu pela facilidade de operacionalização e possibilidade de planejamento agrícola, aspectos esses que o diferem de outros modelos de simulação e otimização como IRIS, IRAS, AQUATOOL, RIVERWARE e dos modelos de rede de fluxo MIKE BASIN e MODSIM DDS (Vieira e Curi, 2016). A interface usuário-sistema do modelo de rede de fluxo AcquaNet é apresentada na Figura 4.

**Figura 4** – Interface usuário-sistema do modelo de rede de fluxo AcquaNet



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Métodos de apoio à decisão multicritério

A análise multicritério, como apontam Bhole e Deshmukh (2018), surgiu da busca pela solução de problemas de diversas áreas através de uma estruturação formal por métodos sistemáticos. Desse modo, tendo-se a necessidade da resolução de um problema que apresente conflito entre mais de uma variável e que receba influência das preferências do decisor sobre a definição final, surgiram métodos de apoio à decisão com base em múltiplos critérios (Stojic et al., 2019; Kaya et al., 2018; Sadabadi et al., 2021).

A origem dos modelos de análise multicritério, como relata Félix (2020), não possui datação científica estabelecida, porém, pode ter origem nos estudos sobre economia de Vilfredo Pareto, no fim do Século XIX, que teria desenvolvido uma subdivisão de critérios econômicos para considerar as preferências do agente decisor.

A partir da década de 1970, a análise multicritério desenvolveu-se nos aspectos de precisão e concisão, proporcionando maior abrangência de utilização, e sendo encontrada aplicabilidade prática na engenharia por possuir diversos problemas complexos. Para sua



aplicação, Félix (2020) indica que a análise multicritério requer a definição de um problema caracterizado, de modo geral, como um problema de decisão e que engloba os conceitos de:

- Critérios avaliados: que são os fatores levados em consideração que permitam a mensuração e comparação entre as alternativas; os critérios avaliados são os fatores que são levados em consideração durante o processo de tomada de decisão, com o objetivo de permitir a mensuração e comparação entre as alternativas disponíveis. Esses critérios desempenham um papel fundamental na análise e na seleção da melhor opção. Ao definir os critérios avaliados, é importante identificar os aspectos relevantes e significativos relacionados ao problema ou à decisão em questão. Esses critérios podem variar dependendo do contexto e da natureza da situação (Hendriks et al., 1992).
- Ponderação dos critérios: A determinação do peso pode ser dividida em duas categorias: peso subjetivo e peso objetivo. O peso subjetivo é principalmente estabelecido por meio da opinião de especialistas, baseada em experiências e julgamentos pessoais, como é o caso dos métodos AHP e Delphi. Já o peso objetivo é obtido diretamente a partir dos dados reais das alternativas, como ocorre no método de peso de entropia. A principal vantagem do método de peso de entropia é reduzir o impacto subjetivo dos tomadores de decisão, aumentando assim a objetividade do processo (Félix, 2020).
- Alternativas avaliadas: As alternativas avaliadas são as diferentes opções que são consideradas durante a análise. Essas alternativas podem incluir medidas de intervenção, projetos, cenários ou qualquer outra proposta que esteja sendo avaliada em relação ao problema ou à decisão em questão. Durante o processo de avaliação, as alternativas são submetidas a uma análise detalhada, levando em consideração os critérios estabelecidos. Cada alternativa é avaliada em relação a como ela atende a cada um dos critérios, permitindo uma comparação objetiva entre elas (Hendriks et al., 1992).

Nessa conjuntura, os modelos de apoio à decisão multicritério são uma forma de relacionar esses conceitos de tal modo que seja possível apontar uma ou mais soluções para o problema (em classificação hierárquica), através de uma análise matemática, que atendam as preferências dos decisores (Antucheviciene et al., 2015; Chowdhury e Paul, 2020).

Na gestão de recursos naturais há inúmeras aplicações de modelos de apoio à decisão, como nos estudos de Villacreses et al. (2017), Zavadskas et al. (2017), Bhole e Deshmukh (2018) e Li e Guo (2020). No contexto do gerenciamento de recursos hídricos, como exemplo

de aplicação, Campos, Cazarini e Campos (2020) propuseram um modelo multicritério de apoio à decisão, com base no PROMETHEE II, que proporcionou uma análise detalhada sobre as potencialidades de alternativas de projetos de esgotamento sanitário no âmbito de um comitê de bacia.

Tedesco et al. (2019), a partir da aplicação dos modelos de análise multicritério AHP e TOPSIS, desenvolveram a ordenação dos poços que estão mais vulneráveis na bacia hidrográfica Iguazu, região sudoeste do Paraná, e que necessitam de medidas de proteção e controle de degradação.

No Irã, Golfam, Ashofteh e Loáiciga (2019), a partir dos modelos de análise multicritério VIKOR e FUZZY, propuseram um modelo para auxiliar um grupo de tomadores de decisão a estabelecer um portfólio de ações viáveis (alternativas) que são capazes de equilibrar estratégias de oferta e demanda de água.

Nesse contexto, percebe-se a aplicabilidade e diversidade de modelos multicritérios disponíveis, que se diferenciam por considerarem os dados a partir de informações distintas. Também, nota-se a funcionalidade dos modelos de análise multicritério em problemáticas com implicações sobre características ambientais, econômicas e sociais de sistemas hídricos complexos. Para o presente estudo e proposição metodológica, são utilizados e comparados os modelos multicritérios Weighted Sum Model (WSM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) e Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR).

### **3.3.1 Modelo WSM**

O Weighted Sum Model desenvolvido por Fishburn (1967), ou modelo de soma ponderada, também é chamado de método aditivo simples ponderado. O WSM é um dos métodos de análise multicritério mais simples e mais amplamente utilizado. Na operacionalização do WSM, a alternativa ideal é o mais próximo do “melhor” valor no comparativo ponderado entre os dados dos critérios (Miljković et al., 2017; Rehman e Khan, 2017).

O WSM é formulado para problemas em que todas as variáveis da situação problema têm as mesmas dimensões físicas, sendo baseado no pressuposto da “utilidade aditiva”. Para problemas multidimensionais (por exemplo, com atributos qualitativos e quantitativos), o problema torna-se difícil de manusear, pois a hipótese pressuposta é violada e, portanto, os esquemas de normalização devem ser empregados (Patel e Rana, 2018). Além disso, no modelo

WSM os efeitos de compensação entre os diferentes critérios podem ser observados, gerando incertezas nos resultados (Popović et al., 2020)

O WSM, como disposto em Lee e Chang (2018), combina todas as funções multiobjetivo em uma função objetiva escalar composta com a soma ponderada:

$$F(x) = w_1f_1(x) + w_2f_2(x) + \dots + w_nf_n(x). \quad (1)$$

Para a análise por WSM, a atribuição dos coeficientes de ponderação  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  é de fundamental importância, sendo dado de entrada do modelo. As ponderações podem receber valores objetivos, com base, por exemplo, no conceito de entropia da teoria da informação (entropia de Shannon), ou subjetivos, com base na percepção dos decisores. Os pesos devem ser positivos e devem satisfazer a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^N w = 1, ; w_i \in (0, 1). \quad (2)$$

Os modelos WSM são frequentemente usados para problemas unidimensionais, como por exemplo, para apenas uma rede com quantidade limitada de dados. No entanto, eles podem apresentar resultados semelhantes quando comparados com mais métodos sofisticados (Piegat e Salabun, 2015), embora que, como sugerem Bhowmik et al. (2019) e Popović et al. (2020), seja necessário analisar sua aplicabilidade em sistemas decisórios complexos.

### 3.3.2 Modelo AHP

O modelo de análise multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP), desenvolvido por Saaty (1991), é outro modelo de decisão multicritério que pode ser aplicado nas mais diversas áreas da ciência e da engenharia, e é capaz de envolver critérios tanto quantitativos como qualitativos.

O modelo AHP surgiu no final da década de 1960 do Século XX, e foi desenvolvido pelo matemático Thomas Lorie Saaty (1991) quando trabalhava para a Agência de Controle de Armas e Desarmamento do Departamento de Estado Americano (Forman e Selly, 2002).

Sangiorgio, Uva e Fatiguso (2018) afirmam que este método é estruturado de forma competente, permitindo encontrar soluções precisas e robustas, e que a ferramenta proporciona um maior conhecimento das atividades e das possibilidades do sistema avaliado.

No campo das aplicações, como referem Emrouznejad e Marra (2017), o AHP tem sido aplicado para apoio à tomada de decisão em diferentes contextos, dentre eles, em tecnologias,

sistemas flexíveis de produção, economia, administração, planejamento, projetos e alocação de recursos (Leśniak et al., 2018; Geng et al., 2018; Park et al., 2018; Piprani, Jaafar e Ali, 2020).

De acordo com Geng (2018), o AHP é construído sobre oito princípios específicos: construção de hierarquias; definição de prioridades (objetivo e critérios relevantes); comparação entre pares de critérios; matriz de normalização; cálculo de consistência; comparação entre pares de alternativas; análise de sensibilidade; e tomada de decisão (escolha da melhor alternativa).

Neste trabalho, assim como na aplicação de Lee e Chang (2018), os pesos dos critérios serão pré-determinados pelo método objetivo de entropia de Shannon e não pela comparação entre pares de critérios do AHP. Apenas as etapas finais do AHP serão exigidas para a presente proposta.

Segundo Lee e Chang (2018), a etapa final do AHP trata da construção de uma matriz  $M \times N$  (onde  $M$  é o número de alternativas e  $N$  é o número de critérios), que é feita usando as importâncias relativas das alternativas em termos de cada critério. Embora esta fase final do AHP seja semelhante a WSM, uma diferença central com o método AHP é que os valores da matriz de decisão são normalizados para somar 1. Isso permite valores com unidades de medida a serem transformados em adimensionais (Lee e Chang, 2018). A melhor alternativa (quando todos os critérios são maximizados) é indicada pela seguinte fórmula aditiva:

$$A_{AHP}^* = \max \sum_{j=1}^N a_{ij} w_j \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots, M. \quad (3)$$

Sendo:  $A_{AHP}^*$  é a pontuação da alternativa ótima;  $a_{ij}$ , na matriz  $M \times N$ , representa o valor real da  $i$  – ésima alternativa em termos do  $j$  – ésimo critério;  $w_j$  é a importância do  $j$  – ésimo critério; e  $N$  é o número de critérios de decisão.

### 3.3.3 Modelo TOPSIS

O modelo de análise multicritério Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) foi desenvolvido por Hwang e Yoon em 1981 (Rahim et al., 2018). O modelo é baseado no conceito de que a alternativa escolhida deve estar o mais perto possível da alternativa “positiva ideal” e o mais longe possível da alternativa “negativa ideal” (Konstantinos, Georgios e Garyfalos, 2019).

No TOPSIS, a partir de critérios e preferências, são calculadas as distâncias relativas, geralmente Euclidianas, das alternativas analisadas para a alternativa fictícia ideal. Logo, a alternativa mais próxima da alternativa ideal e mais afastada da alternativa ideal negativa é

escolhida como a melhor (Saqlain, 2019). As alternativas são ordenadas em ordem decrescente, segundo suas distâncias relativas, e é escolhida a de valor mais alto, o que significa que essa alternativa se encontra o mais perto do ideal positivo (Nabeeh et al., 2019).

Quanto às aplicações, o modelo TOPSIS tem sido comumente utilizado para resolver problemas de análise multicritério em diversas áreas de conhecimento (Kumar e Garg, 2018; Yu et al., 2019; Kilic e Yalcin, 2020). Na gestão de recursos hídricos, vários estudos têm adotado TOPSIS para análise de alternativas de redução de demanda de água (ONU et al., 2017; Ghazali, Honar e Nikoo, 2018) e como abordagem híbrida, combinada à entropia de Shannon, para análise multicritério de vulnerabilidade dos recursos hídricos com pesos objetivos (Li et al., 2017).

Segundo Lee e Chang (2018), o TOPSIS pode ser aplicado tanto para critérios benéficiais quanto não benéficiais. O modelo é feito, em um 1º passo, com a normalização dos valores dos critérios, usando normalização vetorial. O valor normalizado  $r_{ij}$  é calculado como:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}} \quad (4)$$

Sendo:  $x_{ij}$  o valor do atributo  $j$  para a alternativa  $i$ ;  $r_{ij}$  o valor da nova matriz normalizada de tomada de decisão.

O 2º passo é calcular a matriz de decisão normalizada ponderada  $V$ . Um conjunto de pesos a partir da atribuição dos coeficientes de ponderação  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , com  $\sum w_1 = 1$ , é utilizada em combinação com a matriz normalizada do passo anterior, para determinar a matriz normalizada  $V$ , definida como:

$$r_{ij} = w_{ij} r_{ij} \quad (5)$$

O 3º passo é determinar a melhor/ideal alternativa ( $A^*$ ) e a pior/negativa ( $A^-$ ) por:

$$A^* = \left\{ \left( \max v_{ij} \mid j \in J \right) \text{ ou } \left( \min v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\}, i = 1, 2, \dots, m = \{v_1^*, v_2^* \dots, v_n^*\} \quad (6)$$

$$A^- = \left\{ \left( \min v_{ij} \mid j \in J \right) \text{ ou } \left( \max v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\}, i = 1, 2, \dots, m = \{v_1^*, v_2^* \dots, v_n^*\} \quad (7)$$

Sendo  $J$  e  $J'$  conjuntos de critérios benéficiais e não-benéficiais, respectivamente.

O 4º passo é calcular as distâncias de cada alternativa da solução positiva ideal e da posição negativa ideal:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \text{ para } i = 1, 2 \dots m \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \text{ para } i = 1, 2 \dots m \quad (9)$$

O 5º passo, e último, é calcular o coeficiente de proximidade e classificar a ordem de alternativas, por:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, 0 < C_i^* < 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Sendo  $C_i^* \in (0,1)$  com  $i = 1, 2, \dots, m$ . A melhor alternativa pode, portanto, ser encontrada de acordo com a ordem numérica de  $C_i^*$ . O maior valor é o melhor. De modo que se  $C_i^*$  está perto de 1, indica que a alternativa  $A_{ij}$  está perto da solução ideal positiva.

### 3.3.4 Modelo VIKOR

Dentre os modelos de análise multicritério existentes, outra opção é o método Visekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje (VIKOR), traduzido por “Otimização multicritério e Solução de Compromisso” (Opricovic, 1998). O algoritmo do modelo determina um ranking de compromisso, uma solução de compromisso, e intervalos de estabilidade de peso para a estabilidade preferencial da solução de compromisso, obtido por meio dos pesos iniciais em problemas multicritério (Opricovic, 2007).

Segundo Opricovic (1998), o método VIKOR foi desenvolvido para otimização multicritério de sistemas complexos. O método centra-se na classificação de alternativas através de um conjunto de opções na presença de critérios conflitantes. Ele introduz o índice de classificação multicritério com base na medida particular de “proximidade” para a solução “ideal” (Opricovic, 1998).

Para Opricovic e Tzeng (2004), o VIKOR demonstrou-se uma ferramenta útil na tomada de decisão multicritério, particularmente, em uma situação em que o tomador de decisão não é capaz ou não sabe expressar sua preferência no início do projeto do sistema.

De modo geral, o VIKOR tem sido utilizado para avaliar projetos de engenharia de recursos naturais considerando aspectos técnicos, sociais, ambientais e circunstâncias econômicas (Lee E Chang, 2018; Ali et al., 2019; Bhowmik, Dhar e Ray, 2019). De modo

semelhante, como nas aplicações de Golfam et al. (2019) e Salimi et al. (2020), o VIKOR tem se demonstrado aplicável para avaliação de consumo de água ao longo dos últimos anos.

O algoritmo do VIKOR, a partir de um conjunto de critérios contraditórios presentes, objetiva a construção de um ranking de alternativas, a solução de compromisso e os intervalos de estabilidade como consequência dos pesos iniciais dos critérios (Ture, Dogan e Kocak, 2019).

O resultado de saída, disposto pelo método VIKOR, é um ranking de alternativas através de quatro etapas:

Etapa 1: Determinar os maiores valores  $f_i^*$  e os menores valores  $f_i^-$  de toda a função,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \quad (11)$$

$$f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (12)$$

Sendo:  $f_i^*$  : valor máximo apresentado pelo indicador  $i$  pelo conjunto de alternativas;  $f_i^-$ : valor mínimo apresentado pelo indicador  $i$  pelo conjunto de alternativas; e  $f_{ij}$ : o valor do indicador  $i$  atribuído à alternativa  $j$ .

Etapa 2: Calcular os valores  $S_j$  (é o grupo de utilidade máxima) e  $R_j$  (é o peso individual mínimo),  $j = 1, 2, \dots, n$ , nas relações, em que  $w_i$  são os pesos dos critérios.

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (13)$$

$$R_j = \max_j \left[ \frac{w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right] \quad (14)$$

Sendo:  $S_j$ : grupo de utilidade máxima da alternativa  $j$ ;  $w_i$ : peso estratégico;  $f_i^*$ : valor máximo apresentado pelo indicador  $i$  atribuído pelo conjunto de alternativas;  $f_{ij}$ : o valor do indicador  $i$  atribuído á alternativa  $j$ ;  $f_i^-$ : valor mínimo apresentado pelo indicador  $i$  pelo conjunto de alternativas; e  $R_j$ : peso individual mínimo da alternativa  $j$ .

Etapa 3: Calcular os valores,  $Q_j$   $j = 1, 2, \dots, j$ , pela relação em que  $S^* = \min_j S_j$ , é introduzido  $S^- = \max_j S_j$  e  $R^* = \min_j R_j$ ,  $R^- = \max_j R_j$ .

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1 - v)(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (15)$$

Sendo:  $v$ : comumente aplicado em valor 0,5;  $Q_j$ : score final da alternativa  $j$ ;  $S_j$ : grupo de utilidade máxima da alternativa  $j$ ;  $S^*$ : grupo mínimo de utilidade máxima do conjunto de alternativas;  $S^-$ : grupo máximo de utilidade máxima do conjunto de alternativas;  $R_j$ : peso individual mínimo;  $R^*$ : menor peso individual mínimo;  $R^-$ : maior peso individual mínimo.

Etapa 4: Ordenar, de modo decrescente, as alternativas pelos valores obtidos por  $Q$ . Deste modo, o método apresenta como dado de saída a classificação das alternativas como ferramenta de apoio à decisão.

### 3.4 Métodos de ponderação associados a modelos multicritério

Os métodos de ponderação são técnicas utilizadas para determinar o peso ou importância relativa dos critérios considerados em um processo de avaliação ou tomada de decisão (Eckenrode, 1965). Eles são frequentemente utilizados em modelos multicritério para permitir a comparação de diferentes alternativas, levando em consideração múltiplos critérios (Ayan et al., 2023).

Existem diversos métodos de ponderação que podem ser utilizados em modelos multicritério, incluindo métodos subjetivos e objetivos. Os métodos subjetivos dependem da opinião ou julgamento de especialistas ou tomadores de decisão para determinar os pesos dos critérios. Já os métodos objetivos utilizam critérios matemáticos ou estatísticos para atribuir pesos aos critérios (Ustinovichius, 2007).

Entre os métodos subjetivos de ponderação mais comuns, é possível citar o método Delphi, a análise hierárquica (AHP) e a análise por pares (comparação pareada). O método Delphi envolve a coleta de opiniões de especialistas por meio de questionários sucessivos, buscando o consenso em relação aos pesos dos critérios (Crisp, 1997). A AHP é uma técnica que envolve a decomposição dos critérios em subcritérios, permitindo a comparação entre eles em uma escala de preferência (Saaty e Vargas, 2012). A análise por pares é uma técnica na qual os critérios são comparados dois a dois pelos especialistas, permitindo a determinação de suas importâncias relativas.

Entre os métodos objetivos de ponderação, em destaque têm-se a entropia de Shannon, o Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC), a análise de correlação, a análise de regressão e a análise de componentes principais. Esses métodos utilizam técnicas matemáticas e estatísticas para determinar os pesos dos critérios com base em dados históricos



ou em outras informações disponíveis (Gunantara, 2018). Gan et al. (2017) referem que a escolha do método de ponderação mais adequado depende do contexto específico do problema em questão, bem como das preferências e disponibilidade de informações dos tomadores de decisão. É importante ressaltar que a escolha adequada dos pesos dos critérios é fundamental para a efetividade dos modelos multicritério e para a tomada de decisão informada e robusta (Kalton e Cervantes, 2003).

No contexto da hibridização da abordagem deste estudo, os pesos dos critérios das abordagens multicritério de base SIG têm sido acessados a partir de métodos subjetivos de definição, como o método AHP, nas aplicações de Solangi et al. (2019) e Kumar et al. (2020), e a métodos objetivos de definição, como nos estudos de Rani et al. (2017), Yacin e Unlu (2018), Sharma et al. (2019), e Yang et al. (2021), sendo os métodos de Entropia de Shannon e CRITIC os mais comuns. Os procedimentos para determinar os pesos dos critérios são assunto de pesquisa e debate científico por anos, tendo sido diversas abordagens desenvolvidas e discutidas. Para o presente estudo, os métodos de Entropia de Shannon, CRITIC e AHP simplificado foram utilizados e analisados.

### **3.4.1 Entropia de Shannon**

O físico francês Carnot, em 1824, presumiu a Segunda Lei da Termodinâmica em seus estudos sobre energia. Consequentemente, a partir da física termodinâmica e associado a conceitos energéticos, se originou o conceito de entropia (Gyftopoulos, 1997). A entropia, segundo Cápek e Sheehan (2005), é “uma medida macroscópica quantitativa da desordem microscópica”. Em 1877, o austríaco Ludwig Boltzmann desenvolveu um conceito estatístico para a entropia, estabelecendo uma relação direta entre a entropia e a desordem molecular de um processo térmico aleatório (Nikulov e Sheehan, 2004).

A partir da análise matemática, a entropia, que primordialmente era exclusiva para os estudos energéticos, foi utilizada por Shannon na teoria da informação (Lin, 1991). No estudo de informações, no que foi denominada “entropia de Shannon”, a entropia define as incertezas dos dados numéricos levando em conta todos os tipos de informações. O conceito de entropia da informação se associa à ideia de que quanto maior a incerteza de um resultado de um experimento aleatório, maior é a informação que se obtém ao observar a sua ocorrência. A entropia quantifica a incerteza ou a quantidade de informação associada a um conjunto de dados. Quanto maior a entropia, maior é a incerteza ou a imprevisibilidade dos dados (Lin, 1991). Essa medida de entropia é calculada a partir da distribuição de probabilidade dos eventos

em um sistema. Quando todos os eventos têm probabilidades iguais, a entropia é máxima, indicando uma maior incerteza. Quando um evento é muito mais provável que os outros, a entropia é menor, sugerindo uma menor incerteza (Bromiley et al., 2014).

A entropia de Shannon tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento, como na medicina (Conforte et al., 2019), química (Mehrpooya, Sayyari e Molaei, 2019), física (Bazan., 2016), entre outros. No contexto do gerenciamento de recursos naturais, a entropia de Shannon também tem sido aproveitada, como nas aplicações de Romero e Delgado (2017), Busu e Busu (2018), Yang et al. (2018) e Yazdani (2020), e muitas vezes associada a modelos multicritério (Haddadha et al. (2017), Lee e Chang (2018), Bhowmik et al. (2019)), como método de ponderação objetiva de um processo típico.

Mais especificamente, como abordagem híbrida, a entropia de Shannon foi associada ao modelo de análise multicritério FUZZY por Zhao et al. (2017) para preparar um mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra na Província do Khuzistão do Irã. Foi combinada ao modelo AHP e SIG para seleção de aterro de resíduos de construção em Shenzhen, na China. E, entre outros, por Vanolya e Jelokhani (2020) para avaliação de risco de inundação em um estudo de caso em Mazandaran, no Irã.

No aspecto de operacionalização, tem-se que, a partir de um problema definido com critérios e alternativas, a ponderação objetiva é alcançada resolvendo modelos matemáticos, e desse modo, com a desordem das informações, produz-se um resultado objetivo para a análise multicritério (Birgani e Yazdandoost, 2018).

O cálculo dos pesos da entropia de Shannon, segundo Lin (1991), é apresentado a seguir:

Supondo que alternativas  $m$  ( $A_1, A_2, \dots, A_m$ ) e  $n$  critérios ( $C_1, C_2, \dots, C_m$ ) para um problema de decisão, então a matriz de decisão inicial é:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} = [a_{ij}]_{m \times n}$$

Sendo que seus elementos  $a_{ij}$  denotam a alternativa do  $j$  – ésimio critério.

1ª etapa: normalizar a matriz de decisão

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

2ª etapa: Calcular a entropia

$$e_j = -K \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Sendo:  $K = 1/\ln m$

3ª etapa: Os pesos de cada critério são calculados

$$w_{ij} = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n (1 - e_j)}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

### 3.4.2 Método CRITIC

O método CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) é um método de ponderação de critérios utilizado em análise multicritério que leva em consideração as correlações entre os critérios para determinar sua importância relativa. O método foi desenvolvido por Diakoulaki et al. (1995) e é baseado na matriz de correlação intercritérios, que fornece informações sobre a relação entre cada par de critérios. A partir dessa matriz, é possível calcular os valores de peso dos critérios, levando em consideração as inter-relações entre eles.

O processo de ponderação começa com a construção da matriz de correlação intercritérios, que é calculada a partir das avaliações subjetivas dos especialistas em relação ao grau de correlação entre cada par de critérios. Essas avaliações podem ser feitas por meio de escalas numéricas, questionários ou entrevistas. Com base na matriz de correlação intercritérios, é calculado o vetor de pesos dos critérios, que indica a importância relativa de cada um deles. Esse cálculo é feito por meio de um sistema de equações, que leva em conta as correlações entre os critérios e a importância de cada um deles em relação ao objetivo geral da decisão (Diakoulaki et al., 1995).

Uma das vantagens do método CRITIC é que ele leva em consideração as relações entre os critérios, o que pode resultar em uma ponderação mais precisa e realista. No entanto, ele exige um grande esforço dos especialistas na avaliação das correlações entre os critérios e pode ser mais complexo do que outros métodos de ponderação (Zizovic et al., 2020).

O método CRITIC pertence à classe de métodos de correlação aplicáveis a modelos multicritérios e tem o objetivo de determinar as informações contidas nos critérios pelos quais as variantes são avaliadas. Para cada critério  $x_{ij}$ , a função de pertinência  $r_{ij}$ , que traduz todos os valores dos critérios  $f_j$  no intervalo  $[0, 1]$ , é definida.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (19)$$

A transformação é baseada no conceito de um ponto ideal. Desta forma, a matriz inicial é convertida em uma matriz com elementos genéricos  $r_{ij}$ .

Cada vetor tem um desvio padrão, que representa o grau de desvio dos valores variantes para um dado critério de um valor médio. A quantidade da informação  $C_j$  contida no critério  $j$  é determinada da seguinte maneira:

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (20)$$

Os pesos objetivos dos critérios são obtidos normalizando-se os valores  $C_j$ :

$$w_{ij} = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (21)$$

### 3.4.3 AHP simplificada

No método de ponderação por uma AHP simplificada, proposto por Dortaj et al. (2020), após a definição dos múltiplos critérios, 10 especialistas são convidados a opinar sobre o peso de cada critério por meio de um questionário baseado na escala de Saaty (1 a 9). Neste método, o número 1 é atribuído ao critério menos importante, e 9 ao critério mais importante, de modo que os valores intermediários (2 a 8) representam avaliações proporcionais.

A média geométrica de cada linha de importâncias, relacionada aos especialistas, é usada como o peso final dos critérios, e a matriz de comparação por pares é construída. Diferentes métodos de cálculo de peso relativo, como mínimos quadrados, mínimos quadrados logarítmicos, vetor próprio e métodos de aproximação podem ser implementados. De modo que, neste trabalho, o método de aproximação que aplica a média geométrica foi utilizado para a ponderação dos critérios, pois ajudar a reduzir o viés introduzido por valores extremos.

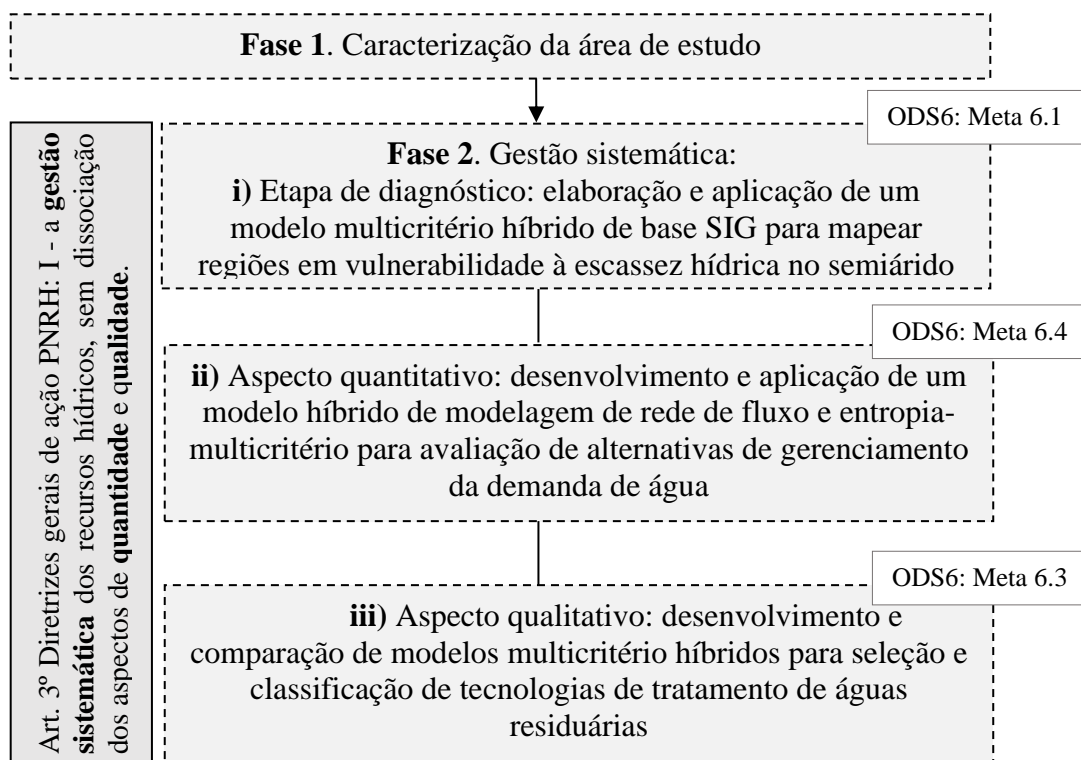
#### 4. METODOLOGIA

Antes de iniciar a proposta de abordagem metodológica, apresentamos abaixo algumas premissas e condições de contorno que foram consideradas para o desenvolvimento da tese.

- Sabe-se que a gestão ineficiente da água pode ter diferentes impactos para a sociedade e meio ambiente, porém, o objetivo foi desenvolver uma proposta metodológica a partir de uma gestão que favoreça a população do contorno espacial do semiárido do Nordeste. Nesse sentido, os conceitos de segurança e vulnerabilidade hídrica (sob a perspectiva de gestão sistemática) absorvem os principais interesses de disponibilidade hídrica característicos da população dessas regiões;
- Sabe-se também que as causas e consequências da escassez hídrica do semiárido são diversas e possuem características hidroclimáticas fundamentais, como irregularidade espacial e temporal da precipitação, política de açudagem, distância dos mananciais, ausência de sistemas de abastecimento, entre outros. Entretanto, o interesse foi analisar uma intercorrelação entre o período de estiagem e as condições ambientais, sociais e econômicas da área de estudo, e não apenas associada a características hidroclimáticas;
- A análise espacial do presente estudo tem o Reservatório Epitácio Pessoa, na região semiárida do Nordeste do Brasil, como elemento objetivo de análise metodológica. Entretanto, com o interesse em avaliar a gestão do reservatório e seus aspectos relacionados à bacia hidrográfica que o abrange, outros dois recortes são considerados: Região do Médio São Francisco (Região doadora de águas de transposição), e a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba – BHPB (Bacia hidrográfica onde se encontra o reservatório).
- O recorte temporal de 2012-2018 foi considerado para análise, haja visto que o intervalo concorre com o período recente de seca plurianual na BHPB. Nesse sentido, as análises partem do pressuposto da necessidade de gestão efetiva aplicada para períodos de prevenção e remediação à seca. O interesse foi verificar as demarcações espaciais onde a vulnerabilidade à escassez é mais intensa, e quais alternativas (relacionadas à gestão quantitativa e qualitativa) podem contribuir para o gerenciamento da água.

Após apresentadas as condições de contorno, o desenvolvimento metodológico que envolve a abordagem sistemática proposta pela tese pode ser resumido em duas fases, sendo a segunda dividida em três etapas. A estruturação é ilustrada na Figura 5.

**Figura 5** – Esquema do processo de estruturação metodológica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo tem o reservatório Epitácio Pessoa, situado na bacia hidrográfica do rio Paraíba, como unidade final de análise metodológica. Entretanto, inicialmente foram estudadas a Bacia hidrográfica do Rio São Francisco (BHRF), com especificidade para a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – SFM, e a BHRP, com o interesse de investigar o reservatório de modo sistemático e integrado, a partir das condições de vulnerabilidade de uma região hídrica doadora e uma receptora de águas.

A BHRSF, doadora de águas, a partir do PISF, objetiva garantir segurança hídrica a 12 milhões de pessoas distribuídas em 390 municípios do Brasil nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, através da transposição das águas do seu principal rio para as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional. O projeto é a maior obra hidráulica do Brasil em extensão, ocorrendo a transposição das águas através dos Eixos Norte e Leste, através dos canais artificiais que captam a água em sub-bacias localizadas em Pernambuco (Brasil, 2021).

A BHRSF abrange 8% do território nacional, com uma área de 639.219 km<sup>2</sup>, e engloba 505 municípios que se distribuem nos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, além do Distrito Federal. A BHRSF divide-se em quatro regiões fisiográficas que são, da nascente à foz do rio principal, respectivamente: o Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco (MI, 2019).

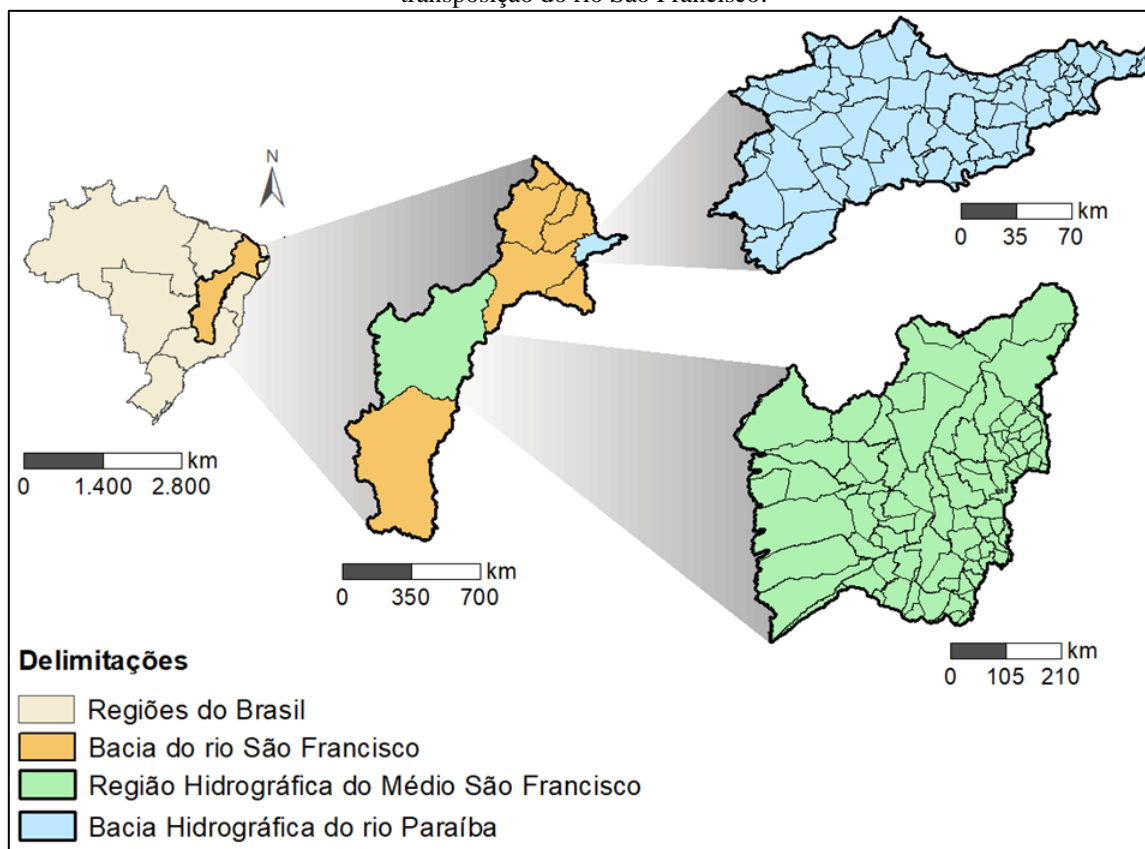
A região do Médio São Francisco foi escolhida como área de estudo devido à sua extensão significativa, abrangendo 39% da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF), sendo a segunda maior região hidrográfica do rio São Francisco, ficando atrás apenas da região do alto, que ocupa 40% da área total (MI, 2020). Além disso, quase 60% do uso do solo na área é ocupado por estabelecimentos agropecuários, que representam a atividade predominante na região. A disponibilidade hídrica subterrânea na região corresponde a 76% do total da BHRSF. Além disso, os recursos hídricos na área são utilizados para uma variedade de fins, incluindo atividades industriais, irrigação, geração de energia, mineração, abastecimento humano, entre outros, demonstrando a importância de análise de vulnerabilidade da região (MI, 2020).

A Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, como estudo de caso para bacia receptora de águas de transposição, abrange uma área de 20.071,83 km<sup>2</sup>, o que a coloca como segunda maior do Estado em extensão territorial. Dois reservatórios se destacam no abastecimento de água na BHPB que são: o reservatório Epitácio Pessoa, mais conhecido como Boqueirão, localizado no município de mesmo nome, e tem uma capacidade de armazenamento de 466,52 hm<sup>3</sup>; e a barragem Argemiro de Figueiredo, conhecida como Acauã, que conta com um volume total de 253 hm<sup>3</sup> (IBGE, 2018; AESA, 2019).

A BHPB possui uma grande diversidade de características de clima, grande extensão geográfica e alta irregularidade temporal e espacial da precipitação, sendo dividida em quatro sub-regiões: Alto, Médio e Baixo curso do rio Paraíba e a sub-bacia do rio Taperoá. Na Figura 6 é apresentado o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba.

A Figura 6 apresenta a delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – doadora de águas de transposição, e a BHPB – receptora das águas da transposição do rio São Francisco.

**Figura 6** – Delimitações geográficas abordadas da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – doadora de águas de transposição, e a BHPB – receptora das águas da transposição do rio São Francisco.

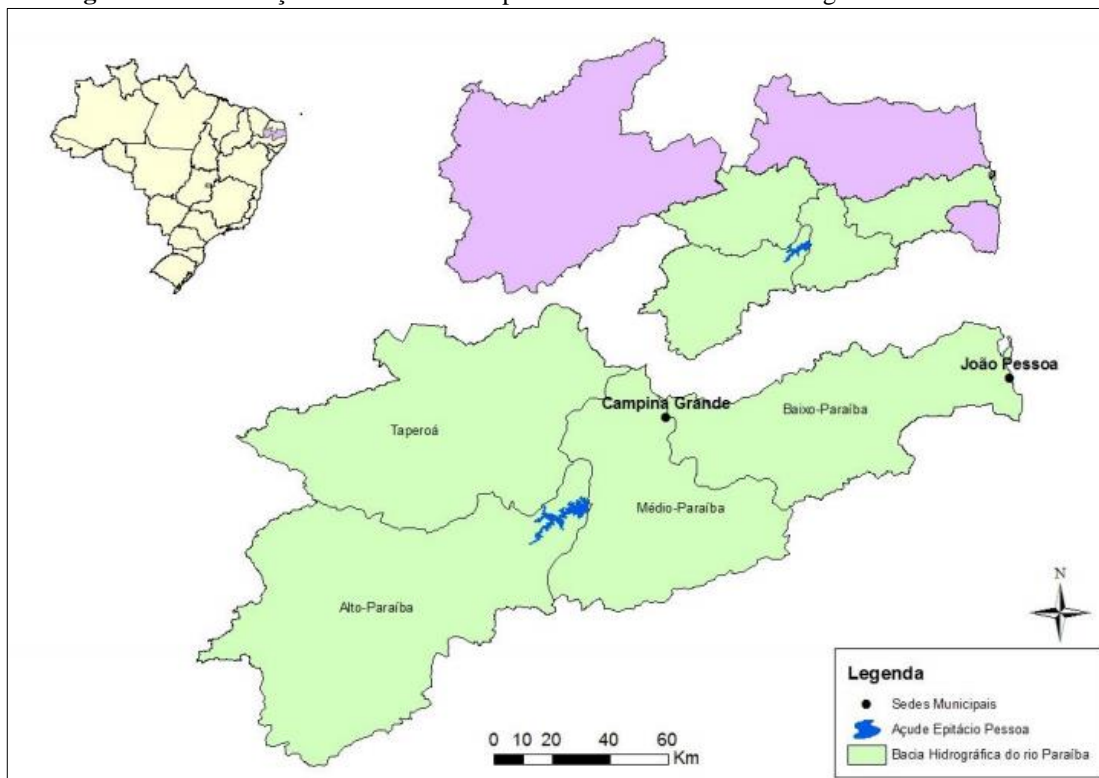


Fonte: Elaborada a partir de ANA (2019) e IBGE (2019).

Posteriormente à identificação das áreas de vulnerabilidade à escassez hídrica das regiões hídricas de contribuição ao reservatório, uma abordagem híbrida de modelagem de rede de fluxo e entropia-multicritério é proposta para o reservatório Eptácio Pessoa, como um caso de estudo de avaliação de alternativas de gerenciamento da demanda de água. O reservatório está situado no Alto Curso do rio, região hidrográfica caracterizada como uma das de menores médias pluviométricas do Brasil com precipitações totais anuais de 600mm. Na Figura 7 é apresentado o mapa de localização do reservatório Eptácio Pessoa (AESA, 2019).



**Figura 7** – Localização do reservatório Epitácio Pessoa na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba.



Fonte: AESA (2019).

O reservatório Epitácio Pessoa, também conhecido como Boqueirão, é um grande reservatório de água localizado na Paraíba. Ele foi construído com o objetivo de suprir as necessidades de abastecimento de água da região do Cariri paraibano e também de algumas cidades do estado de Pernambuco (AESA, 2019). O reservatório possui uma capacidade de armazenamento de cerca de 411 milhões de metros cúbicos de água e uma área inundada de aproximadamente 1.342 km<sup>2</sup>. Ele é formado pela barragem de Boqueirão, que tem cerca de 3,5 km de extensão e uma altura máxima de 55 metros (AESA, 2019).

O reservatório é caracterizado pelo desafio de enfrentamento à escassez em um contexto de abastecimento de cerca de 700 mil habitantes, abastecendo polos industriais, educacionais e econômicos. A área de estudo é historicamente caracterizada por crises hídricas, como no intervalo mais recente de 2012-2018, no qual ocorreram 4 fases de racionamento, que incluíram desde a suspensão de fornecimento de água para irrigação, até a interrupção de abastecimento por até 112 horas para alguns bairros de Campina Grande (DNOCS, 2019).

A água armazenada no reservatório é utilizada principalmente para o abastecimento humano e para atividades agropecuárias na região, que é predominantemente semiárida. O uso da água para irrigação é regulado por órgãos governamentais responsáveis pela gestão dos recursos hídricos na região (AESA, 2019). O reservatório é uma importante fonte de água para a região, porém, assim como muitos outros reservatórios brasileiros, ele tem sido afetado pela

escassez hídrica e pela má gestão dos recursos naturais. Por isso, é importante a implementação de medidas para a preservação da qualidade e quantidade da água do reservatório, como o monitoramento da qualidade da água, o uso racional dos recursos e a adoção de práticas sustentáveis na região (Araújo et al., 2022).

## **4.2 Proposta metodológica de gestão sistemática**

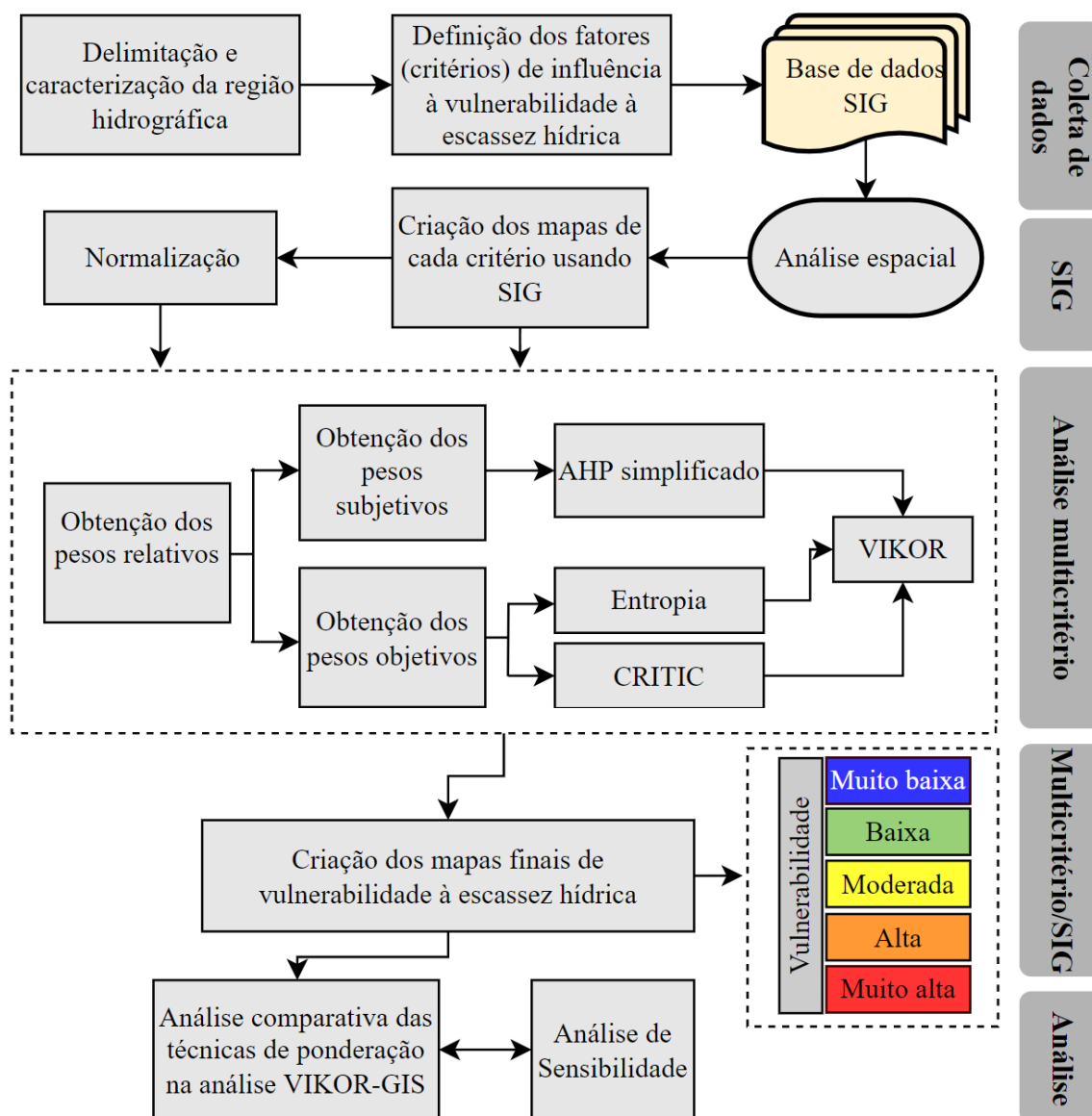
### **4.2.1 Identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica<sup>11</sup>**

As etapas metodológicas da identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica envolvem um procedimento em quatro etapas: na etapa 1, as regiões hídricas em estudo são definidas e caracterizadas por limites municipais. Na etapa 2, procede-se à definição, padronização e espacialização dos critérios que influenciam a vulnerabilidade à escassez hídrica. Na terceira etapa, a importância relativa dos critérios (pesos subjetivos e objetivos que determinam a contribuição subsequente de cada critério relacionado com a escassez de água), e a abordagem combinada SIG-VIKOR são conduzidas para gerar os mapas de vulnerabilidade. Finalmente, na quarta etapa, os resultados são comparados através da análise de sensibilidade para analisar o impacto da incerteza relacionada com os critérios. A Figura 8 apresenta a estruturação metodológica proposta.

---

<sup>11</sup> Este tópico faz parte do artigo científico “*Spatial multicriteria approach to water scarcity vulnerability and analysis of criteria weighting techniques: a case study in São Francisco River, Brazil*” publicado no periódico internacional *Geojournal*.

**Figura 8** – Representação esquemática proposta para a análise e mapeamento da vulnerabilidade à escassez hídrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo o proposto por Brito et al. (2021), são diversos os aspectos que influenciam uma análise de vulnerabilidade à escassez hídrica, de modo que a escolha dos indicadores deve considerar o impulso de risco de escassez hídrica comumente gerado por impactos ambientais, sociais, econômicos, culturais e físicos associados à governança. Na presente abordagem, indicadores nacionais e locais foram escolhidos e analisados para facilitar o diagnóstico das condições de vulnerabilidade à escassez hídrica nas especificidades do semiárido brasileiro.

Objetivando-se ainda seguir uma abordagem de escolha correlata ao cumprimento dos ODS presentes no Guia de Indicadores para a Gestão Pública no Brasil (GPS, 2016), a seleção fundamentou-se em seis fundamentos baseados na metodologia de escolha de indicadores

proposta por Almeida (2019): (1) fácil aplicação; (2) facilidade de cálculo; (3) relevância para o nível local; (4) existência de dados disponíveis; (5) contribuição para o cumprimento das metas dos ODS; e (6) contemporaneidade dos dados.

Os critérios escolhidos têm como referência os anos de 2015 a 2017, e esse recorte temporal foi selecionado por corresponder a um período em que a região Nordeste do Brasil estava passando por uma seca pluriannual que perdurou de 2012 a 2018 (Dantas et al., 2020). O quadro 3 demonstra quais são esses critérios, se o critério é benéfico ou não benéfico (Z), o ano de referência do dado, a descrição, e a respectiva fonte de obtenção.

**Quadro 3** – Critérios selecionados relacionados à vulnerabilidade à escassez hídrica.

	<b>Crítérios</b>	<b>Z*</b>	<b>Ano de Referência</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fonte</b>
<b>C1</b>	Índice de Segurança Hídrica (ISH)	+	2015	O ISH considera quatro dimensões do conceito de segurança hídrica (humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência)	ANA (2020)
<b>C2</b>	Situação de Emergência (SE)	-	2015	Reconhecimentos de Situação de Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (ECP) por Seca e Estiagem realizados entre 01/01/2013 e 31/12/2019	S2iD (2020)
<b>C3</b>	Abastecimento por Cisterna (%)	+	2017	Percentual de estabelecimentos agropecuários com cisterna, em relação ao total de estabelecimentos no município.	Censo Agropecuário - IBGE (2017)
<b>C4</b>	Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM)	+	2016	Acompanha anualmente o desenvolvimento econômico dos municípios brasileiros, considerando aspectos de emprego e renda, saúde e educação.	Firjan (2018)
<b>C5</b>	Famílias beneficiárias do Programa Bolsa Família	+	set/17	Número de famílias beneficiárias do Programa Bolsa Família (PBF)	Ministério da Cidadania (2020)
<b>C6</b>	Assistência técnica agropecuária	+	2017	Percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração de assistência técnica em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município.	Censo Agropecuário - IBGE (2017)
<b>C7</b>	Anos de perdas para o PIB serviços	-	2017	Variação do valor adicionado bruto a preços correntes dos serviços, exclusive administração, defesa, educação e saúde públicas e seguridade social (Mil Reais) entre 2017 – 2012	IBGE (2019)
<b>C8</b>	Perdas nos rebanhos bovinos	-	2016 a 2019	Soma da quantidade de anos que houve redução do rebanho bovino municipal em relação ao ano anterior	Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2019)

<b>C9</b>	Uso de água para irrigação (%)	-	2017	% de estabelecimentos agropecuários com declaração de uso de irrigação em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município.	Censo Agropecuário - IBGE (2017)
-----------	--------------------------------	---	------	--	----------------------------------

\*O sinal (+/-) indica que o valor do critério maior/menor é benéfico ou não-benéfico para a gestão hídrica.

Os dados para todos os critérios (C1 a C9) são do tipo vetorial. O critério C1 – Índice de Segurança hídrica foi preparado com cada município compreendendo diferentes unidades territoriais de análise; portanto, para padronizar um único grau de segurança da água para o município, foi considerado o grau mais recorrente no território. A finalidade é indicar se o município tem um grau mínimo, baixo, médio, alto, ou máximo de segurança da água. O C2 - SE foi preparado com dados obtidos através de uma planilha de cálculo que indica todos os decretos anuais dos municípios, e foi adicionado quando o governo reconheceu os decretos de cada município. A finalidade é indicar quantos decretos de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública os municípios deliberaram para a seca multianual em análise.

O C3 - Abastecimento por cisterna foi preparado com dados obtidos através de uma planilha de cálculo que indica a porcentagem de estabelecimentos agrícolas em cada município que possuem uma cisterna em relação ao número total de estabelecimentos no município. A finalidade é indicar a capacidade do município nos seus estabelecimentos rurais para armazenar água em situações de seca. O C4 - IFDM foi preparado com dados obtidos através de uma planilha de cálculo que indica o grau de desenvolvimento socioeconômico de cada município. A finalidade é indicar se o município tem um desenvolvimento socioeconômico elevado, moderado, regular ou baixo, do ponto de vista do emprego/rendimento, educação e saúde, o que pode torná-lo mais ou menos capaz de viver com os efeitos da seca.

C5 - O Programa Bolsa Família foi preparado com os dados obtidos através de uma planilha de cálculo que indica o número de famílias que recebem ajuda financeira do governo federal denominada "Bolsa Família". A porcentagem foi calculada em relação ao número total de famílias existentes em cada município, portanto, o valor final representa a % de famílias em situação de pobreza ou extrema pobreza. A finalidade é indicar quantas famílias em cada município em estudo vivem na pobreza e na extrema pobreza, uma vez que o benefício só é dado às famílias com rendimentos por pessoa até R\$ 89,00 por mês; e às famílias com rendimentos por pessoa entre R\$ 89,01 e R\$ 178,00 por mês, desde que tenham crianças ou adolescentes dos 0 aos 17 anos. Este critério permite verificar a % de famílias economicamente vulneráveis em cada município que tem grandes dificuldades em lidar com os impactos da escassez de água.

O indicador C6 - Assistência técnica agrícola, foi preparado com dados obtidos através de uma planilha de cálculo indicando a porcentagem de estabelecimentos agrícolas com uma declaração de assistência técnica relacionada com o número total de estabelecimentos agrícolas no município. Os dados não foram submetidos a qualquer preparação. A finalidade é indicar a porcentagem de estabelecimentos agrícolas que têm assistência técnica para lidar com a escassez de água nas suas atividades agrícolas, em relação ao número total de estabelecimentos agrícolas do município. O critério permite, assim, identificar se uma grande ou pequena parte dos produtores rurais dispõe de assistência técnica capaz de indicar o que deve ser feito numa situação de escassez de água.

Os C7 - Anos de perdas nos serviços do PIB dispõe de dados obtidos através de uma planilha de cálculo indicando a variação do valor acrescentado bruto a preços correntes dos serviços, excluindo a administração pública, defesa, educação, saúde e segurança social (milhares de reais) entre 2017 e 2012. Os dados não foram objeto de qualquer preparação. A finalidade é indicar se o Produto Interno Bruto dos municípios, referente ao setor dos serviços, registou um aumento ou uma diminuição entre o ano inicial de seca (2012) e o ano de seca mais intensa (2017). Assim, este critério pode demonstrar se, com o advento da seca, o setor dos serviços é ou não vulnerável aos efeitos da escassez de água, uma vez que o comércio é uma atividade de grande contribuição para o PIB dos municípios em análise.

Para C8 - Anos de perdas bovinas, representa o valor das perdas calculado anualmente. No C8, verifica-se se houve perdas, ganhos, ou se o valor da produção permaneceu o mesmo na região. Quando as perdas são verificadas, é atribuído um valor de 1; para a produção mantida ou ganhos, é atribuído um valor de 0. Por outras palavras, o valor 1 indica que o efetivo bovino diminui entre o ano anterior e o ano seguinte, com perdas de 5% ou mais. A finalidade é indicar quantos anos de seca os municípios tiveram perdas de cabeças nos seus rebanhos de gado e assim descrever quão vulneráveis os municípios são ao lidar com os efeitos da seca na sua produção pecuária.

Finalmente, para C9 – Agricultura Irrigada, os dados foram obtidos por meio de planilha que indica o percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração uso de irrigação em relação ao número total de estabelecimentos agrícolas do município. O objetivo é indicar a porcentagem estabelecimentos de recursos agrícolas com sistema de irrigação para lidar com os efeitos da escassez hídrica em suas atividades agropecuárias em relação ao total de estabelecimentos no município. O critério permite identificar se uma grande ou pequena parte dos produtores rurais dispõem de um sistema de irrigação que pode ser usado para fornecer água em uma situação de escassez de água.

A partir dos critérios (indicadores) definidos, o terceiro passo é o mapeamento da vulnerabilidade à escassez hídrica pela abordagem VIKOR de base SIG. A abordagem multicritério de base SIG inicia-se na definição dos pesos dos indicadores pré-definidos, e conclui-se na classificação dos municípios em mapas dos índices de desempenho.

Para a reprodução da presente abordagem, propõem-se (e são avaliadas) três técnicas de ponderação pautadas na aplicabilidade e facilidade de operação: o método subjetivo de ponderação de AHP simplificada e dois métodos objetivos, a Entropia de Shannon e o método CRITIC, de modo que somente uma delas pode ser suficiente. No presente estudo, os três métodos são utilizados e comparados através do coeficiente de correlação de Spearman para verificar-se a influência de escolha das técnicas de ponderação nos resultados de classificações multicritério de base SIG.

Por fim, seguindo o que refere Tscheikner et al. (2017), sugere-se realizar uma análise de sensibilidade como crucial para analisar o impacto dos pesos dos critérios nas classificações do modelo multicritério. Portanto, assim como nas aplicações de Shirvan et al. (2017), Lee e Chang (2018), Kaya et al. (2020), a análise de sensibilidade foi realizada com base na alteração gradual dos percentuais dos indicadores, a fim de analisar a robustez dos resultados do modelo.

#### **4.2.2 Avaliação de alternativas de gerenciamento da demanda de água<sup>12</sup>**

Esta etapa metodológica desenvolve a modelagem de rede de fluxo do hidrossistema Epitácio Pessoa associada a um modelo entropia-multicritério como uma proposta de abordagem híbrida de gerenciamento dos recursos hídricos nos aspectos quantitativos.

Para a modelagem de rede de fluxo, o software AcquaNet é utilizado como modelo de alocação e de balanço hídrico. As informações de entrada requeridas na presente abordagem pelo modelo matemático AcquaNet são: curva cota-área-volume, volume inicial no tempo de simulação, demandas outorgadas, prioridades de atendimento às demandas, vazões de evapotranspiração e vazões afluentes. Os dados de saída, dentre outros, estabelecem a frequência que o hidrossistema operou abaixo da demanda necessária, a demanda média necessária e a vazão média fornecida, a frequência com que houve vertimento e o tempo de operação do reservatório abaixo de volumes pré-definidos.

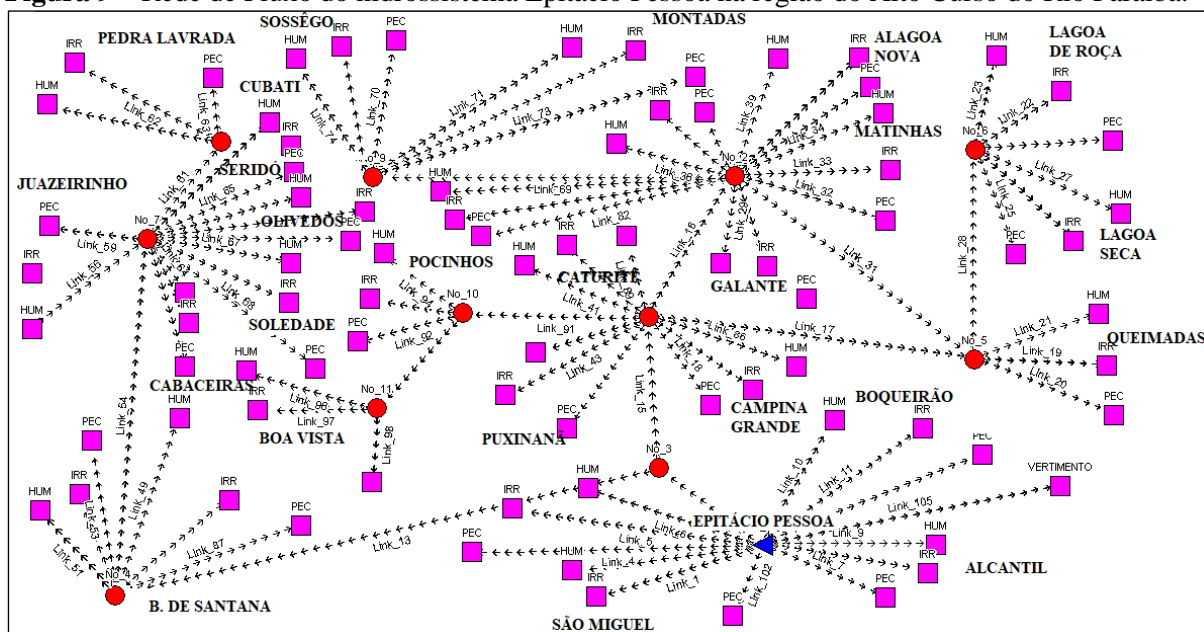
---

<sup>12</sup> Este tópico faz parte de artigo científico publicado no periódico Ambiente e Água e pode ser acessado através do link: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2627>

Neste estudo, assim como no mapeamento de vulnerabilidade à escassez hídrica do tópic anterior, será simulada a alocação de água para o intervalo de seca plurianual da BHPB no período de 2012-2018. Os dados de entrada foram obtidos a partir das análises de Lucena (2018), relatórios do DNOCS para os dados físicos do reservatório, e da coleta de dados climatológicos e de outorgas no sistema HydroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A otimização é executada em intervalo de tempo mensal e de forma sequencial. A Figura 9 apresenta a rede de fluxo do reservatório Epitácio Pessoa responsável pelo abastecimento de 24 municípios.

O modelo representa o hidrossistema por nós, sendo esses: de volume (reservatório), de passagem (confluências, pontos de entrada, vertimento e pontos de demandas) e arcos ou links (canais, condutos de abastecimento e rio natural). Os municípios apresentam demandas distribuídas em abastecimento humano (HUM), irrigação (IRRIG) e pecuária (PEC), não apresentando demandas industriais no relatório de outorgas nacionais para o reservatório.

**Figura 9** – Rede de Fluxo do hidrossistema Epitácio Pessoa na região do Alto Curso do Rio Paraíba.



Fonte: Autoria própria

Seguindo a linha metodológica de Barros et al. (2016), Almeida e Curi (2016) e Sousa (2017), provenientes de literatura técnica, aponta-se que para um efetivo gerenciamento da água em regiões de escassez, é necessário identificar e aplicar alternativas de gerenciamento pautadas em uma abordagem de racionalidade, modernização e sustentabilidade do uso da água.

Desse modo, com o objetivo de avaliar possíveis alternativas, são simulados modelos com dados de entrada modificados referentes a possíveis reduções de demanda e variações nos quantitativos/regimes de vazões afluentes ao reservatório, com a finalidade de simular



computacionalmente o impacto no reservatório e no atendimento às demandas.

Neste estudo são utilizadas alternativas tecnológicas (A1 a A5) pautadas na literatura (Sousa, 2017) e alternativas sistêmicas associadas, de modo que umas alternativas são exclusivas e outras combinadas. O Quadro 4 apresenta as alternativas de gerenciamento da demanda de água consideradas.

**Quadro 4** – Alternativas de gerenciamento da demanda de água consideradas na abordagem.

		Descrição da alternativa
<b>A0</b>	Cenário de referência	O cenário de referência não admite medida de gerenciamento, assim considerando o consumo de água nas residências por aparelhos hidráulicos sem dispositivos poupadores, sem projetos sustentáveis de reuso e simulado a partir da vazão de entrada pela precipitação.
<b>A1</b>	Equipamentos economizadores	Substituição de equipamentos comuns por equipamentos economizadores, sendo estes: chuveiro com restritor de vazão, bacia sanitária com acionamento duplo, torneira de pia com arejador e torneira de lavabo com arejador.
<b>A2</b>	Captação de água da chuva	Adoção, para as residências, de um sistema de captação de água de chuva composto por calha, tubulação, dispositivo de desvio das primeiras águas, reservatório inferior, bombeamento, reservatório superior e distribuição.
<b>A3</b>	Reuso residencial	Utilização de um sistema de reuso de águas cinzas com tratamento para recirculação das águas servidas do chuveiro e da máquina de lavar para a bacia sanitária.
<b>A4</b>	Equipamentos + captação	Esta alternativa combina as medidas (A1) e (A2).
<b>A5</b>	Equipamentos + reuso	Esta alternativa combina as medidas (A1) e (A3).
<b>A6</b>	Transposição todos os meses	Aporte hídrico de 1,52 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (ANA, 2019) ao reservatório, em todos os meses, advindo do Eixo Leste do Programa de Transposição do Rio São Francisco. Ressalta-se que o contexto frequente de escassez na Bacia do Rio São Francisco teria de ser considerado para a transferência de água para outras bacias do semiárido (Rêgo et al., 2017).
<b>A7</b>	Transposição no período de menor afluência	Considerados a quadra chuvosa de fevereiro a maio (Andrade, 2019), o valor médio mínimo de precipitação de 20mm nos meses de janeiro, junho e julho, a escassez hídrica na Bacia do Rio São Francisco e os custos elevados de operação do sistema, a alternativa considera o aporte hídrico de 1,52 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> nos meses de agosto a dezembro, como os de menor afluência ao reservatório.
<b>A8</b>	Equipamentos + reuso residencial + transposição na menor afluência	Esta alternativa combina as medidas que adotam o uso de equipamentos economizadores(A1), um sistema de reuso residencial (A3) e a alternativa que utiliza o aporte hídrico da transposição do rio São Francisco nos meses de menor afluência (A7).
<b>A9</b>	Equipamentos + reuso ETA	Esta alternativa combina a medida de utilização de equipamentos economizadores (A1) com a utilização de 20% do efluente tratado (água de lavagem de filtro + lodo) das ETAs do reservatório Epitácio Pessoa para irrigação.
<b>A10</b>	Equipamentos + redução de perdas	Esta alternativa combina a medida que utiliza equipamentos economizadores (A1) à uma redução de 20% nas perdas no sistema de distribuição pela companhia de água e esgoto.
<b>A11</b>	Equipamentos + eficiência na Irrigação	De acordo com a CEMIG, o manejo incorreto da água na irrigação ocasiona um desperdício de 20% de água e 25% de energia elétrica. Esta alternativa combina os equipamentos economizadores (A1) à medidas de manejo eficientes que aumentem de 75% para 90% a eficiência no uso da água.
<b>A12</b>	Transposição na menor afluência + eficiência na irrigação + equipamentos +	Esta alternativa combina as principais alternativas de gerenciamento da demanda de água do estudo. São combinadas as alternativas de utilização de equipamentos economizadores (A1), reuso de águas cinzas (A3) aporte hídrico da vazão de transposição para os meses de menor afluência (A7), redução de perdas no sistema de abastecimento (A10) e o aumento da eficiência na irrigação (A11).

Após a simulação da rede de fluxo para uma perspectiva ausente de medidas (A0) e para as alternativas de gerenciamento, é utilizada a entropia de Shannon para aferir objetivamente as importâncias dos critérios presentes na construção da análise de desempenho, e o modelo multicritério AHP, como ferramenta de suporte à decisão para classificar (em um ranking) as alternativas analisadas.

Os resultados de desempenho da rede de fluxo por diferentes alternativas são usados como a base do modelo híbrido, compondo a matriz numérica do modelo entropia-AHP. Os critérios, que foram utilizados para a análise multicritério das alternativas, são: atendimento à demanda de abastecimento humano ( $X_1$ ), atendimento à demanda de irrigação ( $X_2$ ), percentual do volume do reservatório acima do volume meta ( $X_3$ ), que é um percentual de volume que deve ser mantido no reservatório de um mês para outro, e percentual de redução do consumo da alternativa ( $X_4$ ).

#### **4.2.3 Seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias domésticas**

No âmbito das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs), os estudos de Arroyo e Molinos-Senante (2018) e Zhang et al. (2020) dispõem que a avaliação da sustentabilidade de várias alternativas de Tratamento de Águas Residuais sempre depende das circunstâncias que envolvem o problema, e, portanto, o contexto do problema deve ser levado em consideração (Arroyo et al., 2018).

A presente abordagem tem o objetivo de auxiliar a definição da tecnologia e/ou das tecnologias mais apropriadas de tratamento de águas residuárias domésticas para preservação da disponibilidade e qualidade dos corpos hídricos no semiárido. O efluente será admitido como predominantemente doméstico, e, enquanto requisito de qualidade do efluente, definido pelo padrão de lançamento em corpos aquáticos pela Resolução CONAMA 430/2011. Como referem Lizot et al. (2021), a escolha da tecnologia mais sustentável de tratamento de águas residuárias domésticas deve integrar critérios ambientais, sociais e econômicos.

A metodologia da seleção e análise comparativa de métodos Entropia-multicritério para classificação de tecnologias de tratamento de águas residuais dispõe da estruturação: dados de desempenho das principais tecnologias usadas no Brasil; definição de critérios de decisão; entropia de Shannon como definição objetiva das importâncias dos critérios; análise

multicritério pelos modelos entropia-AHP, entropia-WSM, entropia-TOPSIS e entropia-*VIKOR*; e análise de sensibilidade dos modelos híbridos. Foram avaliadas sete tecnologias de tratamento de efluentes (A1 a A7), apresentadas a seguir. A escolha dos wetlands (A1) se deu por ser uma alternativa tecnológica de abordagem moderna com aspectos racionais e sustentáveis, e as alternativas A2 a A7, escolhidas com base em sua ampla utilização no Brasil (Sperling, 2016).

Os Wetlands (A1): Wetlands, ou jardins filtrantes, são sistemas naturais ou projetados que usam plantas aquáticas, solo e processos biogeoquímicos para remover poluentes de águas residuais. Esses sistemas são muito eficazes na remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos. Eles simulam o processo natural de purificação da água que ocorre em pântanos e zonas úmidas. Plantas aquáticas, como juncos e taboas, ajudam na retenção física e na absorção de nutrientes, enquanto os microorganismos no solo e nas raízes das plantas realizam a degradação biológica dos poluentes (Gosselink, 2015).

O Sistema de lagoa anaeróbia + lagoa facultativa (A2): Esta combinação de lagoas é uma das tecnologias de tratamento de águas residuais urbanas mais comuns e amplamente utilizadas. Uma lagoa anaeróbica é responsável pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica nas águas residuais, enquanto uma lagoa facultativa cria condições aeróbicas para posterior remoção de poluentes. Neste sistema, os microorganismos anaeróbios decompõem a matéria orgânica complexa em compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis e gás metano em uma lagoa anaeróbia. Os microorganismos aeróbios na lagoa facultativa oxidam esses compostos, reduzindo ainda mais a carga orgânica nas águas residuais (Sperling, 2016).

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo – UASB (A3): O Reator UASB é um sistema de tratamento de água que utiliza reatores anaeróbios para remoção de matéria orgânica e nutrientes. Este sistema é eficaz na decomposição de matéria orgânica complexa em gases como metano e dióxido de carbono usando processos anaeróbicos. Os reatores UASB são amplamente utilizados para tratamento de águas residuárias industriais e domésticas e efetivamente removem matéria orgânica e produzem biogás (Behling et al., 1997).

Tanque séptico + Filtro anaeróbio (A4): O sistema Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio é uma solução eficaz para o tratamento de águas residuárias em áreas onde não há acesso ao sistema de esgotamento municipal. No primeiro estágio, as águas residuárias são direcionadas para um tanque séptico subterrâneo. Nesse tanque, ocorre a separação das substâncias sólidas mais pesadas, como lodo e gordura, que se acumulam no fundo, enquanto as substâncias mais leves, como óleos e graxas, formam uma camada de espuma na superfície. Durante esse processo, microorganismos presentes no esgoto iniciam a decomposição anaeróbia da matéria

orgânica, transformando-a em gases e em um efluente líquido mais limpo. Em seguida, o efluente líquido passa por um filtro anaeróbio, composto por um leito de material granular. Nesse ambiente, microrganismos continuam a decompor a matéria orgânica remanescente, garantindo uma maior eficiência na remoção de resíduos e na purificação da água (Sperling, 2016).

Lagoa facultativa (A5): A lagoa facultativa é um sistema de tratamento de água que usa processos aeróbios e anaeróbios para remover contaminantes. Nesse sistema, o esgoto é armazenado em um reservatório onde ocorre a sedimentação dos sólidos e a decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A presença de oxigênio dissolvido na lagoa permite a oxidação aeróbia dos poluentes remanescentes. Uma lagoa facultativa é uma técnica simples e barata frequentemente usada em áreas rurais e pequenas comunidades (Gerardi, 2015).

Reator Anaeróbio + Filtro Biológico Percolador de Alta Carga (A6): Essa combinação de tecnologias é usada para tratar águas residuais com alta carga orgânica. O reator anaeróbio é responsável pela degradação anaeróbia de substâncias orgânicas complexas, enquanto o leito de percolação biológica de alta carga é um meio de suporte para o crescimento de microrganismos aeróbios que oxidam e removem poluentes orgânicos. Nesse sistema, as águas residuais são alimentadas em um reator anaeróbio onde ocorre a fermentação anaeróbia e a produção de gases como o metano. A água residual passa então pelo leito do percolador, onde as impurezas adicionais são removidas por oxidação aeróbia (Sperling, 2016).

Lodos Ativados Convencionais (A7): O sistema de Lodos Ativados Convencionais é amplamente utilizado no tratamento de efluentes domésticos e industriais. Nesse sistema, o efluente é misturado ao lodo ativado, que consiste em microrganismos aeróbios que decompõem a matéria orgânica das águas residuárias. O processo envolve a oxidação biológica de poluentes orgânicos, seguida da sedimentação do lodo ativado e sua reciclagem para o reator para manter a atividade microbiana. O lodo ativado tradicional pode ser usado em diferentes configurações, como batelada, fluxo contínuo ou intermitente (Dold e Ekama, 1981).

A seleção da alternativa de tratamento de águas residuárias mais sustentável é um problema multicritério, pois deve integrar restrições econômicas, sociais e ambientais. Seguindo a metodologia de Senante et al. (2014), 13 fatores iniciais (8 ambientais, 3 sociais e 2 econômicos) serão considerados na avaliação da sustentabilidade das alternativas. Os critérios associados à capacidade das tecnologias foram: Produção de lodo (C1); Área requerida (C2); Odor gerado pela tecnologia (C3); Complexidade de operação (C4); Custo de Implantação (C5); Capacidade de remoção de Nutrientes (C6); Ruído gerado (C7); Consumo de energia (C8); Custo de Operação e Manutenção (C9); Capacidade de remoção de coliformes (C10);

Capacidade de remoção de DBO (C11); Confiabilidade (C12) e Capacidade de remoção de Sólidos suspensos (C13).

O Quadro 4 é baseado na análise feita por Sperling e Chernicharo (2005), com adaptações. Mais detalhes da análise de desempenho devem ser buscados na referência citada. A tabela apresenta uma análise comparativa entre os principais sistemas de tratamento de águas residuais (fases líquida e sólida) aplicados ao efluente doméstico. Destaca-se que é apresentado uma análise comparativa qualitativa que abrange os principais aspectos relevantes na avaliação dos sistemas de tratamento de efluentes. Os aspectos de eficiência, economia, processo e problemas ambientais são analisados. É importante ressaltar que qualquer tipo de síntese está sujeito a um grau de incerteza devido à forte influência das condições locais.

A síntese é apresentada para permitir uma rápida comparação entre os processos de tratamento, e as avaliações não devem ser considerados como invariáveis.

A tabela 1 apresenta cenários avaliados por diferentes pesos. A ponderação proposta consiste na priorização de importância dada à dimensão em cada cenário, com as dimensões de menor importância ponderadas de forma igualitária. O Quadro 5 apresenta a avaliação relativa das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas por Sperling (2016).

**Tabela 1** – Pesos dos critérios em diferentes cenários.

Dimensão	Critério*	Cenário 1 Iguais	Cenário 2 Ambiental	Cenário 3 Social	Cenário 4 Econômico	
Ambiental	DBO	0,042	0,063	0,031	0,031	
	SS	0,042	0,063	0,031	0,031	
	N	0,042	0,063	0,031	0,031	
	CF	0,333	0,042	0,5	0,25	0,25
	E	0,333	0,042	0,5	0,25	0,25
	A	0,333	0,042	0,5	0,25	0,25
	L	0,333	0,042	0,5	0,25	0,25
	Conf	0,333	0,042	0,5	0,25	0,25
Social	O	0,111	0,083	0,167	0,083	
	R	0,333	0,111	0,25	0,083	0,25
	CO	0,111	0,083	0,167	0,083	
Econômico	CI	0,333	0,167	0,25	0,125	0,250
	COeM	0,333	0,167	0,25	0,125	0,250

\*DBO: Capacidade de remoção de DBO; SS: Capacidade de remoção de Sólidos suspensos; N: Capacidade de remoção de Nutrientes; CF: Capacidade de remoção de coliformes; E: Consumo de energia requerido; A: Área necessária; L: Produção de lodo; Conf: Confiabilidade; O: Odor gerado pela tecnologia; R: Ruído gerado pela tecnologia; CO: Complexidade de operação; CI: Custo de Implantação; e O&M: Custo de Operação e Manutenção.

Fonte: Autoria própria

**Quadro 5** – Avaliação relativa das tecnologias selecionadas de tratamento (fase líquida) de efluente doméstico.

Alternativas*	W	LA + LF	U	SPT + FA	LF	U+FB	LoA
---------------	---	---------	---	----------	----	------	-----

<b>DBO</b>	++++	+++	+++	+++	+++	++++	++++
<b>SS</b>	++++/++++	+++/+++	+++/+++	++++	+++/+++	++++/++++	++++/++++
	+	+	+		+	+	+
<b>N</b>	++	++	+	+	++	++/+++	++/++++
<b>CF</b>	+++	++/++++	++	++	++/++++	++	++
<b>E</b>	+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	+++	++
<b>A</b>	++++	++	+++++	+++++	+	++++	++++
<b>L</b>	+++++	+++++	++++	++++	+++++	+	+
<b>Conf</b>	++++	++++	+++	+++	++++	+++	++++
<b>O</b>	++	+	++	++	+++	++++	++++
<b>R</b>	+++++	++++	++++	++++	++++	++++	+
<b>CO</b>	+++++	+++++	++++	++++	+++++	++++	+
<b>CI</b>	+++	++++	++++	+++	+++	++	+
<b>O&amp;M</b>	++++	+++++	++++	+++	+++++	+++	++

+++++: mais favorável; +: menos favorável; +++++, +++, ++: notas intermediárias, em ordem decrescente.

\*\*W: Wetlands; LA+LF: Sistema de lagoa anaeróbia + lagoa facultativa; U: Reator UASB; SPT + FA: Tanque séptico + Filtro anaeróbio; LF: Lagoa facultativa; U + FB: Reator UASB + Filtro Biológico Percolador de Alta Carga; LoA: Lodos Ativados Convencionais.

Fonte: adaptado de Sperling (2016)

A partir dos dados relativos ao desempenho das tecnologias, a entropia de Shannon é realizada como definição objetiva das importâncias dos critérios, sendo possível realizar o ordenamento em preferência de escolha das tecnologias de tratamento mais sustentáveis pelos modelos híbridos de entropia-AHP, entropia-WSM, entropia-TOPSIS e entropia-VIKOR. Na última subseção, é feita uma análise de sensibilidade com base na alteração dos pesos dos critérios, para analisar o impacto na classificação das tecnologias de tratamento de águas residuárias domésticas pelos modelos híbridos desenvolvidos. Os modelos VIKOR, AHP, TOPSIS E WSM usam diferentes tipos de normalização, variando entre normalização linear e vetorial. A análise de sensibilidade quantifica o nível de variabilidade entre os modelos em relação aos critérios e a classificação das tecnologias, revelando como a classificação das alternativas muda devido à variação dos pesos dos critérios em cada modelo híbrido de Entropia-Multicritério.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos no intuito de atender aos objetivos da tese. Primeiramente, inicia-se com a exposição e análise dos resultados referentes à identificação das regiões vulneráveis à escassez hídrica. Em seguida, são discutidos os resultados da simulação e classificação de alternativas para o gerenciamento da demanda de água. Posteriormente, são apresentados os resultados da simulação e classificação das alternativas tecnológicas para o tratamento de águas residuárias domésticas. Por fim, realiza-se uma síntese dos resultados obtidos na GSRH, acompanhada da proposição de medidas e recomendações relacionadas aos modelos desenvolvidos.

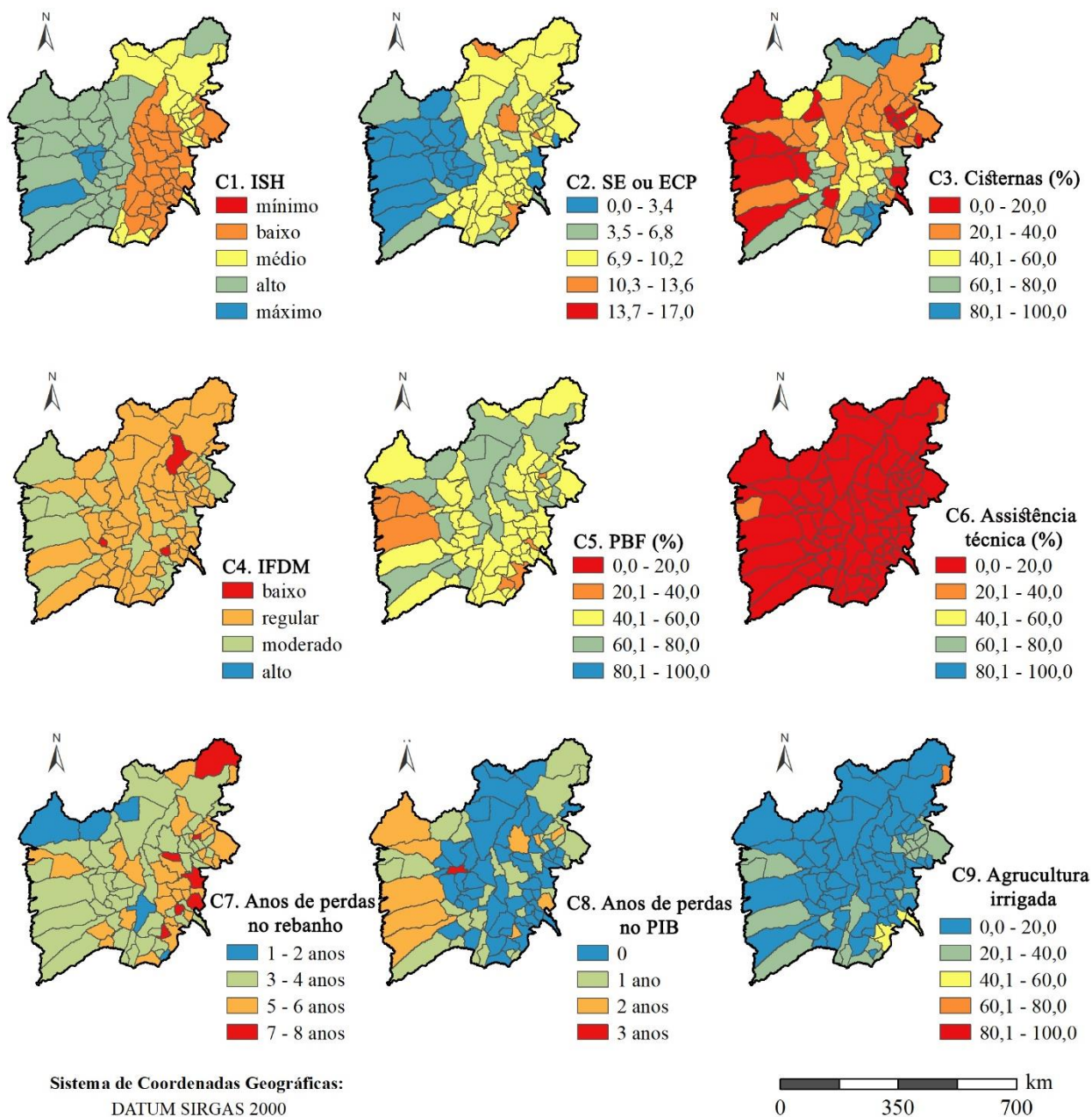
### 5.1 Identificação de regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica<sup>13</sup>

Para o mapeamento da vulnerabilidade à escassez hídrica das áreas de estudo, os critérios de influência foram espacializados em ambiente SIG. O método de classificação para delimitar a legenda baseia-se em intervalos iguais, e os indicadores foram dispostos em bandeiras de acordo com as escalas de cores apresentadas. Os mapas possuem limites negativos em bandeiras de cor vermelha e positivos em bandeiras de cor azul. Nas Figuras 10 e 11, respectivamente, estão os desempenhos dos 9 critérios para a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – região doadora de águas de transposição, e para a Bacia Hidrográfica do rio Paraíba – região receptora de águas.

---

<sup>13</sup> Este tópico faz parte do artigo científico “*Spatial multicriteria approach to water scarcity vulnerability and analysis of criteria weighting techniques: a case study in São Francisco River, Brazil*” publicado no periódico internacional Geojournal.

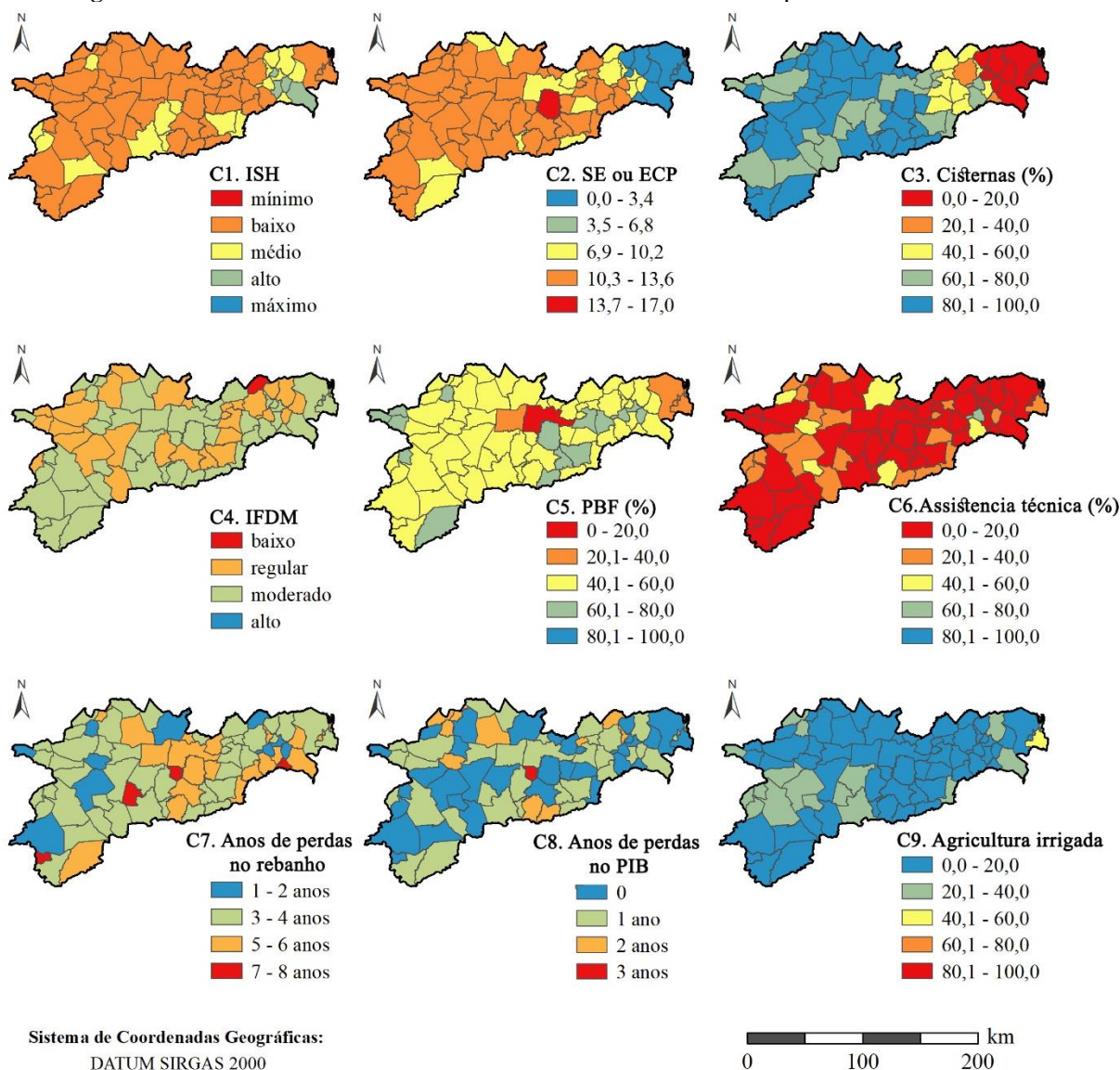
**Figura 10** – Indicadores/Critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica para a região do médio São Francisco.



Fonte: Elaborada a partir de ANA (2020; 2019), S2iD (2020), IBGE (2019; 2017), Firjan (2020).



**Figura 11** – Indicadores/Critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica para a Bacia do rio Paraíba.



Fonte: Elaborada a partir de ANA (2020; 2019), S2iD (2020), IBGE (2019; 2017), Firjan (2020).

A espacialização do ISH (C1) apresentou valores altos e máximos (bandeiras verde e azul) para os municípios do leste do MSF, e desempenhos baixos (bandeira laranja) para os municípios do oeste da mesma região. A BHPB apresentou valores de segurança hídrica predominantemente em bandeira laranja para todos os municípios. De modo que, ainda que o MSF seja uma região doadora de águas de transposição, mais de 30% dos municípios apresentam-se em condição de baixa segurança hídrica tais quais os municípios da bacia receptora.

O desempenho espacializado para o C2, que representa os reconhecimentos de situação de emergência e estado de calamidade pública por seca e estiagem no período de análise, representa a histórica recorrência de eventos de estiagem em ambas regiões. No MSF, mais de 50% dos municípios apresentaram bandeira amarela com reconhecimento de SE e ECP de 6,9

a 10,2 vezes no período, enquanto na BHRP, mais de 70% dos municípios assumiram bandeira laranja, com declaração em 10,3 a 13,6 vezes. Como caso de extrema recorrência na BRHP, o município de Queimadas-PB apresentou bandeira vermelha com 17 anúncios de SE e ECP por seca e estiagem.

O percentual de estabelecimentos agropecuários com cisternas (C3) indica menores valores para o MSF e maiores para a BHPB, representando uma maior capacidade adaptativa à escassez hídrica para a região receptora de águas de transposição. O IFDM (C4) não foi alto para nenhum dos municípios em estudo, representando baixo desempenho nos aspectos de emprego, renda, saúde e educação, o que pode implicar em dificuldades relacionadas ao uso racional, moderno e sustentável da água.

O desempenho relacionado ao percentual de famílias que recebem do programa social PBF (C5) indica que a região doadora do MSF possui maior fração de municípios em bandeira verde que a BHPB, condição que favorece a resiliência frente a eventos de seca de famílias de menor renda. O município de Campina Grande, na BHPB, apresentou bandeira vermelha, o que pode representar defasagem de atendimento ao programa e um risco à capacidade adaptativa de famílias de menor renda.

O C6, correspondente ao percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração de assistência técnica, demonstra uma situação de criticidade para as duas regiões em estudo. Nota-se que, para o MSF, praticamente todos os municípios têm menos de 20% de estabelecimentos agropecuários com suporte técnico que possibilite adaptar-se, dentre outras questões, às secas recorrentes na região.

Os anos de perdas nos rebanhos bovinos (C7) refletem as ocorrências de secas que historicamente dizimaram populações e rebanhos bovinos no semiárido brasileiro. O eixo oeste dos municípios do MSF concentra os municípios com maior ocorrência de perdas. Na ocasião, houve 7 a 8 anos com perdas no rebanho em 7 municípios, enquanto na BHPB ocorreu o mesmo período de baixas em 4 municípios.

Quanto às perdas anuais referentes ao PIB de Serviços (C8), representando o número de anos em que houve redução do PIB em relação ao ano anterior, a região leste da BHPB destacou-se como uma região com possível declínio na fonte de produção de renda advinda dos comércios, o que pode ser também um fator de risco para capacidade adaptativa à eventos de escassez hídrica.

O último indicador (C9), representando os estabelecimentos agropecuários que fazem uso de irrigação, apresentou valores extremos mínimos para ambas as áreas de estudo. Os resultados demonstram que os municípios do MSF e da BHPB têm menos de 40% dos estabelecimentos

agropecuários com culturas irrigáveis, com exceção para a capital do Estado da Paraíba, João Pessoa, e para outros 5 municípios do Leste do MSF.

A etapa mais crucial na análise multicritério é a ponderação dos critérios. Neste estudo, os métodos de AHP simplificado, entropia de Shannon e CRITIC foram usados e comparados para ponderar os atributos da análise multicritério de vulnerabilidade à escassez hídrica.

Para aplicação do método simplificado do AHP proposto por Dortaj et al. (2020), 10 especialistas foram consultados sobre o peso de cada critério por meio de um questionário baseado na escala de Saaty (1 a 9). Nessa abordagem, o número 1 é atribuído ao critério mínimo em importância e 9 ao critério mais importante. Como mostrado no Quadro 6, o método da média geométrica foi usado para calcular a pontuação de diferentes opiniões de especialistas e fornecer um valor único para cada critério. A partir da avaliação dos especialistas, é possível calcular os pesos dos fatores da análise multicritério subjetiva.

**Quadro 6** – Pesos sugeridos para os diferentes critérios de vulnerabilidade à escassez hídrica obtidos por 10 especialistas e média geométrica.

Critérios	Pesos sugeridos por 10 especialistas										Média Geométrica
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8	Nº9	Nº10	
<b>C1</b> ISH	9	9	9	9	7	9	6	9	7	8	8,122
<b>C2</b> SE ou CP	5	8	7	9	7	6	7	9	6	8	7,088
<b>C3</b> Cisternas	7	8	6	8	4	8	9	8	6	7	6,943
<b>C4</b> IFDM	9	7	8	5	5	7	7	5	5	5	6,148
<b>C5</b> PBF	5	5	2	5	4	9	5	5	3	6	4,579
<b>C6</b> AT	9	7	5	4	7	7	7	6	5	8	6,333
<b>C7</b> Perdas rebanho	7	5	3	6	3	7	7	3	4	7	4,888
<b>C8</b> Perdas do PIB	7	6	1	6	6	7	5	7	4	6	4,953
<b>C9</b> Irrigação	7	9	4	8	4	7	9	7	4	8	6,392

Fonte: Autoria própria

Para os métodos objetivos de ponderação de entropia de Shannon e CRITIC, os procedimentos matemáticos (Eq. 1 a Eq. 6) foram aplicados. Os pesos gerais podem estabelecer uma base para o estabelecimento de um modelo adequado para mapeamento de indicadores relacionados à escassez hídrica. Os pesos dos critérios fornecidos pelos três métodos são mostrados na Tabela 2, e os coeficientes de correlação de Spearman, na Tabela 3.

**Tabela 2** – Pesos dos métodos AHP simplificado, entropia de Shannon e CRITIC.

Método	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
<b>AHP simplificado</b>	0,1465	0,1278	0,1252	0,1109	0,0826	0,1142	0,0882	0,0893	0,1153
<b>Entropia</b>	0,1211	0,1161	0,1158	0,1223	0,1217	0,1058	0,0916	0,1209	0,0847
<b>CRITIC</b>	0,1143	0,1301	0,1700	0,0828	0,0919	0,0967	0,1356	0,0967	0,0820

Fonte: Autoria própria

**Tabela 3** – Coeficientes de correlação de Spearman para os métodos de ponderação.

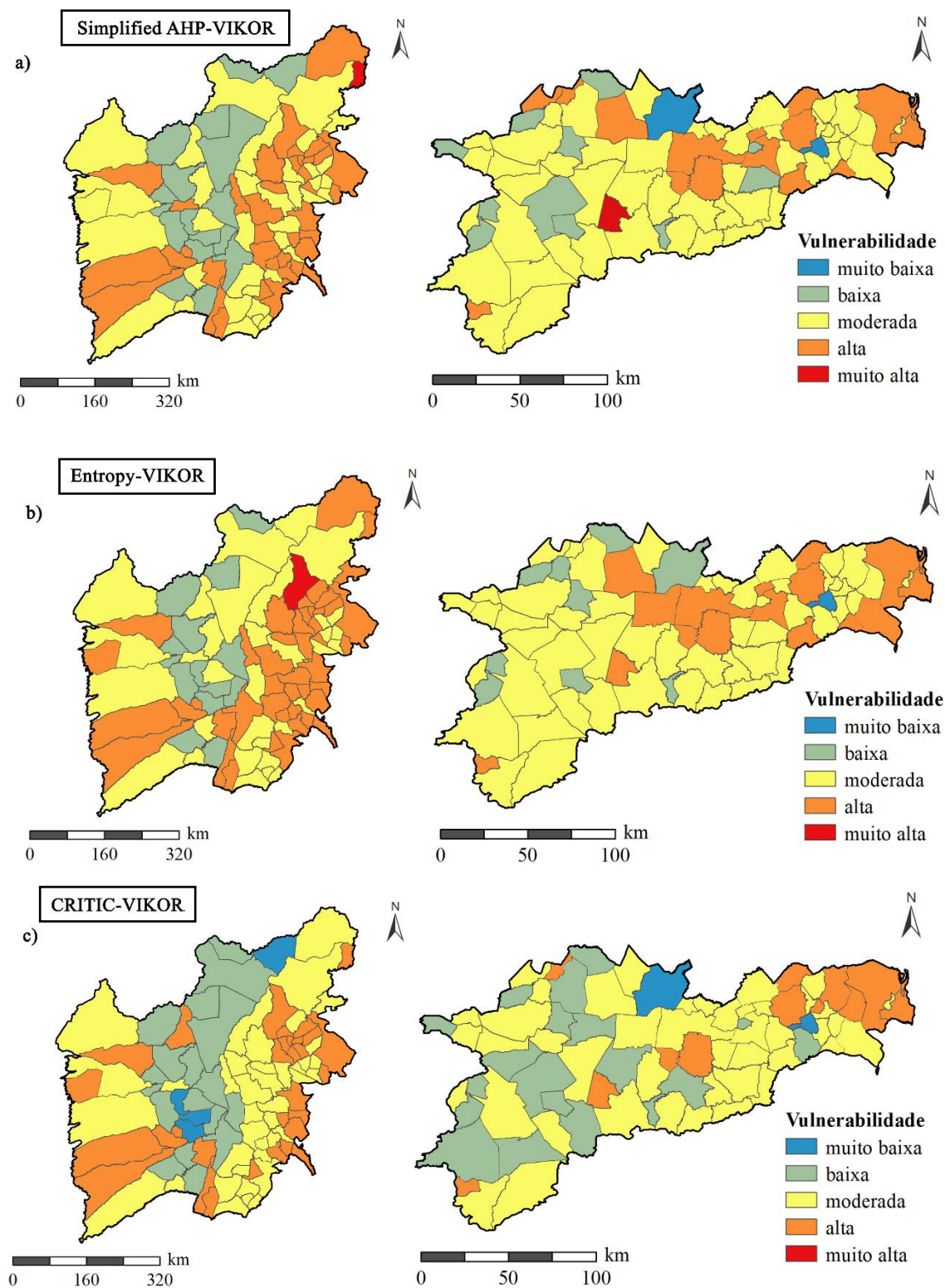
	<b>AHP simplificado</b>	<b>Shannon Entropy</b>	<b>CRITIC</b>
<b>AHP simplificado</b>	1,000	-0,1417	0,2917
<b>Shannon Entropy</b>		1,000	-0,1333
<b>CRITIC</b>			1,000

Fonte: Autoria própria

Conforme visto na Tabela 2, os resultados dos três métodos diferem, ainda que os métodos Entropia e CRITIC fundamentem-se no mesmo princípio de objetividade de cálculo. Os resultados do AHP simplificado indicam que o critério mais importante é o ISH, seguido por Reconhecimentos de SE e ECP por Seca e Estiagem, e abastecimento por cisterna. O IFDM é o critério mais significativo, seguido por número de famílias beneficiárias do PBF e anos com perdas no rebanho, de acordo com os resultados da Entropia. E para o método CRITIC, o atributo mais importante é o abastecimento por cisternas, seguido de anos com perdas no rebanho e Reconhecimentos de SE e ECP por Seca e Estiagem. Os resultados da correlação de Spearman apresentados na Tabela 3 indicam que as correlações entre os métodos de ponderação são fracas.

Usando os pesos para os indicadores (Tabela 2), os valores de vulnerabilidade foram agregados em um índice de desempenho pelo VIKOR, que pode variar de 0 a 1. Os maiores valores de vulnerabilidade referem-se à maior probabilidade de ocorrência de escassez hídrica nos municípios. Baseado na metodologia de espacialização de análises multicritério de base SIG proposta por Galang (2002) e Roodposhti et al. (2016), os mapas de vulnerabilidade à escassez hídrica são apresentados na Figura 12. A classificação é de acordo com cinco classes, de acordo com o método de quebras naturais (Jenks): muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta vulnerabilidade.

**Figura 12** – Mapeamento da escassez hídrica da Região do Médio São Francisco – Região doadora e da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba – região receptora, pela combinação dos métodos: a) AHP simplificado-VIKOR; b) Entropy-VIKOR; c) CRITIC-VIKOR.



Fonte: Autoria própria

Analisando-se o mapeamento de vulnerabilidade à escassez hídrica pela Figura 12, é possível verificar que os resultados de classificação fornecido pelo método VIKOR em ambiente SIG variam diante da escolha do método de ponderação. O motivo dessa divergência se dá pelos métodos de ponderação processarem os cálculos de maneiras distintas, e os procedimentos do algoritmo do VIKOR tentarem dimensionar os objetivos que afetam os pesos já escolhidos (ZANAKIS et al. 1998; SAHIN, 2018).

Nos métodos AHP simplificado-VIKOR (Figura 12a) e Entropia-VIKOR (Figura 12b), há uma predominância de municípios com moderada e alta vulnerabilidade na parte Leste do MSF, enquanto a ocorrência de alta vulnerabilidade acontece ao Norte da BHPB. O AHP simplificado – VIKOR apresentou dois municípios em vulnerabilidade muito alta à escassez hídrica: Sobradinho e São Domingos do Cariri, enquanto o Entropia-VIKOR representou os municípios de Itaguaçu da Bahia e, semelhantemente, São Domingos do Cariri.

Comparando-se o CRITIC-VIKOR (Figura 12c) ao Entropia-VIKOR, 17 municípios regrediram de alta para moderada vulnerabilidade, e 7 municípios agravaram de classificação moderada para alta. A terceira combinação, em seu aspecto geral, apresentou uma atenuação na classificação de vulnerabilidade dos municípios.

Os coeficientes de correlação de Spearman para os resultados das três combinações foram calculados e são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Coeficientes de correlação de Spearman para a classificação VIKOR sob os diferentes métodos de ponderação.

Métodos combinados	AHP simplificado - VIKOR	Entropia de Shannon - VIKOR	CRITIC-VIKOR
AHP simplificado - VIKOR	1,000	0,9333*	0,8220*
Entropia de Shannon - VIKOR		1,000	0,8253*
CRITIC-VIKOR			1,000

\* A correlação é significativa no nível 0,05 (bicaudal)

Fonte: Autoria própria

Em resumo, os resultados mais altos para o coeficiente de correlação representam mais forte correlação entre os modelos. Os coeficientes de correlação entre os pesos dos métodos de ponderação apresentaram fraca correlação (Tabela 3), entretanto, as combinações desses ao VIKOR (Tabela 4) desempenharam superior equiparação. A correlação entre o método combinado AHP simplificado-VIKOR e o Entropia-VIKOR apresentou o maior coeficiente de Spearman, ainda que a confrontação seja de um método de ponderação subjetivo e outro objetivo.

Os resultados de análises multicritério podem ser significativamente afetados pela variação dos pesos dos atributos. As avaliações são geralmente estabelecidas com base na percepção de profissionais, sendo necessário avaliar-se o efeito de um possível desvio dos valores dos pesos devido à variabilidade da análise subjetiva. Nesse sentido, o presente estudo baseou-se na metodologia de análise de sensibilidade aplicada por Mullinner (2016) e Lee (2018) para demonstrar como as mudanças dos pesos dos critérios influenciam a classificação.

Primeiramente, as mudanças de classificações dos municípios foram avaliadas através de um coeficiente de sensibilidade  $SC^*$ . O coeficiente representa a fração de municípios que mudaram a classificação pelo ajuste do critério para o aumento ou diminuição de 5% ou 50%. Os critérios são avaliados individualmente, de modo que quando o peso de um critério aumenta ou diminui, os demais critérios são ajustados proporcionalmente. A Tabela 5 apresenta a faixa percentual de mudanças das classificações dos municípios ( $SC^*$ ), o fator de ajuste em cada peso dos critérios, e o número de critérios que determinaram as mudanças nas classificações.

**Tabela 5** – Mudanças de classificações no ajuste dos critérios.

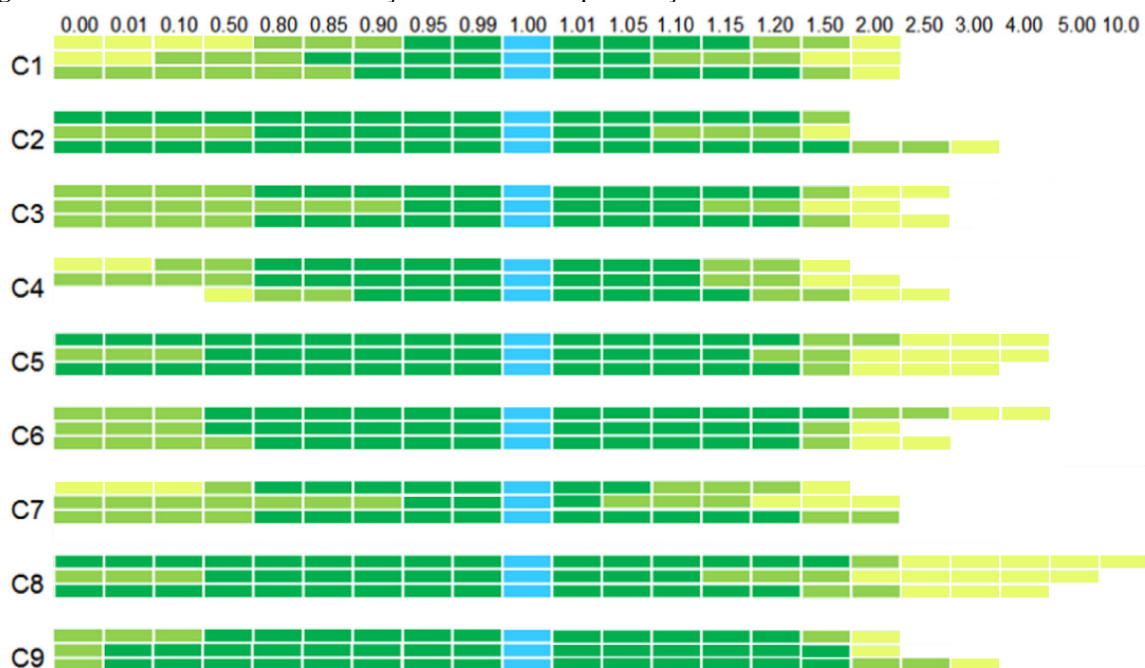
Métodos combinados	Intervalo de alterações de classificação																	
	<0,3			[0,3;0,7]			>0,7			<0,3			[0,3;0,7]			>0,7		
	Mudança no peso do critério																	
	-5%			5%			-50%			50%								
Números de critérios que mudaram classificações																		
AHP simplificado - VIKOR	9	0	0	9	0	0	5	4	0	4	4	0						
Entropia-VIKOR	9	0	0	8	1	0	6	3	0	1	7	0						
CRITIC-VIKOR	9	0	0	9	0	0	6	2	1	4	5	0						

Fonte: Autoria própria

Posteriormente, a análise foi feita para um ajuste gradativo dos pesos dos critérios, apresentada na Figura 13. Cada critério foi analisado utilizando as combinações AHP simplificado-VIKOR, Entropia-VIKOR, e CRITIC-VIKOR, nessa ordem. O gráfico representa os resultados da análise de sensibilidade, demonstrando como a alteração do peso do critério afeta a classificação de vulnerabilidade. Retângulos verdes escuros indicam mudança tolerável de peso de critério de até 10% dos municípios, para o qual a classificação alternativa é pouco sensível, enquanto retângulos verdes claros representam a gama que contribui para até 30% de mudanças, e amarelos para até 70% de mudanças. Em princípio, o comprimento da barra horizontal indica a sensibilidade dos critérios à mudança, de modo que quanto mais curta for a barra, maior será o nível de sensibilidade. Os resultados para 3 combinações em cada painel de

critério são exibidos na seguinte ordem: AHP simplificado-VIKOR (topo), Entropia-VIKOR, e CRITIC-VIKOR (fundo).

**Figura 13** – Sensibilidade da combinação do método de ponderação-VIKOR.



Fonte: Autoria própria

A análise comparativa da distribuição dos coeficientes de sensibilidade (Tabela 5) revelou que a mudança simulada de 5% no peso do critério (aumento e diminuição) não teve influência significativa para o AHP simplificado-VIKOR e para o CRITIC-VIKOR, porém teve um critério com mudanças dessa ordem no Entropia-VIKOR. As classificações baseadas na mudança simulada de 50% no AHP simplificado-VIKOR e no CRITIC-VIKOR também foram menos afetadas.

A figura 13 mostra que todos os critérios apresentam sensibilidade às variações dos pesos, ou seja, a mudança percentual em todos eles afeta as classificações. Os critérios C2, C5, C8 foram os mais robustos para os três métodos combinados, com menor variação de classificações. Os resultados também revelam que C1, C3, C4 e C7 têm a maior sensibilidade. Nesse sentido, possíveis alterações nos pesos desses critérios representam a maior influência para alterações da classificação.

A análise mostra a importância do mapeamento de vulnerabilidade, uma vez que as fragilidades não estão uniformemente distribuídas, mesmo que nas mesmas unidades administrativas (regiões e bacias hidrográficas). Os resultados mostram que o mapeamento dos fatores de vulnerabilidade à escassez hídrica nas regiões das bacias hidrográficas numa perspectiva holística, e não apenas hidroclimática, ou seja, com aspectos sociais, econômicos e



ambientais integrados, pode ser importante para os decisores nas várias esferas da sociedade e não apenas para as agências responsáveis pela Gestão da Água.

A abordagem permitiu uma compreensão mais profunda da comparação das condições dos municípios na transposição das regiões de água (doador e receptor) e dos fatores que impulsionam a maior parte da gestão da escassez de água. Os critérios de vulnerabilidade e os mapas gerados pelas fronteiras municipais podem ser importantes para todas as esferas de planejamento no Brasil, especialmente para os municípios e ações governamentais com maior aplicabilidade local, particularizando as causas das condições e sustentando a implementação de medidas por zonas prioritárias.

A maior parte dos estudos foram avaliados em termos de vulnerabilidades relacionadas com a escassez de água, centrando-se nos sistemas de distribuição dentro dos limites de um município (Chung et al., 2014; Cordão et al., 2020; Tsegaye et al., 2020) ou na abordagem da bacia nos aspectos climáticos (Chung et al., 2017; Spiliotis e Garrote 2019; Mokarram et al., 2021). Poucos trabalhos analisam a vulnerabilidade à escassez relativamente aos aspectos espaciais socioeconômicos e a sua importância na gestão da água e na tomada de decisões.

Para comparar os resultados deste estudo com os resultados anteriores, são considerados alguns estudos. As classificações de vulnerabilidade à escassez são consistentes com a análise de Marengo et al. (2020), Bezerra et al. (2019) e Silva et al. (2021). Eles identificaram que a última seca plurianual (2012-2018) afetou as regiões do Nordeste e da bacia integrada do rio São Francisco (por exemplo, os MSF e PRB) com impactos significativos. As classificações SIG-VIKOR de vulnerabilidade à escassez de água com classificação "Alta", predominantemente nos municípios do leste do MSF - região doadora, e na região receptora, convergem com as análises dos autores citados e com Brito et al. (2021), que as ações de prevenção da seca no Brasil se concentram na construção de grandes e dispendiosas obras de infraestruturas hídricas, apesar da capacidade adaptativa à seca proveniente do desenvolvimento socioeconômico da população na região semiárida.

A metodologia apresentada pode subsidiar a tomada de decisões das políticas públicas relacionadas com o apoio ao combate das desigualdades no abastecimento de água nas regiões e orientar a gestão das áreas mais susceptíveis à escassez hídrica. Com base no argumento da desigualdade espacial, os resultados deste estudo podem ajudar os gestores a desenvolver ações de planejamento, desenvolvimento territorial, e implementação de ações e medidas destinadas a mitigar os impactos relacionados à escassez.

Ao contrário da maioria dos estudos que desenvolvem uma abordagem espacial multicritérios através de uma única técnica de ponderação (Hasan e Rai 2020; Achu et al. 2020;

Ding et al. 2018; Cordão et al. 2020), as classificações de vulnerabilidade baseadas nos três métodos de ponderação mostraram diferenças entre os mapas finais. Os resultados dos métodos de ponderação na abordagem SIG-MCDM contribuem para a literatura, apresentando uma perspectiva que utiliza diferentes métodos adicionados ao modelo multicritérios VIKOR, incluindo a ponderação objetiva e subjetiva. Como declarado por Chung et al. (2016), que obtiveram uma estimativa de correlação de classificação de 0,80 entre métodos subjetivos e objetivos, e ainda que o presente estudo mostrou uma correlação de 0,93 entre Entropia de Shannon -VIKOR e a abordagem Simplificada AHP-VIKOR, considerando diferentes métodos de ponderação é importante para avaliar de forma fiável a vulnerabilidade dos recursos hídricos, e de forma semelhante para as análises SIG-MCDM em geral.

As análises com pouca ou nenhuma informação são um problema crítico em estudos com dados espaciais. O pequeno número de critérios e a incerteza em torno das ponderações subjetivas podem ser considerados como limitações desse estudo. Outros critérios, tais como a qualidade da água e os domicílios atendidos pelo Sistema de Abastecimento de Água, poderiam ser incluídos e melhorariam a adequação da avaliação. Uma reunião clara com todas as partes relacionadas numa discussão completa, desde a escolha dos critérios até à ponderação, poderia tornar a análise mais consistente e abrangente.

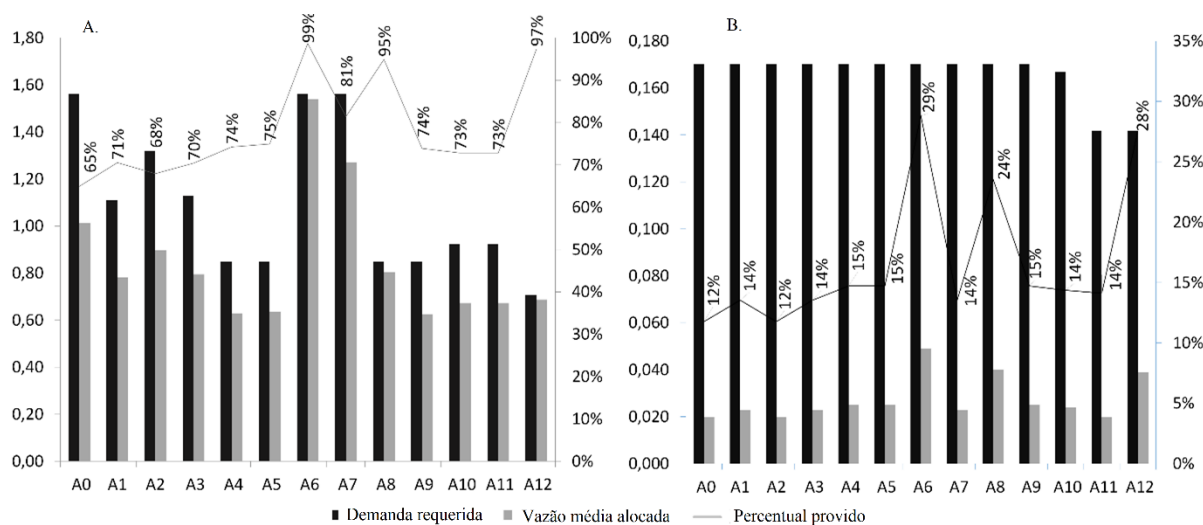
## **5.2 Simulação e classificação de alternativas de gerenciamento de demanda de água<sup>14</sup>**

As simulações do sistema hídrico de Epitácio Pessoa, apresentadas na Figura 14, representam a capacidade do sistema em atender as principais demandas com base nas alternativas de gestão propostas. A Tabela 6 apresenta os percentuais de demanda, os valores absolutos de redução de consumo, abastecimento externo de água, frequência do volume do reservatório operando abaixo do volume meta e as falhas de abastecimento de acordo com as alternativas avaliadas (A0 a A12).

---

<sup>14</sup> Este tópico faz parte de artigo científico publicado no periódico Ambiente e Água e pode ser acessado através do link: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2627>

**Figura 14** – Vazões demandadas por alternativa de gerenciamento, vazões médias alocadas e o percentual de atendimento da demanda necessária. A. Abastecimento humano. B. Irrigação.



Fonte: Autoria própria

**Tabela 6** – Características e resultados do atendimento às demandas por alternativa de gerenciamento da demanda.

Alternativas de gerenciamento da demanda	Percentual de redução da demanda (%)	Redução total de consumo (m³ s⁻¹)	Abastecimento externo por transposição (m³ s⁻¹)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Falhas no abastecimento da demanda	
					Abastecimento humano (%)	Irrigação (%)
A0	-	-	-	88,1	36,3	88,1
A1	20,7	0,45	-	74,3	30,9	86,9
A2	11,2	0,24	-	76,5	33,9	88,1
A3	19,7	0,43	-	74,8	30,9	86,9
A4	31,9	0,71	-	69,8	28,6	85,1
A5	32,6	0,72	-	69,7	28,0	85,1
A6	-	-	1,52	47,8	5,4	72,0
A7	-	-	1,52 <sup>1</sup>	64,6	30,9	80,3
A8	32,6	0,71	1,52 <sup>1</sup>	50,7	7,7	76,8
A9	32,8	0,71	0,0033 <sup>2</sup>	69,8	28,0	85,1
A10	29,2	0,64	-	73,8	29,2	85,7
A11	35,6	0,67	-	72,7	29,2	85,7
A12	42,7	0,88	1,52 <sup>1</sup>	46,8	3,6	73,2

Nota<sup>1</sup>: aporte hídrico de 1,52 m³ s⁻¹ proveniente da transposição apenas nos meses de menor afluência.

Nota<sup>2</sup>: aporte hídrico de 20% do efluente tratado (água de lavagem de filtro + lodo) das ETAs do reservatório Eptácio Pessoa.

A partir da simulação do cenário de referência (A0), observou-se que o sistema ausente de medidas de gerenciamento apresenta uma frequência de atendimento às demandas humanas (somadas urbanas e rurais) de apenas 65% do período simulado. A severidade dessa falha é ainda mais acentuada na capacidade do sistema de atender às demandas de irrigação, o que resulta em prejuízo para o desenvolvimento econômico da região.

As alternativas individualizadas (A1; A2; A3), que incorporam conceitos de sustentabilidade em redes hidráulicas residenciais, apresentam reduções no consumo que

umentam a capacidade de fornecimento humano em 71% durante o período simulado. Entre as alternativas, ressalta-se que o projeto de reuso de águas cinzas (A3) é de maior custo e de maior complexidade operacional de implantação que nos sistemas de mecanismos poupadores (A1) e de captação de água da chuva (A2).

As simulações da rede de vazão das alternativas combinadas (A4; A5) mostraram percentuais semelhantes de capacidade para atender o abastecimento humano, respectivamente, 74% e 75%, e reduziram o tempo do reservatório abaixo do volume meta, gerando menor risco de operação de reservatório em níveis críticos e menor consumo de água. O tempo de retorno do investimento fica evidente como uma diferença entre as alternativas combinadas, que, segundo Sousa (2017), é de seis anos e três meses para o sistema adotado por (A4) e nove anos e sete meses para o sistema (A5).

A alternativa (A6) que utiliza o abastecimento de água da transposição do Rio São Francisco é o atual cenário de gerenciamento para atender a demanda. A alternativa tem o melhor percentual de atendimento das demandas com abastecimento humano atendido em 99% durante o período simulado. É importante notar que, segundo Rêgo et al. (2017), a transposição é uma alternativa radical de gestão adotada no semiárido. A alternativa foi adotada após o estado crítico no abastecimento dos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa, que também impacta a insegurança hídrica na região hidrográfica do rio São Francisco. No entanto, a alternativa só deveria ter sido adotada após a adoção de todas as soluções racionais, modernas e sustentáveis para a gestão da demanda de água, inclusive de natureza econômica e financeira.

A alternativa (A7), que propõe a utilização de recursos hídricos de  $1,52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durante os meses menos afluentes, mitigaria a intensificação dos conflitos na bacia do rio São Francisco, reduzindo, no período simulado, a frequência do reservatório abaixo do volume alvo para 64,6%. No entanto, mostrou-se insuficiente para gerar segurança hídrica para a região, pois apresenta 30,9% de falhas no abastecimento humano.

As combinações de alternativas (A8; A9; A10; A11) representam responsabilidade compartilhada entre os usuários. Esse compartilhamento foi demonstrado na alternativa (A10), entre a racionalidade no consumo do usuário final e a redução de perdas pela empresa concedida pelo sistema de abastecimento. Nesta configuração, a redução de 20% nas perdas, aliada ao uso de equipamentos economizadores de energia, obteve menor percentual de falhas no atendimento da demanda (29,2%) do que a alternativa (A7) que utiliza o abastecimento de água da transposição nos meses menos abastecidos (30,9%).

A alternativa (A12) apresentou a redução de consumo mais significativa, o menor tempo abaixo do volume alvo e a vazão média alocada de 97% da vazão demandada pelo

abastecimento humano. As alternativas (A12; A6), que diferem no período de utilização do abastecimento de água da Transposição do Rio São Francisco - Eixo Leste e na adoção de medidas sustentáveis, apresentaram diferentes percentuais de falhas no período simulado. A redução do consumo proposta em (A12) diminuiu a suscetibilidade a falhas no atendimento da demanda humana, indicada em seus 3,6%, contra 5,4% da alternativa (A6). Tais resultados demonstram que a obtenção de um volume de água mais significativo por meio da transposição não garante confiabilidade hídrica ao sistema, exigindo medidas eficientes de gestão e redução do consumo.

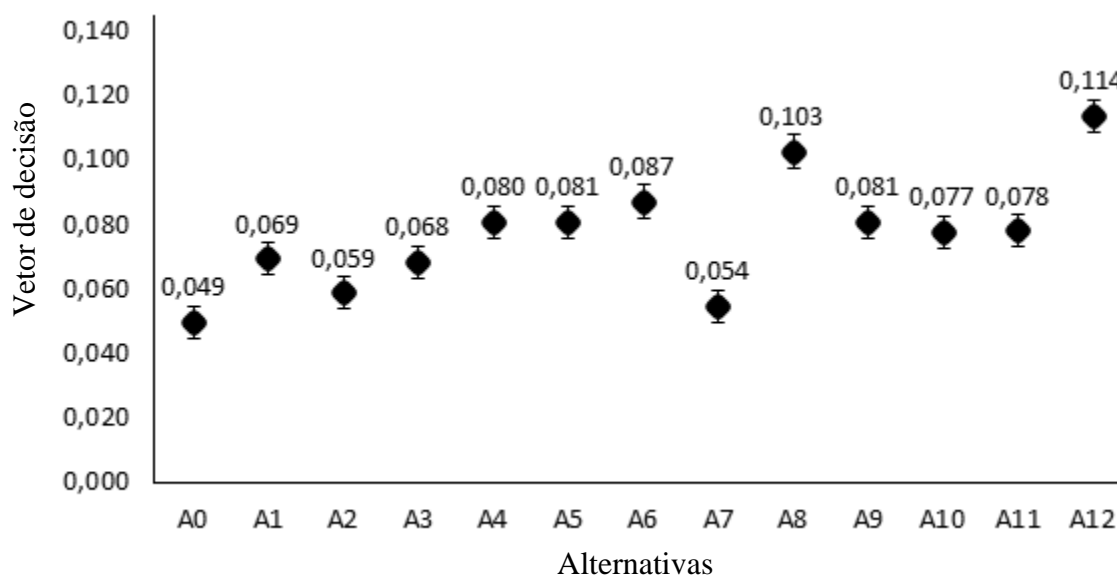
Com base nos dados dos resultados da modelagem de rede de fluxo, a entropia de Shannon foi utilizada para calcular a importância relativa dos critérios (Tabela 7), como abordagem objetiva para classificar as alternativas de gerenciamento da demanda de água. A Tabela 7 mostra que o indicador mais importante é o critério C1, seguido, em ordem hierárquica, por C3, C2 e C4.

**Tabela 7** – Pesos da Entropia de Shannon.

<b>Critérios</b>	<b>Pesos objetivos</b>	<b>Ranking</b>
<b>C<sub>1</sub></b> Atendimento da demanda de abastecimento humano	0,273	1
<b>C<sub>2</sub></b> Atendimento da demanda de irrigação	0,260	3
<b>C<sub>3</sub></b> Volume do reservatório acima do volume meta	0,270	2
<b>C<sub>4</sub></b> Redução de consumo	0,201	4

Fonte: Autoria própria

A partir dos critérios e do cálculo dos seus respectivos pesos, foi aplicado o AHP simplificado aos dados da modelagem de rede de fluxo. O método fornece um vetor de decisão para as alternativas, de forma que quanto maior, melhor a alternativa é classificada. A Figura 14 apresenta os resultados do vetor de decisão da Entropia – AHP simplificada, por alternativas de gerenciamento de demanda consideradas, de acordo com os pesos objetivos.

**Figura 14** – Vetor de decisão da AHP simplificada-Entropia por alternativa de gestão da demanda.

Fonte: Autoria própria

De acordo com os resultados da Entropia-AHP, identifica-se que a escolha da alternativa de gestão da demanda apresentou uma hierarquia de  $A12 > A8 > A6 > A9 > A5 > A4 > A11 > A10 > A1 > A3 > A2 > A7 > A0$  para os critérios analisados.

Como o peso dos critérios afeta significativamente a classificação, a alteração do valor do peso deve ser avaliada. A ordenação é analisada em diferentes cenários (Quadro 7), considerando o critério como preferencial em cada um.

**Quadro 7**– Ranking em termos dos diferentes cenários de prioridades.

Cenários		Classificação												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C <sub>1</sub>	Igualdade de pesos	A12	A8	A6	A9	A5	A4	A11	A10	A1	A3	A2	A7	A0
C <sub>2</sub>	Abastecimento humano	A12	A8	A6	A9	A5	A4	A11	A10	A1	A3	A2	A7	A0
C <sub>3</sub>	Irrigação	A12	A8	A6	A9	A5	A4	A11	A10	A1	A3	A2	A7	A0
C <sub>4</sub>	Manutenção do reservatório	A12	A8	A6	A9	A5	A4	A11	A10	A1	A3	A2	A7	A0
C <sub>5</sub>	Redução do consumo	A12	A8	A9	A5	A4	A11	A10	A1	A3	A6	A2	A7	A0

Fonte: Autoria própria

De acordo com os resultados, para os cenários C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> a escolha das alternativas de gerenciamento de demanda para os critérios analisados é a mesma ordem hierárquica do método AHP-Entropia. Em contraste, o cenário C<sub>5</sub> apresentou uma hierarquia diferente.

Dentre as alternativas, aquela que considera o abastecimento de água apenas nos meses de menor afluência (A7) é a penúltima colocada entre todas as simulações, e a última, caso sejam tomadas apenas as medidas que considerem alguma medida de gestão. Isso porque não há redução de consumo para o sistema hidroelétrico, embora tecnicamente presente

percentuais de atendimento semelhantes às alternativas que adotam projetos sustentáveis para residências (A1, A2, A3).

Verifica-se no cenário C5 que as alternativas que consideram medidas combinadas de projetos residenciais sustentáveis (A1, A3, A4, A5), uso de equipamentos economizadores combinados com redução de perdas (A10), e o uso dos mesmos equipamentos combinados com aumento da eficiência da irrigação (A11), são ainda mais preferidas do que as alternativas atuais que utilizam a transposição do abastecimento de água do Rio São Francisco todos os meses (A6). Uma vez que as citadas têm a capacidade de reduzir o consumo, conseqüentemente gerando menor pressão sobre as demandas no reservatório.

Considerando as necessidades hídricas do semiárido em que se encontra o reservatório Epitácio Pessoa, as condições de insegurança hídrica da bacia de transposição e os diversos custos do sistema, as alternativas que utilizam o abastecimento de água no período de menor afluência por precipitação são melhor avaliadas em conjunto com alternativas de gestão que adotem equipamentos de economia de energia e eficiência de consumo (A12 e A8).

### **5.3 Simulação e classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas.**

A simulação e classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas podem desempenhar um papel crucial no contexto do ODS 6 ("Água Limpa e Esgotamento Sanitário"). O contexto metodológico alinha-se as metas do ODS 6, que visam garantir o acesso universal à água potável segura e ao esgotamento sanitário adequado. A classificação visa promover a eficiência no uso dos recursos hídricos disponíveis, especialmente em regiões onde a água é escassa ou enfrenta pressão devido ao crescimento populacional. Identificar soluções tecnológicas viáveis economicamente e sustentáveis é fundamental para a implementação e manutenção contínuas dessas tecnologias, especialmente em comunidades com recursos limitados.

Com base nos dados iniciais apresentados na Tabela 1, a entropia de Shannon foi utilizada para calcular a importância relativa de cada critério relacionado a classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas. Os pesos de todos os critérios e a classificação foram obtidos para a classificação das alternativas, como demonstrado na Tabela 8. Os pesos de todos os critérios e a classificação foram obtidos para a classificação das alternativas, como demonstrado na Tabela 8.

**Tabela 8** – Pesos dos critérios na Entropia de Shannon.

<b>Critérios</b>	<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Ranking</b>	<b>Peso</b>	<b>Ranking</b>
<b>Ambientais</b>	Remoção de DBO (C1)	0,072	11	0,609	1
	Remoção de Sólidos suspensos (C2)	0,072	13		
	Capacidade de remoção de Nutrientes (C3)	0,078	6		
	Capacidade de remoção de Coliformes Totais (C4)	0,073	10		
	Consumo de energia requerido (C5)	0,076	8		
	Área necessária (C6)	0,081	2		
	Produção de lodo (C7)	0,086	1		
	Confiabilidade (C8)	0,072	12		
<b>Sociais</b>	Geração de Odor (C9)	0,081	2	0,237	2
	Geração de Ruído (C10)	0,078	7		
	Complexidade de operação (C11)	0,079	4		
<b>Econômicos</b>	Custo de implantação (C12)	0,079	5	0,154	3
	Custo de operação e manutenção (C13)	0,075	9		

Fonte: Autoria própria

Como visto na Tabela 8, o critério produção de lodo é o mais importante para escolha da tecnologia de tratamento de efluentes, seguido por Área necessária, Geração de odor, Complexidade de operação, Custo de implantação, Capacidade de remoção de nutrientes, Geração de ruído, Consumo de energia, Custo de operação e manutenção, Capacidade de remoção de Coliformes, Capacidade de remoção de DBO, Confiabilidade e capacidade de remoção de sólidos suspensos. Os quatro métodos de MCDM (WSM, TOPSIS, VIKOR e AHP) foram aplicados aos dados. Os resultados de classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias são apresentados no Quadro 8.

**Quadro 8** – Classificação das alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas a partir da Entropia de Shannon.

<b>Ranking</b>	<b>TOPSIS</b>	<b>WSM</b>	<b>AHP</b>	<b>VIKOR</b>
	<b>Alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias domésticas</b>			
<b>1</b>	W	W	W	W
<b>2</b>	LF	LF	LF	LA+LF
<b>3</b>	LA + LF	LA + LF	LA + LF	LF
<b>4</b>	U	U	U	U
<b>5</b>	SPT + FA	SPT + FA	SPT + FA	SPT + FA
<b>6</b>	U+FB	U+FB	U+FB	U+FB
<b>7</b>	LoA	LoA	LoA	LoA

\*\*W: Wetlands; LA+LF: Sistema de lagoa anaeróbia + lagoa facultativa; U: Reator UASB; SPT + FA: Tanque séptico + Filtro aneróbio; LF: Lagoa facultativa; U + FB: Reator UASB + Filtro Biológico Percolador de Alta Carga; LoA: Lodos Ativados Convencionais.

Fonte: Autoria própria

Com base na utilização dos mesmos pesos obtidos pelo método objetivo da Entropia, o resultado da análise multicritério de tecnologia de tratamento de águas residuárias apresentou



similaridade, tendo três métodos com resultados idênticos (TOPSIS, AHP e WSM). Tal como indicado na Tabela 4, a alternativa Wetlands, ou jardins filtrantes, foi a de melhor desempenho nas quatro abordagens Entropia-multicritério. Nos métodos de resultados iguais, a alternativa de Lagoa Facultativa ocupou a segunda colocação, seguida do sistema de Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa, do reator UASB, do sistema Tanque séptico + Filtro anaeróbio, da combinação UASB+FB e com os Lodos ativados na última colocação. O único resultado distinto se deu no método VIKOR com a mudança de classificação do sistema de Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa na segunda posição, alternando posição com a alternativa Lagoa Facultativa.

A análise de sensibilidade foi realizada para quantificar o nível de variabilidade entre os modelos em relação aos critérios e a classificação das tecnologias, revelando como a classificação das alternativas muda devido à variação dos pesos dos critérios em cada modelo híbrido.

Seguindo a metodologia adotada por Mulliner et al. (2016), Lee e Chang (2018), e Araújo et al. (2022), a análise de sensibilidade foi feita em duas abordagens. Primeiro, os pesos dos critérios (resultado da entropia de Shannon) foram ajustados em intervalos percentuais para cada critério individual, de modo que o peso total dos critérios seja igual 1. Os critérios são alterados proporcionalmente, de modo que quando o peso de um critério aumenta, os outros diminuem proporcionalmente (Figura 15). As alterações nas classificações dos municípios também foram avaliadas com base na representação em um coeficiente de sensibilidade (Tabela 9). Nesse caso, o coeficiente representa o número de critérios que alteraram a classificação ao seu ajuste para aumento ou diminuição em 5% ou 50%, seguindo o mesmo critério de ajuste proporcional às alterações percentuais.

A figura 15 representa os resultados da análise de sensibilidade, demonstrando como a mudança no peso do critério afeta a classificação das alternativas. Retângulos verde-escuros indicam mudanças toleráveis no peso dos critérios (conforme mostrado no painel superior), nas quais a classificação das alternativas não é sensível, enquanto retângulos verde-claros representam a faixa que contribui para a mudança única das alternativas. Em princípio, o comprimento da barra horizontal indica a sensibilidade do critério à mudança, sendo que quanto mais curta a barra, maior o nível de sensibilidade. Os resultados para os 4 métodos MCDM em cada painel de critério são exibidos na seguinte ordem: TOPSIS (topo), WSM, AHP e VIKOR (parte inferior).

**Figura 15** – Análise de sensibilidade por mudança dos pesos dos critérios.

Fonte: Autoria própria

**Tabela 9** – Coeficiente de sensibilidade

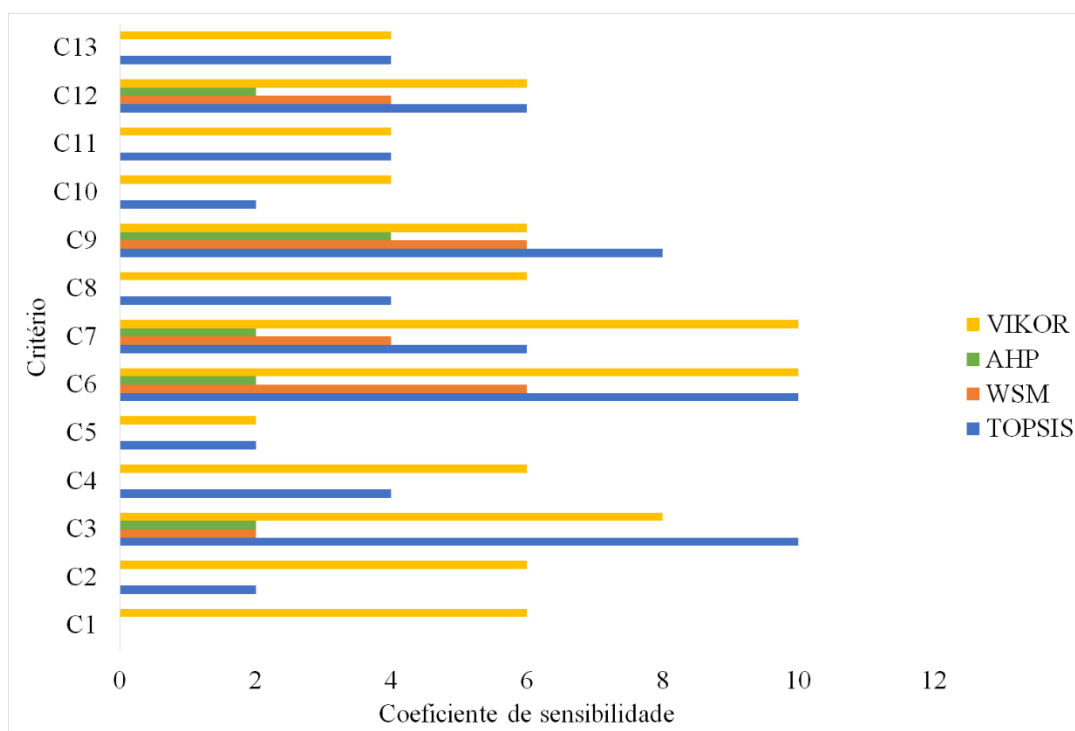
Método	Mudança no peso do critério											
	-5%			+5%			-50%			+50%		
	Coeficiente de sensibilidade											
	0	2	>2	0	2	>2	0	2	>2	0	2	>2
<b>TOPSIS</b>	7	6	0	11	2	0	3	7	3	7	3	3
<b>WSM</b>	12	1	0	11	2	0	11	1	1	9	3	1
<b>AHP</b>	13	0	0	13	0	0	11	2	0	9	4	0
<b>VIKOR</b>	10	3	0	11	2	0	7	4	2	1	5	7

Fonte: Autoria própria

A Figura 16 ilustra a sensibilidade de cada critério de maneira mais simplificada. O eixo horizontal representa o coeficiente de sensibilidade ao aumentar ou diminuir o peso de um critério em 5% ou 50%. Por exemplo, quando o peso do critério C3 aumenta em 50%, a classificação resultante de  $A1 > A5 > A2 > A3 > A6 > A4 > A7$  muda para  $A1 > A5 > A2 > A3 > A4 > A6 > A7$ . O peso do critério é ajustado em 5% ou 50% para calcular quantas mudanças ocorrem na classificação. Conforme evidenciado na Figura 16, os resultados de classificação para C1 não são afetados nos métodos TOPSIS, WSM e AHP, e ainda não há

alterações na mudança percentual para os critérios C1, C2, C4, C5, C8, C10, C11 E C13 nos métodos WSM e AHP. Por outro lado, C6 e C7 são os mais sensíveis, principalmente ao usar o método VIKOR, o qual apresentou alterações de classificação para todos os critérios.

**Figura 16** – Coeficiente de sensibilidade por alteração dos pesos no VIKOR, AHP, WSM e TOPSIS.



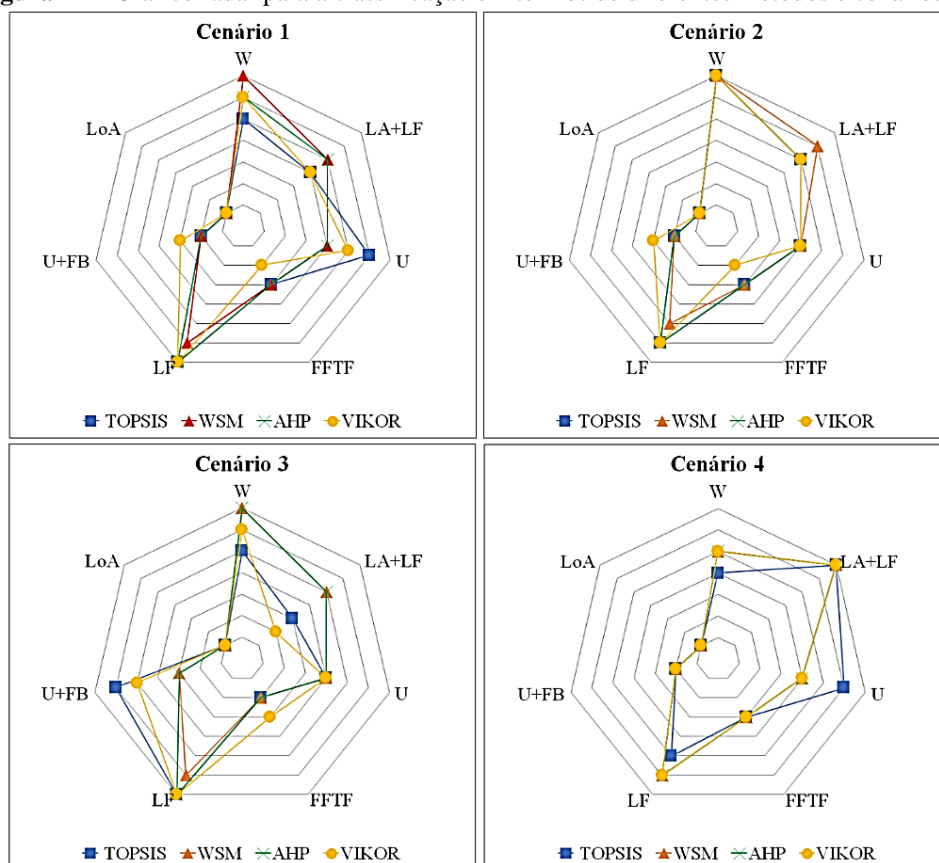
Na segunda abordagem para a análise de sensibilidade, os quatro cenários descritos na metodologia são levados em consideração. Dentro do cenário 1, cada dimensão é tratada como igualmente importante. Os três cenários em sequência se concentram nas áreas ambiental (Cenário 2), social (Cenário 3) e econômica (Cenário 4). Os pesos para os critérios em cada cenário são obtidos dividindo o peso da dimensão pelo número de critérios. As classificações em termos de diferentes métodos e cenários são apresentadas no Quadro 9 e no gráfico radar na Figura 17. Os resultados de classificação são diferentes em vários cenários.

**Quadro 9** – Ranking nos métodos e cenários.

Cenário	Método	Ranking						
		1	2	3	4	5	6	7
Cenário 1 (Pesos iguais)	TOPSIS	LF	U	W	LA+LF	SPT + FA	U+FB	LoA
	WSM	W	LF	LA+LF	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	AHP	LF	W	LA+LF	U	LF	U+FB	LoA
	VIKOR	LF	W	U	LA+LF	U+FB	SPT + FA	LoA
Cenário 2 (Ambiental)	TOPSIS	W	LF	LA+LF	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	WSM	W	LA+LF	LF	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	AHP	W	LF	LA+LF	U	SPT + FA	U+FB	LoA

	VIKOR	W	LF	LA+LF	U	U+FB	SPT + FA	LoA
	TOPSIS	LF	U+FB	W	U	LA+LF	SPT + FA	LoA
<b>Cenário 3 (Social)</b>	WSM	W	LF	LA+LF	U	U+FB	SPT + FA	LoA
	AHP	LF	W	LA+LF	U	U+FB	SPT + FA	LoA
	VIKOR	LF	W	U+FB	U	SPT + FA	LA+LF	LoA
	TOPSIS	LA+LF	U	LF	W	SPT + FA	U+FB	LoA
<b>Cenário 4 (Econômico)</b>	WSM	LA+LF	LF	W	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	AHP	LA+LF	LF	W	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	VIKOR	LA+LF	LF	W	U	SPT + FA	U+FB	LoA
	VIKOR	LA+LF	LF	W	U	SPT + FA	U+FB	LoA

**Figura 17** – Gráfico radar para a classificação em termos de diferentes métodos e cenários.



No cenário 1, a LF é a alternativa de melhor classificação nos métodos TOPSIS, AHP e VIKOR, com os Wetlands sendo preferíveis no WSM. A partir de uma priorização dos critérios ambientais (Cenário 2), os Wetlands apresentam o maior desempenho em todos os MCDM'S, seguidos pelos sistemas que consideram lagoas. O cenário de priorização de aspectos sociais (Cenário 3) apresentou as maiores variações nos resultados dos métodos. A alternativa Wetlands ocupou a primeira posição no método WSM, sendo a segunda melhor classificada nos métodos AHP e VIKOR, e terceira no método TOPSIS. O cenário de preferência dos aspectos econômicos colocou o sistema LA + LF na primeira posição, com destaque para os Wetlands ocupando a quarta posição, pior desempenho, no TOPSIS. Destaca-se ainda que os

LoA desempenharam posição fixa e menos desejável em todos os cenários e modelos analisados.

A análise foi feita para quatro métodos Entropia-MCDM (TOPSIS, AHP, WSM e VIKOR) para selecionar e classificar a preferência de alternativas tecnológicas de tratamento de águas residuárias no semiárido. Os resultados da ponderação de critérios indicaram que Produção de Lodo, Geração de Odor e Área necessária são as três maiores prioridades dentre os critérios de seleção da tecnologia. Esse resultado indica que a escolha da tecnologia deve considerar aspectos de uso racional e participativo, sobretudo relacionado à gestão eficiente de resíduos, ao consenso social e ao aproveitamento sustentável dos recursos disponíveis limitados.

Nos últimos anos tem havido um crescente reconhecimento da importância do aspecto ambiental, à medida que têm se ampliado a conscientização sobre a proteção do meio ambiente e o rigor das leis ambientais. Os pesos obtidos no presente estudo estão parcialmente consistentes com resultados de estudos anteriores. Arroyo e Senante (2018) constataram através do método AHP que o Odor é o critério mais relevante, enquanto Confiabilidade está entre os dois menos importantes na seleção de tecnologias de tratamento de águas residuárias domésticas em pequenas comunidades. A similaridade com o estudo dos autores se repete entre a maioria dos critérios, com distinção para o critério Área requerida, que no nosso trabalho ocupa a terceira colocação pela ponderação da entropia, e na ponderação pelo método CBA dos autores ocupa a última colocação. Essa variação deve ocorrer pela diferença de perspectiva dos tomadores de decisão da análise subjetiva do CBA, levada em consideração a disponibilidade de área para a região da análise.

Salamirad et al. (2021) propuseram uma ponderação pelo método Best–Worst Method (BWM) e indicaram que os três critérios mais importantes são Consumo de energia, Impacto dos odores e Produção de lodo, com duas classificações similares nas três melhores alternativas classificadas do presente estudo. Seus resultados também indicam critérios ambientais menos importantes, como remoção de salinidade e de bactérias. A partir da similaridade dos resultados citados, é possível observar que a ponderação objetiva pela Entropia de Shannon pode ser considerada à semelhança das ponderações subjetivas do AHP, CBA e BWM, de modo que sua simplicidade e independência se sobressaem à necessidade de montagem de um grupo de stakeholders.

Além disso, a abordagem Entropia-Multicritério pelos 4 métodos demonstrou resultados similares. A alternativa de Jardins filtrantes obteve o melhor desempenho sob os critérios analisados, seguido de Lagoa Facultativa, na segunda colocação, em sequência do sistema de

Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa, do reator UASB, do sistema SPT + FA, da combinação UASB+FB e com os Lodos ativados na última colocação. A mudança única de classificação se deu no método VIKOR com a troca de ordem do sistema de Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa e a alternativa Lagoa Facultativa. Apesar da robustez apresentada na congruência de resultados das diferentes abordagens híbridas de entropia-multicritério, as limitações das abordagens objetivas devem ser consideradas, de modo que a ausência de um grupo decisor pode, ou não, distanciar a análise para a realidade por circunstâncias específicas ou locais.

Com base no resultado dos 4 métodos, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida a partir da mudança dos pesos dos critérios. Assim como disposto por Lee and Chang (2018), o método VIKOR apresentou maior sensibilidade, com o método WSM demonstrando menor sensibilidade à variação percentual. Os resultados de similaridade de classificações pelos métodos são consistentes com os estudos de Mulliner (2014) e Lee e Chang (2018). A cenarização apresentou resultados de LF e os Jardins filtrantes como as melhores alternativas para os cenários de pesos iguais, de priorização dos critérios ambientais, e de preferência por critérios sociais. As possíveis principais razões se dão por essas tecnologias serem melhor avaliadas em relação aos critérios área necessária, consumo de energia requerido e custo de operação e manutenção. No cenário de priorização dos critérios econômicos, o sistema LA+LF se apresentou como melhor alternativa, em circunstância de possuir melhor avaliação nos critérios de custo de implantação e custo de operação e manutenção.

Outros critérios sociais, como impacto visual, aceitação pública, ou ainda outros indicadores ambientais, como remoção de bactérias e de salinidade, ou até critérios técnicos, como eficiência do sistema e dependência do volume de efluente, poderiam ser incluídos e melhorariam a adequação da avaliação. Outra possibilidade seria uma reunião clara com todas as partes envolvidas, desde usuários até tomadores decisão, em uma discussão completa, desde a escolha dos critérios até a ponderação, o que poderia tornar a análise mais consistente e abrangente.

A classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias em aspectos ambientais, sociais e econômicos possibilita serem feitas algumas recomendações para a política de tratamento de águas residuárias em regiões semiáridas, conforme apresentado no Quadro 10. Estas recomendações visam promover o desenvolvimento sustentável do tratamento de águas residuárias no semiárido, contribuindo na proteção do meio ambiente e na oferta de água limpa e segura para a população.

**Quadro 10** – Recomendações propostas à política de tratamento de águas residuárias em regiões semiáridas.

**Recomendações para a política de tratamento de águas residuárias em regiões semiáridas**

**i. Melhoria da eficiência no tratamento de águas residuárias:** a tecnologia desempenha um papel fundamental no desenvolvimento do tratamento de águas residuais no semiárido. É essencial investir em tecnologias e inovações que melhorem a eficiência do tratamento, reduzindo os custos e aumentando a capacidade de purificação.

**ii. Integração da cadeia de tratamento de águas residuais:** é importante promover a integração entre os diversos setores envolvidos no tratamento de águas residuais, desde a coleta até a disposição final. A colaboração entre empresas, órgãos governamentais e especialistas no setor pode trazer vantagens técnicas e facilitar a implementação de soluções abrangentes.

**iii. Incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao tratamento de águas residuais:** é fundamental estimular as empresas a investirem em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que tornem o tratamento de águas residuais mais eficiente, sustentável e econômico. Subsídios, financiamentos e parcerias com instituições de pesquisa podem impulsionar a inovação nesse campo.

**iv. Ajuste da estrutura tarifária de saneamento básico:** é necessário reavaliar a estrutura tarifária relacionada ao saneamento básico no semiárido, considerando a importância do tratamento de águas residuárias. Uma estrutura tarifária adequada pode refletir o custo real do tratamento e incentivar os consumidores a adotarem práticas mais sustentáveis em relação ao uso e descarte de água.

**v. Aprendizado com experiências bem-sucedidas em outros países:** existem diversas nações que possuem sistemas eficientes de tratamento de águas residuárias. O semiárido pode aprender com essas experiências, identificando as melhores práticas, tecnologias e políticas implementadas em países com desafios e características semelhantes. Isso pode auxiliar na formulação de estratégias eficazes e acelerar o desenvolvimento do tratamento de águas residuais no país.

**vi. Fortalecimento da conscientização e educação ambiental:** é essencial promover a conscientização da população sobre a importância do tratamento adequado das águas residuárias. Programas de educação ambiental podem ser implementados em escolas, comunidades e mídias para informar sobre os benefícios do tratamento de águas residuais, incentivar a mudança de comportamento e estimular a participação ativa da sociedade nesse processo.

**vii. Estabelecimento de parcerias público-privadas:** o estabelecimento de parcerias entre o setor público e privado pode impulsionar o desenvolvimento do tratamento de águas residuárias no semiárido. Essas parcerias podem facilitar o acesso a recursos financeiros, experiência técnica e conhecimento, além de promover a eficiência na gestão e operação dos sistemas de tratamento.

Fonte: Elaborado a partir de ANA (2019), ANA (2021).

## 5.4 Síntese dos resultados da Gestão Sistemática de Recursos Hídricos

A GSRH foi proposta por abordagens multicritério híbridas nas etapas de diagnóstico, quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Na análise espacial, os resultados demonstraram que a vulnerabilidade hídrica não segue uma uniformidade geográfica para regiões doadoras, nem receptoras de águas da transposição do rio São Francisco, a serem consideradas a Região Fisiográfica do Médio São Francisco – região doadora, e para a Bacia Hidrográfica do rio Paraíba – região receptora. Os resultados apontam que a vulnerabilidade dos municípios no MSF é tão crítica ou até pior do que a observada nos municípios da BHPB, região receptora.

A aplicação integrada da modelagem de rede de fluxo e análise multicritério para o gerenciamento da demanda no reservatório Epitácio Pessoa evidenciou a eficácia e a equivalência de abordagens mais racionais e sustentáveis em comparação com políticas que priorizam obras estruturais de grande impacto, como no caso da transposição. Essa abordagem integrada ressalta a importância de medidas mais racionais e ambientalmente sustentáveis no contexto da gestão hídrica, em contraste com intervenções estruturais de maior magnitude. O investimento em medidas de gerenciamento de implantação de reuso, mecanismos poupadores, eficiência de irrigação e controle de perdas, promoveriam a redução nas falhas no atendimento às demandas do reservatório.

Ademais, a abordagem híbrida da entropia associada aos métodos multicritérios para classificação e seleção de tecnologias de tratamentos de águas residuárias, classifica as vantagens e desvantagens dos métodos de tratamento em rankings simplificados. Além disso, o modelo indicou que aspectos de uso racional e participativo, sobretudo relacionado ao consenso social e ao aproveitamento sustentável dos recursos disponíveis limitados devem ser cruciais para a manutenção da qualidade dos rios que mantêm a disponibilidade hídrica no semiárido. Um destaque relevante deve ser dado aos Wetlands, ou Jardins filtrantes. A tecnologia demonstra aspectos relevantes em termos de sustentabilidade, racionalidade e modernidade, exemplificada pela melhor classificação (ranking) no modelo entropia-multicritério, o que pode contribuir com um equilíbrio entre desenvolvimento e preservação ambiental no semiárido.

Em síntese, a abordagem de gestão sistemática proposta deve acontecer nas diversas escalas (nacional, regional, bacia hidrográfica, município, reservatório, domicílio e propriedade rural) tomando como base a perspectiva tridimensional da sustentabilidade, isto é, social, ambiental e econômica, conforme corroboram Brito et al. (2022), Araújo et al., (2022) e Cordão et al.(2020).

Para suavizar a convivência com as secas frequentes no semiárido e mitigar seus impactos, foi proposta a implementação de uma série de medidas, começando pelas áreas de suscetibilidade excepcionalmente prioritárias (Quadro 11). Mesmo com o término da seca de 2012-2018 na região Nordeste e a chegada das águas transpostas, como apresentado nos resultados, os municípios e sua população continuam a conviver com a insegurança hídrica.

**Quadro 11** – Proposição de medidas de gestão sistemática com base nos modelos desenvolvidos

<b>Abordagem multicritério híbrida proposta</b>	<b>Escala espacial de aplicação</b>	<b>Proposição de medidas de gestão sistemática baseadas nos modelos</b>
---	-------------------------------------	---



<b>Modelo multicritério híbrido de base SIG para mapear regiões em vulnerabilidade à escassez hídrica no semiárido</b>	Bacia hidrográfica do rio São Francisco (doadora) e Bacia hidrográfica do rio Paraíba (receptora)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Planejamento Integrado entre Comitês</li> <li>✓ Planos de contingência para enfrentar situações de emergência</li> <li>✓ Plano de revitalização de bacia transposta</li> <li>✓ Priorização de medidas de gestão à política de açudagem</li> <li>✓ Integração da gestão de água com programas sociais</li> <li>✓ Reforço de assistência técnica agropecuária</li> </ul>
<b>Modelo híbrido de modelagem de rede de fluxo e entropia-multicritério para avaliação de alternativas de gerenciamento da demanda de água</b>	Reservatório (aplicação ao Reservatório Epitácio Pessoa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Investimento em infraestrutura de armazenamento de água(cisternas)</li> <li>✓ Fomento ao uso de tecnologias otimizadas de irrigação</li> <li>✓ Controle de perdas</li> <li>✓ Fomento de utilização de mecanismos poupadores</li> <li>✓ Reuso de água</li> </ul>
<b>Classificação hierárquica para seleção de tecnologias de tratamento de águas residuárias no semiárido</b>	Região do semiárido (escala municipal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Universalização do esgotamento sanitário</li> <li>✓ Incentivo à Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Locais de tratamento de efluentes</li> <li>✓ Estabelecimento de mecanismos de monitoramento e controle de lançamento de efluentes</li> <li>✓ Capacitação e engajamento comunitário para o saneamento</li> <li>✓ Fortalecimento da conscientização e educação ambiental</li> </ul>

Fonte: Elaborado a partir de ANA (2019), Brito (2021) e ANA (2021).

As ações se estendem à inclusão de análises de resiliência dos municípios nordestinos, envolvimento de comitês de bacia e conselhos ambientais na tomada de decisões, estímulo ao abastecimento por fontes alternativas, implementação de campanhas de conscientização e a promoção da universalização do saneamento por meio de tecnologias sustentáveis. Essas medidas estruturadas resultam em um plano integrado e abrangente para enfrentar os desafios da escassez hídrica e promover a GSRH no semiárido.

Com base nos modelos e abordagens híbridas estudadas, ainda foi realizada uma importante análise comparativa de resultados distintos entre aplicações de métodos multicritério. A partir do mapeamento de vulnerabilidade à escassez hídrica, verificou-se que os resultados de classificação fornecido pelo método VIKOR em ambiente SIG dessemelharam-se diante da escolha do método de ponderação. Similarmente, a divergência ocorre entre os resultados da análise espacial obtidos por distintos métodos de ponderação.

Ademais, as abordagens híbridas a partir das análises comparativas, equiparando os modelos WSM, TOPSIS, VIKOR e AHP, permitiram lidar com a incerteza e variabilidade dos sistemas, enquanto os métodos multicritério proporcionam uma estrutura formal para avaliar diferentes critérios. A aplicação por métodos distintos demonstra a necessidade de aplicações

mais robustas, pois a complexidade dos problemas requer uma constante evolução das técnicas para garantir uma análise precisa e adaptável às particularidades das situações específicas. O quadro 12 apresenta uma síntese sobre a aplicabilidade dos métodos de ponderação e multicritério utilizados.

**Quadro 12** – Quadro síntese de aplicabilidade dos métodos de ponderação e métodos multicritério utilizados.

<b>Métodos de ponderação</b>	<b>Características principais</b>
<b>AHP Simplificado (Escala de Saaty)</b>	Permite a incorporação das preferências subjetivas dos decisores, fornecendo uma estrutura simples e organizada para a preferência dos critérios, no que o difere da complexidade do AHP convencional. No entanto, sua utilização inclui a dependência da subjetividade do decisor, se comparado a métodos objetivos, possibilitando viés nos resultados. Recomenda-se quando há especialistas bem informados e com experiência no domínio do problema, capazes de fornecer preferências confiáveis.
<b>Entropia de Shannon</b>	Capacidade de lidar com sistemas complexos e dinâmicos, proporcionando uma abordagem flexível. No entanto, sua aplicabilidade pode ser restrita em situações onde as relações entre critérios são claras, pois a Entropia de Shannon não captura as preferências subjetivas dos decisores. Recomenda-se quando os dados dos critérios são razoavelmente bem distribuídos e não apresentam valores extremos ou discrepantes.
<b>CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)</b>	Minimiza a subjetividade ao considerar as relações entre critérios e subcritérios. Suas vantagens incluem a consideração das interações entre os critérios, promovendo uma avaliação mais objetiva. No entanto, sua aplicação pode ser limitada em casos de alta complexidade, onde as relações entre critérios são difíceis de definir ou podem variar ao longo do tempo. Recomendado quando se dispõe de dados de correlação confiáveis e significativos para os critérios.
<b>Método de decisão multicritério</b>	<b>Características principais</b>
<b>WSM (Método da Soma Ponderada)</b>	O WSM é útil quando se pode atribuir pesos distintos para cada critério com base na sua importância. Sua simplicidade facilita a interpretação, mas a sensibilidade à escolha dos pesos pode ser uma desvantagem, impactando os resultados. Portanto, o WSM pode não ser indicado em situações onde a ponderação precisa é crucial ou quando a complexidade da relação entre critérios não é bem representada por uma abordagem linear.
<b>TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</b>	Aplicável em decisões onde há um conjunto pré-determinado de alternativas e permite uma comparação direta entre elas com base nos critérios estabelecidos. Suas vantagens residem na simplicidade de implementação e compreensão, enquanto suas desvantagens estão associadas à sensibilidade na escolha da solução ideal e pior possível.
<b>VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)</b>	Apropriado para situações em que se busca uma solução de compromisso eficiente, oferecendo uma avaliação abrangente de alternativas considerando múltiplos critérios. Suas vantagens incluem a capacidade de encontrar soluções de compromisso eficientes e considerar a proximidade da alternativa ideal e pior. Contudo, é importante destacar a sensibilidade do método aos parâmetros e à escolha dos pesos, o que pode influenciar seus resultados.

<b>AHP (Analytic Hierarchy Process - Saaty)</b>	Indicado para decisões complexas com hierarquia de critérios. É útil quando se busca estruturar de forma clara as relações hierárquicas. A dependência da subjetividade do decisor é uma desvantagem significativa, introduzindo potencial viés nas comparações pareadas. O AHP pode não ser adequado em situações onde a subjetividade não pode ser controlada ou quando as comparações pareadas são difíceis de serem estabelecidas de maneira consistente.
---	---

Fonte: Elaborado a partir de Piegat e Salabun (2015), Lee e Chang (2018) e Araújo et al. (2022).

A seguir, apresenta-se um guia composto por 10 etapas (Quadro 13), delineando a implementação da metodologia e estratégias propostas neste estudo. Estas medidas visam contribuir com a gestão dos recursos hídricos no semiárido, bem como propiciar uma ferramenta metodológica prática e aplicável.

Inicia-se com a implementação da abordagem multicritério híbrida dos recursos hídricos, fundamentada em dados georreferenciados e informações dos hidrossistemas desenvolvidos nesta tese. Este guia orienta os gestores e tomadores de decisão, e deve proporcionar a flexibilidade necessária para adaptação a diferentes contextos e desafios específicos de cada região. A abordagem proposta não se limita apenas ao aspecto hidroclimático, mas também incorpora considerações socioeconômicas e ambientais em perspectiva holística de gestão da água.

O planejamento abrange desde a identificação das áreas mais vulneráveis à escassez hídrica até o desenvolvimento de planos municipais integrados, proporcionando uma visão abrangente e integrada para enfrentar os desafios hídricos. Essa flexibilidade e adaptabilidade tornam a abordagem multicritério híbrida uma ferramenta valiosa para gestores e tomadores de decisão.

**Quadro 13** – Estrutura de implementação da metodologia e estratégias de GSRH propostas.

**Etapas de implementação**

**Etapa 1.** Implementar a Abordagem Multicritério Híbrida dos Recursos Hídricos no Semiárido utilizando dados georreferenciados e os critérios abrangentes discutidos na tese;

**Etapa 2.** Identificar, por meio dessa metodologia, as áreas mais impactadas temporalmente pelos eventos de escassez hídrica, destacando aquelas com maior vulnerabilidade;

**Etapa 3.** Identificar a incidência multicritério espacial sobre essas regiões para avaliar a suscetibilidade e a adaptabilidade aos efeitos da escassez de água, incorporando a modelagem de rede de fluxo para identificar falhas de abastecimento;

**Etapa 4.** Incluir, além da abordagem multicritério de secas e impactos, uma análise que considere a capacidade de adaptação e resiliência dos municípios, incorporando as metas do ODS6;

**Etapa 5.** Desenvolver planos municipais de vulnerabilidade a escassez hídrica integrados com planos estaduais, de bacia hidrográfica e de recursos hídricos, promovendo uma abordagem abrangente e alinhada;

**Etapa 6.** Incentivar o abastecimento por meio de fontes alternativas de água e integrar programas de construção de infraestrutura para otimizar os recursos disponíveis;

---

**Etapa 7.** Envolver os comitês de bacia hidrográfica e os conselhos de meio ambiente na tomada de decisões sobre a gestão da escassez hídrica, promovendo a participação ativa da população na resolução de demandas relacionadas à preparação para secas futuras;

**Etapa 8.** Implementar campanhas de conscientização nas áreas urbanas, promovendo o uso racional da água e incentivando o reúso. Para as comunidades rurais, além de promover o uso eficiente para fins humanos, orientar os produtores sobre práticas de irrigação adequadas e espécies adaptáveis ao clima;

---

**Etapa 9.** Promover a universalização do esgotamento sanitário por meio da escolha e implementação de tecnologias de tratamento de águas residuárias sustentáveis, contribuindo para as metas do ODS6.

**Etapa 10.** Divulgar mensalmente os resultados obtidos por meio de diferentes canais de comunicação, como rádio, redes sociais e televisão, visando informar a população sobre a situação hídrica e as estratégias de gestão propostas;

---

Fonte: Autoria própria

No contexto da PNRH, propõe-se uma estratégia abrangente para enfrentar a escassez hídrica no semiárido, adotando uma abordagem de gestão sistemática que integra os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos. A implementação da abordagem multicritério híbrida dos recursos hídricos no semiárido utiliza dados georreferenciados e informações dos hidrossistemas.

Ao identificar as áreas mais vulneráveis à escassez, avaliamos a suscetibilidade espacial e a adaptabilidade aos efeitos da escassez, incorporando técnicas de modelagem e espacialização. A GSRH deve avaliar e promover a capacidade de adaptação e resiliência dos municípios, alinhando-se com as metas do ODS 6 e promovendo uma abordagem holística na gestão dos recursos hídricos.

Como ponto crucial, destaca-se ainda a contribuição para simplificação no processo de universalização do esgotamento sanitário. A escolha e implementação de tecnologias de tratamento de águas residuárias sustentáveis, em consonância com as metas do ODS 6, deve contribuir significativamente para a melhoria da qualidade da água. Além disso, as medidas propostas buscam incentivar o abastecimento por meio de mecanismos modernos e sustentáveis de água, integrando programas de construção de infraestrutura, para otimizar o uso dos recursos disponíveis de maneira sustentável.

A participação ativa da população deve ser incentivada, envolvendo comitês de bacia hidrográfica e conselhos de meio ambiente na tomada de decisões. Campanhas de conscientização devem ser implementadas nas áreas urbanas, promovendo o uso racional da água e incentivando o reúso. Para as comunidades rurais, são orientadas práticas de irrigação adequadas e o uso de espécies adaptáveis, buscando a eficiência no consumo.

A divulgação regular dos resultados, realizada periodicamente, visa informar a população sobre a situação hídrica e as estratégias de gestão em curso. Essas medidas não apenas reagem à vulnerabilidade, mas antecipam-se a elas, adotando abordagens técnicas e

sustentáveis para a gestão integrada e equitativa dos recursos hídricos, em alinhamento com os princípios estabelecidos pela PNRH.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O histórico de escassez de água nas regiões semiáridas do Brasil é um desafio complexo que continua a desafiar os avanços científicos e tecnológicos na administração de recursos naturais. O aumento da demanda por água, aliado à poluição dos mananciais, coloca uma pressão crescente sobre os recursos hídricos, representando um obstáculo significativo para o desenvolvimento socioeconômico dessas áreas. A irregularidade nas precipitações e as altas taxas de evaporação nas regiões semiáridas agravam ainda mais essa situação, tornando a gestão das diversas demandas um desafio árduo diante do crescimento populacional, desenvolvimento econômico, rápida urbanização e mudanças climáticas impactantes.

Considerando a abordagem proposta, a criação de uma estrutura metodológica híbrida foi justificada pelo intuito de identificar (mediante a modelagem de rede de fluxo), espacializar (por meio de base SIG) e ordenar alternativas de gerenciamento (abordando tanto a quantidade quanto a qualidade) por meio de uma classificação hierárquica (via entropia - análise multicritério). A intenção foi proporcionar uma gestão sistemática e apropriada dos recursos hídricos no contexto semiárido, alinhada com as metas do ODS 6. A hipótese sugeriu que a aplicação desse arcabouço metodológico pode respaldar a definição de políticas públicas, oferecendo suporte à tomada de decisões que contemplam a perspectiva integrada de qualidade e quantidade na gestão dos recursos hídricos.

A abordagem metodológica proposta foi feita por meio das seguintes etapas. Inicialmente, a etapa de diagnóstico envolveu a elaboração e aplicação de um modelo multicritério híbrido de base SIG, destinado a mapear as regiões vulneráveis à escassez hídrica no semiárido. Em seguida, o aspecto quantitativo foi abordado por meio do desenvolvimento e aplicação de um modelo híbrido que combina modelagem de rede de fluxo e entropia-multicritério. Por fim, o aspecto qualitativo foi contemplado com o desenvolvimento e a comparação de modelos multicritério híbridos, visando a seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias. As três etapas da abordagem promoveram uma perspectiva de gestão holística, integrando diferentes aspectos quantitativos, qualitativos, sociais, ambientais e econômicos para uma administração eficaz e abrangente dos recursos hídricos no contexto semiárido.

Os resultados obtidos a partir da implementação da abordagem metodológica proposta ofereceram perspectivas valiosas para a gestão integrada e eficaz dos recursos hídricos no contexto semiárido. A etapa de diagnóstico revelou padrões significativos de vulnerabilidade à escassez hídrica, fornecendo uma base sólida para a identificação de áreas críticas que

demandam intervenções prioritárias. No aspecto quantitativo, a aplicação do modelo híbrido de modelagem de rede de fluxo e entropia-multicritério permitiu uma avaliação abrangente das alternativas de gerenciamento da demanda de água, destacando estratégias eficazes e sustentáveis para otimizar o uso desse recurso. Já no aspecto qualitativo, a comparação dos modelos multicritério híbridos simplifica a seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias, proporcionando uma base simples para a tomada de decisões que visam a preservação da qualidade da água. Os resultados convergiram para a consolidação de uma abordagem integrada e abrangente, reforçando a importância da gestão sistemática para enfrentar os desafios hídricos no semiárido.

Na abordagem espacial multicritério, foi possível avaliar as condições atuais de vulnerabilidade à escassez de água nas regiões estudadas. O mapeamento das condições de risco na região MSF, como estudo de caso de uma região doadora de água por transposição, em comparação com a BHPB, uma região receptora de água por transposição, permitiu verificar que as condições dos municípios em regiões doadoras podem ser tão críticas quanto as dos municípios receptores. Nesse sentido, sugerimos que as ações de gestão no Brasil não se concentrem exclusivamente na construção de grandes e dispendiosas obras de infraestrutura hídrica, como exemplo de transposição, mas que uma gestão mais eficiente deve ser realizada por meio de um plano de enfrentamento da seca, buscando soluções racionais, modernas e sustentáveis.

A análise comparativa dos métodos de ponderação revelou uma baixa correlação entre os pesos dos critérios, mas sua aplicação no modelo multicritério representou um acordo mais significativo. Ao escolher o método de ponderação, sugerimos que, sempre que possível, mais de um método seja utilizado para uma avaliação mais abrangente. Além disso, dentre os métodos aplicados no presente estudo, preferencialmente a implementação do AHP simplificado deve ser realizada, pois é simples e reconhece as opiniões de especialistas com menor risco de interpretação equivocada pelo tomador de decisão.

Diante da simulação de alternativas de gestão da demanda de água, foi empregada uma ferramenta de decisão que contempla critérios e classifica as alternativas. A rede de fluxo foi associada a um método de análise multicritério, o entropia-AHP, como uma abordagem híbrida. Metodologicamente, essa abordagem híbrida permitiu sintetizar os resultados da simulação do hidrossistema, considerando quatro critérios preestabelecidos: atendimento à demanda humana; atendimento à demanda de irrigação; frequência do volume do reservatório abaixo do volume meta; e redução do consumo, resumindo as alternativas de gestão de demanda em um ranking.

As simulações da rede de fluxo representaram tanto a insegurança hídrica histórica dos

municípios atendidos pelo Reservatório Epitácio Pessoa devido a secas extremas, quanto a ineficiência na gestão da crise hídrica. Assim, a partir do ranking das alternativas simuladas, foi possível indicar aquelas que propõem mecanismos de economia e aumento da eficiência no uso da água. Portanto, essas alternativas destacam a necessidade de abordagens baseadas na racionalidade, modernização e sustentabilidade na gestão da água.

Sob a perspectiva da gestão da demanda de água, conclui-se que, com a disponibilidade de dados referentes ao uso da água e características físicas e climatológicas de sistemas hidrográficos complexos, é possível aplicar uma abordagem híbrida de rede de fluxo e Entropia-AHP para simular e classificar as melhores alternativas para a gestão da demanda de água, o que pode apoiar e simplificar o processo de tomada de decisão.

Ademais, a abordagem de seleção e classificação de tecnologias de tratamento de águas residuárias pela abordagem entropia-multicritério indicou a alternativa de Jardins filtrantes como a mais eficiente. Em seguida, a tecnologia de Lagoa Facultativa, sistema Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa, reator UASB, pelo sistema TFTF, UASB+FB e, por fim, pelo Lodo Ativado. Esses resultados oferecem uma perspectiva classificatória que simplifica a tomada de decisão no contexto de universalização do esgotamento sanitário, proporcionando ainda uma compreensão aprofundada das eficiências relativas das alternativas consideradas.

Contudo, é fundamental observar que, no âmbito desta pesquisa, as análises foram conduzidas considerando informações específicas e uma simplificação do número de critérios, o que pode ser considerado uma limitação. É importante considerar que análises com informações limitadas podem representar uma deficiência de acurácia das análises multicritério. Outros critérios (em todas as fases do presente estudo) sociais, indicadores ambientais, e econômicos ou até critérios técnicos, poderiam ser incluídos e melhorariam a adequação da avaliação. Outra abordagem para aumentar a robustez do estudo seria promover uma reunião detalhada que envolva todas as partes, desde os usuários até os decisores, abordando integralmente desde a escolha dos critérios até a ponderação, o que poderia resultar em uma análise mais sólida e completa.

Como diretriz para pesquisas futuras, a abordagem espacial multicritério pode ser proposta como um plano estrutural (classificação) para municípios e bacias hidrográficas e estar disponível em um ambiente web. Além disso, cenários futuros podem ser avaliados e disponibilizados ao público em geral com base em projeções de crescimento da demanda hídrica e desenvolvimento econômico. Novos estudos podem abordar a segurança hídrica utilizando práticas modernas, descentralizadas e sustentáveis para complementar o abastecimento convencional de água. Dessa forma, a captação de água da chuva, reuso de água



e mecanismos de economia de água podem ser avaliados como indicadores (fatores de influência).

Para pesquisas futuras sobre a avaliação de métodos de ponderação em abordagens espaciais multicritérios, o método tradicional AHP proposto por Saaty (1982), com base no conjunto de matrizes de comparação em pares, poderia ser comparado ao AHP simplificado e a outros métodos objetivos de ponderação (desvio padrão, peso médio, entre outros), bem como a influência da variação de outros modelos multicritérios utilizados.

Recomenda-se ainda a investigação de aceitabilidade e participação que possam ser integrados a modelos multicritério para uma avaliação mais abrangente das alternativas de gestão propostas. Além disso, é aconselhável que os estudos futuros considerem a inclusão de critérios adicionais, como sustentabilidade, custo-benefício, e interesse político, para uma análise mais completa e integrada. Outra área de pesquisa promissora seria a aplicação de abordagens semelhantes em diferentes contextos hidrológicos e em cenários de mudanças climáticas, a fim de avaliar a generalização e a adaptabilidade dessas metodologias. A expansão para diversas regiões geográficas permitiria uma compreensão mais ampla da eficácia dessas técnicas em cenários variados, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais robustas e adaptáveis à gestão da água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

\_\_\_\_\_. **Guia Gestão Pública Sustentável (GPS)**. São Paulo: PCS, 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de jan. de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

\_\_\_\_\_. **Lei Federal nº11.445, de 5 de jan. de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.

AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Governo da Paraíba. **Rio Paraíba**. 2019. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/rioparaiba/>. Acesso em: 20 abr. 2023. 2019a.

AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Governo da Paraíba. **Nota Técnica nº 001, de 28 de maio de 2019**. Atualização das curvas Cota x Área x Volume (CAV) com respectiva alteração dos volumes finais dos reservatórios: Coremas, Mãe d'Água, Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, Eptácio Pessoa (Boqueirão), Lagoa do Arroz, Santa Inês, Pilões, Jatobá II com respaldo na Nota Técnica ANA nº 73/2018 sobre novas CAVs açudes Nordeste do Brasil. Paraíba, 2019b.

ALAMANOS, Angelos et al. An integrated multicriteria analysis tool for evaluating water resource management strategies. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1795, 2018.

ALBUQUERQUE, Tatiana Máximo Almeida et al. **Seleção multicriterial de alternativas para gerenciamento da demanda de água na escala de bairro**. 2004.

ALI, Yousaf et al. A VIKOR based approach for assessing the social, environmental and economic effects of “smog” on human health. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 2897-2905, 2019.

AL-JUAIDI, Ahmed EM; NASSAR, Ayman M.; AL-JUAIDI, Omar EM. Evaluation of flood susceptibility mapping using logistic regression and GIS conditioning factors. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, p. 1-10, 2018.

ALVES, Kilvia de Freitas et al. Water scarcity in Brazil: part 2—uncertainty assessment in regionalized characterization factors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 2359-2379, 2020.

ALVES, Priscila Barros Ramalho et al. Land-use and legislation-based methodology for the implementation of sustainable drainage systems in the semi-arid region of Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 661, 2020. BAZAN, G. H. **Medidas de informação e sistemas inteligentes aplicados no diagnóstico de curto-circuito do estator de motores de indução trifásicos**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

AMIN, Ali et al. Analysis of current and future water demands in the Upper Indus Basin under IPCC climate and socio-economic scenarios using a hydro-economic WEAP model. **Water**, v. 10, n. 5, p. 537, 2018.

AMORIM, Alcides Leite de; RIBEIRO, Márcia Maria Rios; BRAGA, Cybelle Frazão Costa. Water resources conflicts in shared water basins: the Piranhas-Açu Water Basin case study.

RBRH, v. 21, p. 36-45, 2016..

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Outorgas emitidas**. Disponível em: [ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas](http://ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas). Acesso em: 05 jan. 2020. 2020a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Planejamento dos recursos hídricos. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/planejamento-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 13 mar. 2020. 2020b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Planejamento dos recursos hídricos**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/planejamento-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 20 abr 2023. 2

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Termo de Alocação de Água nº 2019/2020, de 13 de junho de 2019**. Sistema Hídrico Epitácio Pessoa (PB): Bacia Hidrográfica do rio Paraíba. 2019.

ANTUCHEVICIENE, Jurgita et al. Solving civil engineering problems by means of fuzzy and stochastic MCDM methods: current state and future research. **Mathematical problems in engineering**, v. 2015, 2015.

ARAÚJO, Matheus Duarte de; RIBEIRO, Márcia Maria Rios; BRAGA, Cybelle Frazão Costa. Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 1167-1181, 2019.

ARAÚJO, Matheus Duarte; MAIA ARAÚJO DE BRITO, Yáscara; DE OLIVEIRA, Rui. Spatial multicriteria approach to water scarcity vulnerability and analysis of criteria weighting techniques: a case study in São Francisco River, Brazil. **GeoJournal**, v. 87, n. Suppl 4, p. 951-972, 2022.

ARAÚJO, Wanderbeg Correia; OLIVEIRA ESQUERRE, Karla Patricia; SAHIN, Oz. Building a system dynamics model to support water management: A case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. *Water*, v. 11, n. 12, p. 2513, 2019. ARORA, N. K.; MISHRA, I. United Nations Sustainable Development Goals 2030 and environmental sustainability: race against time. **Environmental Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 339-342, 2019.

ARROYO, Paz; MOLINOS-SENANTE, María. Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 819-827, 2018.

ASR, Elmira Tajvidi et al. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 213-231, 2019.

AYAN, Büşra; ABACIOĞLU, Seda; BASILIO, Marcio Pereira. A Comprehensive Review of the Novel Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making. **Information**, v. 14, n. 5, p. 285, 2023.

BAILONE, Ricardo Lacava et al. Trends in processing broiler: rational use of water. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 65-72, 2017.

BARROS, Eva et al. Conflitos na governança hídrica da bacia do rio São Francisco sob a ótica da colonialidade de natureza. **Além dos Muros da Universidade**, v. 1, n. 1, p. 18-37, 2022.

BHOLE, Girish P.; DESHMUKH, Tushar. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and its applications. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 6, n. 5, p. 899-915, 2018.

BHOWMIK, Chiranjib; DHAR, Sreerupa; RAY, Amitava. Comparative analysis of MCDM methods for the evaluation of optimum green energy sources: A case study. **International Journal of Decision Support System Technology (IJDSST)**, v. 11, n. 4, p. 1-28, 2019.

BIRGANI, Yaser Tahmasebi; YAZDANDOOST, Farhad. An integrated framework to evaluate resilient-sustainable urban drainage management plans using a combined-adaptive MCDM technique. **Water Resources Management**, v. 32, p. 2817-2835, 2018.

BOLGOV, M. V.; DEMIN, A. P. Water-management and environmental problems of the lower Volga and ways to their solution. **Water resources**, v. 45, p. 297-305, 2018.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: DOU de 9/1/1997.

BRITO, Yáscara Maia Araújo et al. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 31, 2021.

BROMILEY, P. A.; THACKER, N. A.; BOUHOVA-THACKER, E. Shannon entropy, **Renyi entropy, and information**. *Statistics and Inf. Series (2004-004)*, v. 9, p. 2-8, 2004.

BUSU, Cristian; BUSU, Mihail. Modeling the circular economy processes at the EU level using an evaluation algorithm Based on Shannon entropy. **Processes**, v. 6, n. 11, p. 225, 2018.

CAETANO, Tiago Oliveira et al. Abastecimento rural de água:: uso e demanda em comunidades do Semiárido e a disponibilidade hídrica das aluviões. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 2020, 2020.

CALADO, Tatiana de Oliveira. **Análise da relação do uso do solo com a qualidade da água do açude Epitácio Pessoa no Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

CAMELO, Sinara Martins et al. Water quality modeling in urban basins macrodrainage systems. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, p. 873-885, 2020.

CAMPOS, Vanessa Ribeiro; CAZARINI, Edson Walmir; CAMPOS, José Nilson Bezerra. Gerenciamento de portfólio de projetos de saneamento nos Comitês das Bacias PCJ: método multicritério para hierarquização. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, p. 457-465, 2020.

CÁPEK, Vladislav; SHEEHAN, Daniel P. Challenges to the second law of thermodynamics. **Dordrecht: Springer**, 2005.

CAVALCANTE, Roberto Gomes et al. Sustainable groundwater exploitation aiming at the reduction of water vulnerability in the Brazilian semi-arid region. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 904, 2019.

CHAKRABORTY, Shankar; RANJAN, Rajeev; MONDAL, Poulomi. A state-wise

performance appraisal of the Indian roads using PROMETHEE-GIS approach. **Benchmarking: An International Journal**, v. 25, n. 9, p. 3338-3356, 2018.

CHAMANEHPOUR, E. J. C. E. Site selection of wind power plant using multi-criteria decision-making methods in GIS: A case study. **Computational Ecology and Software**, v. 7, n. 2, p. 49, 2017.

CHEN, Yan; QU, Lili. Evaluating the selection of logistics centre location using fuzzy MCDM model based on entropy weight. In: **2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation**. IEEE, 2006. p. 7128-7132.

CHIODI, Rafael Eduardo; SOUZA, João Pedro Machado. Instrumentos Da Política Ambiental Ea Propriedade Privada Rural: Uma Análise Do Contexto Do Sistema Cantareira. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. e03019-e03019, 2022.

CHOWDHURY, Priyabrata; PAUL, Sanjoy Kumar. Applications of MCDM methods in research on corporate sustainability: A systematic literature review. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 31, n. 2, p. 385-405, 2020.

CIRILO, José Almir et al. Management of water supply systems from interbasin transfers: Case study in the Brazilian semiarid region. **Urban Water Journal**, v. 18, n. 8, p. 660-671, 2021.

COGATO, Alessia et al. A GIS-based multicriteria index to evaluate the mechanisability potential of Italian vineyard area. **Land**, v. 9, n. 11, p. 469, 2020.

CONFORTE, Alessandra J. et al. Signaling complexity measured by shannon entropy and its application in personalized medicine. **Frontiers in Genetics**, v. 10, p. 930, 2019.

CORDÃO, Maria José de Sousa et al. Water shortage risk mapping: a GIS-MCDA approach for a medium-sized city in the Brazilian semi-arid region. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 7, p. 642-655, 2020.

COSTA, Antônio Washington da. Avaliação da integração e transposição das águas do Rio São Francisco para a barragem de Oiticica em Jucurutu–RN. 2022.

COUTINHO, Priscila Esposte; CATALDI, Marcio. Assessment of water availability in the period of 100 years at the head of the São Francisco River basin, based on climate change scenarios. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 29, n. Contínua, p. 107-121, 2021.

CRISP, Jackie et al. The delphi method. **Nursing research**, v. 46, n. 2, p. 116-118, 1997.

CRISPIM, Diego Lima; PROGÊNIO, Mayke Feitosa; FERNANDES, Lindemberg Lima. Proposal for a tool for assessing access to water in rural communities: a case study in the brazilian semi-arid. **Environmental Management**, v. 69, n. 3, p. 529-542, 2022.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares et al. Avaliação de metodologias de transferência de vazões de referência em bacias hidrográficas: sua aplicação na bacia do rio Japarutuba, Sergipe, Brasil. 2021.

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

CUSTÓDIO, Aline Maria Baldez. **Desigualdade no acesso ao saneamento básico no Brasil: uma análise a partir das diferenças regionais e de situação do domicílio entre os anos de 2016 e 2022**. 2023.

DE MEDEIROS, Edson Ramos; CARVALHO, Terciane Sabadini; DE SOUZA, Kenia Barreiro. São Francisco River Transposition Project: Socio-economic impacts in Brazilian Northeast semi-arid region. **Papers in Regional Science**, v. 101, n. 6, p. 1441-1468, 2022.

DEHGHANIPOUR, Amir Hossein et al. A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105704, 2019.

DING, Zhikun et al. Combining AHP-entropy approach with GIS for construction waste landfill selection—a case study of Shenzhen. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 10, p. 2254, 2018.

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Boqueirão**. Disponível em: <https://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>. Acesso em: 20 abr. 2023

DORTAJ, Amal et al. A hybrid multi-criteria decision making method for site selection of subsurface dams in semi-arid region of Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, p. 100284, 2020.

DUARTE, Lia; ESPINHA MARQUES, Jorge; TEODORO, Ana Cláudia. An open source GIS-based application for the assessment of groundwater vulnerability to pollution. **Environments**, v. 6, n. 7, p. 86, 2019.

ECKENRODE, Robert T. Weighting multiple criteria. **Management science**, v. 12, n. 3, p. 180-192, 1965.

EMPINOTTI, Vanessa Lucena; GONTIJO, Wilde Cardoso; DE OLIVEIRA, Vanessa Elias. Federalism, water, and (de) centralization in Brazil: The case of the São Francisco River water diversion. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 1655-1666, 2018.

EMROUZNEJAD, Ali; MARRA, Marianna. The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. **International journal of production research**, v. 55, n. 22, p. 6653-6675, 2017.

FATIMAH, Yun Arifatul et al. Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122263, 2020.

FEIZI, Faranak; KARBALAEI-RAMEZANALI, Amirabbas; TUSI, Hosein. Mineral potential mapping via TOPSIS with hybrid AHP–Shannon entropy weighting of evidence: a case study for porphyry-cu, Farmahin area, Markazi Province, Iran. **Natural Resources Research**, v. 26, p. 553-570, 2017.

FERNÁNDEZ, Julia Martinez et al. The role of the Water Framework Directive in the controversial transition of water policy paradigms in Spain and Portugal. **Water Alternatives**, 13 (3), 1-26., 2020.

FERRARINI, Angel dos Santos Fachinelli et al. Water demand prospects for irrigation in the São Francisco River: Brazilian public policy. **Water Policy**, v. 22, n. 3, p. 449-467, 2020.

FISHBURN, Peter C. Additive utilities with incomplete product sets: Application to priorities and assignments. **Operations Research**, v. 15, n. 3, p. 537-542, 1967.

FITTON, Nuala et al. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. **Global Environmental Change**, v. 58, p. 101944, 2019.

FORMAN, Ernest H.; SELLY, Mary Ann. Decision by objectives: how to convince others that you are right. **World Scientific**, 2001.

FOROOTAN, Elham; SEYEDI, Fakhrossadat. GIS-based multi-criteria decision making and entropy approaches for groundwater potential zones delineation. **Earth Science Informatics**, v. 14, n. 1, p. 333-347, 2021.

FRAISL, Dilek et al. Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals. **Sustainability Science**, v. 15, p. 1735-1751, 2020.

FREITAS, Elaine Cristina Brás de et al. Seleção de tecnologias de tratamento de esgoto utilizando análise multicritério. 2020.

GARCIA, Loreley Gomes; WANDERLEY, Mayrinne Meira. The case of the transposition of the São Francisco River, or the environmental practices and indigenist policy of leftist governments in Brazil. **South Florida Journal of Development**, v. 4, n. 4, p. 1758-1772, 2023.

GENG, Zhiqiang et al. Production prediction and energy-saving model based on extreme learning machine integrated ISM-AHP: Application in complex chemical processes. *Energy*, v. 160, p. 898-909, 2018.

GESUALDO, Gabriela Chiquito et al. Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 5, p. 759-768, 2021.

GHAZALI, Mahboubeh; HONAR, Tooraj; NIKOO, Mohammad Reza. A hybrid TOPSIS-agent-based framework for reducing the water demand requested by stakeholders with considering the agents' characteristics and optimization of cropping pattern. **Agricultural Water Management**, v. 199, p. 71-85, 2018.

GNANSOUNOU, Edgard et al. Comparative assessment of selected sugarcane biorefinery-centered systems in Brazil: a multi-criteria method based on sustainability indicators. **Bioresource technology**, v. 243, p. 600-610, 2017.

GOLFAM, Parvin; ASHOFTEH, Parisa-Sadat; LOÁICIGA, Hugo A. Evaluation of the VIKOR and FOWA multi-criteria decision making methods for climate-change adaptation of agricultural water supply. **Water Resources Management**, v. 33, p. 2867-2884, 2019.

GONÇALVES, José Erivaldo et al. Processos de vulnerabilização em comunidades camponesas afetadas pela transposição do rio São Francisco em Sertânia. **Saúde e Sociedade**, v. 33, p. e220907pt, 2024.

GONDIM, Rubens et al. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77,

p. 1-14, 2018.

GUNANTARA, Nyoman. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. **Cogent Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1502242, 2018.

GYFTOPOULOS, Elias P. et al. Entropy: Thermodynamic definition and quantum expression. **Physical Review E**, v. 55, n. 4, p. 3851, 1997.

HACKBART, Vivian Cristina Santos et al. Avaliação expedita da heterogeneidade espacial horizontal intra e inter reservatórios do sistema Cantareira (Represas Jaguari e Jacareí, São Paulo). *Ecologia de reservatórios e interfaces*. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, p. 96-108, 2015.

HADDADHA, Azam Keshavarz; NAMAZIAN, Ali; YAKHCHALI, Siamak Haji. Project selection problem by combination of Shannon entropy and MCDM techniques. In: **International Conference on Literature, History, Humanities and Social Sciences (LHHSS-17)**. 2017. p. 32-35.

HENDRIKS, Margriet MWB et al. Multicriteria decision making. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 16, n. 3, p. 175-191, 1992.

HUSSAIN, M. Iftikhar et al. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. **Agricultural water management**, v. 221, p. 462-476, 2019.

JACOBI, Pedro Roberto; EMPINOTTI, Vanessa Lucena; SCHMIDT, Luisa. Escassez hídrica e direitos humanos. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, p. 00-00, 2016.

JACOBI, Pedro Roberto; FRANCALANZA, Ana Paula. Comitês de bacias hidrográficas no Brasil: desafios de fortalecimento da gestão compartilhada e participativa. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, 2005.

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

JOZAGHI, Ali et al. A comparative study of the AHP and TOPSIS techniques for dam site selection using GIS: A case study of Sistan and Baluchestan Province, Iran. **Geosciences**, v. 8, n. 12, p. 494, 2018.

KABAK, Mehmet et al. A GIS-based MCDM approach for the evaluation of bike-share stations. **Journal of cleaner production**, v. 201, p. 49-60, 2018.

KALTON, Graham; FLORES-CERVANTES, Ismael. Weighting methods. **Journal of official statistics**, v. 19, n. 2, p. 81, 2003.

KAYA, İhsan; ÇOLAK, Murat; TERZI, Fulya. Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 7, p. 2344-2372, 2018.

KAYA, Ömer et al. Site selection for EVCS in Istanbul by GIS and multi-criteria decision-making. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 80, p. 102271, 2020.



KILIC, Huseyin Selcuk; YALCIN, Ahmet Selcuk. Comparison of municipalities considering environmental sustainability via neutrosophic DEMATEL based TOPSIS. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 75, p. 100827, 2021.

KISHIWA, Peter et al. Assessment of impacts of climate change on surface water availability using coupled SWAT and WEAP models: case of upper Pangani River Basin, Tanzania. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 378, p. 23-27, 2018.

KONSTANTINOS, Ioannou; GEORGIOS, Tsantopoulos; GARYFALOS, Arabatzis. A Decision Support System methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: Case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece. **Energy Policy**, v. 132, p. 232-246, 2019.

KOSOLAPOVA, Natalia A. et al. Modeling resource basis for social and economic development strategies: Water resource case. **Journal of hydrology**, v. 553, p. 438-446, 2017.

KOU, Limin et al. Simulation of urban water resources in Xiamen based on a WEAP model. **Water**, v. 10, n. 6, p. 732, 2018.

KROLL, Christian; WARCHOLD, Anne; PRADHAN, Prajal. Sustainable Development Goals (SDGs): Are we successful in turning trade-offs into synergies?. **Palgrave Communications**, v. 5, n. 1, 2019.

KRYLOVAS, Aleksandras et al. Entropy–KEMIRA approach for MCDM problem solution in human resources selection task. **International journal of information technology & decision making**, v. 16, n. 05, p. 1183-1209, 2017.

KUMAR, Kamal; GARG, Harish. TOPSIS method based on the connection number of set pair analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy set environment. **Computational and Applied Mathematics**, v. 37, p. 1319-1329, 2018.

KUMAR, V.; MONDAL, N. C.; AHMED, S. Identification of groundwater potential zones using RS, GIS and AHP techniques: a case study in a part of Deccan volcanic province (DVP), Maharashtra, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 48, n. 3, p. 497-511, 2020.

LACERDA, Francinete Francis et al. O Projeto Ecolume: O paradigma da abundância na convivência com o clima semiárido no Nordeste brasileiro. 2020.

LANINI, Agus et al. Model of Dispute Settlement over Natural Resources in Lore Lindu National Park Central Sulawesi, Indonesia. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, v. 7, n. 4, p. 595-600, 2019.

LAZIM, Abdullah et al. Analytic network process for developing relative weight of wastewater treatment technology selection. **Modern Applied Science**, v. 11, n. 5, p. 64-72, 2017.

LEAL FILHO, Walter et al. Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 26, n. 2, p. 179-190, 2019.

LEE, Hsing-Chen; CHANG, Ching-Ter. Comparative analysis of MCDM methods for ranking

renewable energy sources in Taiwan. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 92, p. 883-896, 2018.

LEITE, Andréa Ferreira; SOUSA, Cidoval Morais de; SILVA, José Irivaldo Alves de Oliveira. Acesso e governança da água no semiárido brasileiro: um estudo em comunidades rurais do Estado da Paraíba. 2023.

LEŚNIAK, Agnieszka et al. Fuzzy AHP application for supporting contractors' bidding decision. **Symmetry**, v. 10, n. 11, p. 642, 2018.

LI, Hai et al. A novel hybrid MCDM model for machine tool selection using fuzzy DEMATEL, entropy weighting and later defuzzification VIKOR. **Applied Soft Computing**, v. 91, p. 106207, 2020.

LI, Mo et al. Agricultural water resources management using maximum entropy and entropy-weight-based TOPSIS methods. **Entropy**, v. 21, n. 4, p. 364, 2019.

LI, Tao; LI, Ang; GUO, Xiaopeng. The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry—A comprehensive analysis of MCDM methods. **Energy**, v. 212, p. 118694, 2020.

LIMA, Raphaela; LIMA, Aroldo; MOREIRA, José Genivaldo. GESTÃO INTEGRADA: DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS EM CRUZEIRO DO SUL, ACRE. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 19, n. 42, 2022.

LIN, Jianhua. Divergence measures based on the Shannon entropy. **IEEE Transactions on Information theory**, v. 37, n. 1, p. 145-151, 1991.

LINDOSO, Diego Pereira et al. Harvesting water for living with drought: Insights from the Brazilian human coexistence with semi-aridity approach towards achieving the sustainable development goals. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 622, 2018.

LUCENA, Clara Yasmim De Souza et al. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 1-17, 2018.

LUCENA, Dátia Paula Marques Maia et al. **Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região**. 2018.

MAHJOURI, Maryam et al. Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 54-68, 2017.

MALIEHE, Motlatsi; MULUNGU, Deogratias MM. Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 100, p. 305-316, 2017.

MAMEDE, George L. et al. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 12, p. 05018020, 2018.

MANIRANJAN, K. et al. Assessment of Water Supply and Demand in the Lower Mahi Sub-basin using WEAP Model. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2020. p. 012022.

MARCOVITCH, Jacques. A gestão da Amazônia: ações empresariais, políticas públicas, estudos e propostas. **Edusp**, 2022.

MEDEIROS, Felipe Jeferson et al. **Impacto da variabilidade interanual da precipitação nos reservatórios do semiárido do Nordeste do Brasil**. 2018.

MEHRPOOYA, Adel; SAYYARI, Yamin; MOLAEI, MohammadReza. Algebraic and Shannon entropies of commutative hypergroups and their connection with information and permutation entropies and with calculation of entropy for chemical algebras. **Soft Computing**, v. 23, n. 24, p. 13035-13053, 2019.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Projeto de Integração do Rio São Francisco**. Disponível em: <http://mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco>. Acesso em: 10 jun. 2023.

MILJKOVIĆ, Boža et al. New weighted sum model. **Filomat**, v. 31, n. 10, p. 2991-2998, 2017.

MIO, Chiara; PANFILO, Silvia; BLUNDO, Benedetta. Sustainable development goals and the strategic role of business: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 8, p. 3220-3245, 2020.

MOSAVI, Amirhosein et al. Susceptibility mapping of soil water erosion using machine learning models. **Water**, v. 12, n. 7, p. 1995, 2020..

MOURA, Diana S. et al. Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. **Chemosphere**, v. 246, p. 125686, 2020..

NABEEH, Nada A. et al. An integrated neutrosophic-topsis approach and its application to personnel selection: A new trend in brain processing and analysis. **Ieee Access**, v. 7, p. 29734-29744, 2019.

NAG, Swetasree; ROY, Malabika Biswas; ROY, Pankaj Kumar. Optimum prioritisation of sub-watersheds based on erosion-susceptible zones through modeling and GIS techniques. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, n. 3, p. 1529-1544, 2020.

NASSERY, Hamid Reza et al. Water management using system dynamics modeling in semi-arid regions. **Civil Engineering Journal**, v. 3, n. 9, p. 766-778, 2017.

NÉTO, Nilson Coutinho Gomes et al. Soluções Baseadas na Natureza aplicadas à conservação e à gestão integrada das águas—um estudo prospectivo à luz da Agenda 2030 da ONU. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 51, p. 30-43, 2020.

NGUYEN, Thu Thuy et al. Implementation of a specific urban water management-Sponge City. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 147-162, 2019..

NIKULOV, Alexey V.; SHEEHAN, Daniel P. Special Issue on Quantum Limits to the Second Law of Thermodynamics. **Entropy**, v. 6, n. 1, p. 1, 2004.

NOWAK, Maciej M. et al. Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01089, 2020.

NYIMBILI, Penjani Hopkins; ERDEN, Turan. A hybrid approach integrating entropy-AHP and GIS for suitability assessment of urban emergency facilities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 7, p. 419, 2020.

NYIMBILI, Penjani Hopkins; ERDEN, Turan. A hybrid approach integrating entropy-AHP and GIS for suitability assessment of urban emergency facilities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 7, p. 419, 2020.

OGATO, Gemechu Shale et al. Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100659, 2020.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030**. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ONU, Pascal U. et al. Evaluation of sustainable acid rain control options utilizing a fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis model frame work. **Journal of cleaner production**, v. 141, p. 612-625, 2017.

OPRICOVIC, Serafim; TZENG, Gwo-Hshiung. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. **European journal of operational research**, v. 178, n. 2, p. 514-529, 2007.p. 514-529, 2007.

OSORO, George Metobwa; MOURAD, Khaldoon A.; RIBBE, Lars. Water demand simulation using WEAP 21: a case study of the Mara River Basin, Kenya. 2018.

OSTOVARI, Yaser et al. GIS and multi-criteria decision-making analysis assessment of land suitability for rapeseed farming in calcareous soils of semi-arid regions. **Ecological indicators**, v. 103, p. 479-487, 2019.

OTHMAN, Arsalan Ahmed et al. GIS-based modeling for selection of dam sites in the Kurdistan Region, Iraq. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 4, p. 244, 2020.

PAKMEHR, Sedighe; YAZDANPANA, Masoud; BARADARAN, Masoud. How collective efficacy makes a difference in responses to water shortage due to climate change in southwest Iran. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104798, 2020.

PARK, Keun-Sik et al. Ship acquisition of shipping companies by sale & purchase activities for sustainable growth: Exploratory fuzzy-AHP application. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 1763, 2018.

PATEL, J.; RANA, S. A selection of the best location for a small hydro power project using the AHP-weighted sum and PROMETHEE method. *Pertanika Journal of Science and Technology*, v. 26, n. 4, p. 1591-1603, 2018.

PAUL, Partha Sarathi et al. SURAKSHIT: a smartphone-based application for 'localized'GIS data aggregation in absence of internet. In: **Proceedings of the 20th International Conference on Distributed Computing and Networking**. 2019. p. 393-396.

PAUNGARTTEN, Sâmella Patrícia Lima. Segurança hídrica e vulnerabilidade socioambiental na cidade de Oiapoque, **AP/Amazônia setentrional-Brasil**. 2022.

PÊGO, Bolívar et al. FRONTEIRAS DO BRASIL: UMA AVALIAÇÃO DE POLÍTICA PÚBLICA1, 2. **Edição Especial 15 anos**, p. 33, 2023.

PEREIRA, Bruno et al. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 1, p. 66-79, 2019.

PIEGAT, Andrzej; SAŁABUN, Wojciech. Comparative analysis of MCDM methods for assessing the severity of chronic liver disease. In: Artificial Intelligence and Soft Computing: 14th International Conference, ICAISC 2015, Zakopane, Poland, June 14-18, 2015, **Proceedings**, Part I 14. Springer International Publishing, 2015. p. 228-238.

PIPRANI, Arsalan Zahid; JAAFAR, Noor Ismawati; MOHEZAR ALI, Suhana. Prioritizing resilient capability factors of dealing with supply chain disruptions: an analytical hierarchy process (AHP) application in the textile industry. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 9, p. 2537-2563, 2020.

PIVETTA, Rhannanda Copetti et al. Tracking the occurrence of psychotropic pharmaceuticals in Brazilian wastewater treatment plants and surface water, with assessment of environmental risks. **Science of the Total Environment**, v. 727, p. 138661, 2020.

PNRH. PLANO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Águas para o futuro: cenário para 2010**. Brasília: MMA/Secretaria de Recursos Hídricos, 2006. v. 2.

POPOVIĆ, Milena et al. Using data envelopment analysis and multi-criteria decision-making methods to evaluate teacher performance in higher education. **Symmetry**, v. 12, n. 4, p. 563, 2020.

PORTO, R. L. L. et al. Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. **Métodos numéricos em recursos hídricos**, v. 6, p. 93-240, 2003.

RAD, Arash Modaresi et al. Integrated meteorological and hydrological drought model: a management tool for proactive water resources planning of semi-arid regions. **Advances in water resources**, v. 107, p. 336-353, 2017.

RAHIM, Robbi et al. TOPSIS method application for decision support system in internal control for selecting best employees. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2018. p. 012052..

RAZAVI TERMEH, SEYED VAHID; SHANBEHPOOR, Fereshteh. Site selection of wind power plants using AHP and Vikor decision making methods in geographic information system (GIS)(Case study: Fars Province). **Journal of Geography and Environmental Studies**, v. 8, n. 30, p. 105-116, 2019.

REHMAN, Shafiqur; KHAN, Salman A. Multi-criteria wind turbine selection using weighted sum approach. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 8, n. 6, 2017.

RIBEIRO, Luiz Gustavo Gonçalves; ROLIM, Neide Duarte. Planeta água de quem e para

quem: uma análise da água doce enquanto direito fundamental e sua valoração mercadológica. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 7, n. 1, 2017.

ROCHA, Lucas Henrique dos Santos et al. Homogeneidade, Eventos Extremos e suas Causas Climáticas: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 199-212, 2022.

ROCHA, Rudi; SOARES, Rodrigo R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semiarid. **Journal of Development Economics**, v. 112, p. 72-91, 2015.

RODRIGUES, Lucas Costa. **A transposição do Rio São Francisco na federação brasileira: planejamento do território e materialidades do Eixo Norte**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RODRIGUES, Rafael Sousa. **O caminho das águas: Políticas públicas e tecnologias sociais de convivência com o semiárido brasileiro**. Paco e Littera, 2022.

RODRIGUEZ-ANTON, J. M. et al. Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 26, n. 8, p. 708-720, 2019.

ROMERO, Inmaculada; DELGADO, Alexi. Applying grey systems and shannon entropy to social impact assessment and environmental conflict analysis. 2017.

ROQUE, Francisco Soares. Influência da transferência de água entre bacias hidrográficas na operação de sistemas hídricos em regiões semiáridas. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ROSA, Larissa Alves da Silva; MORAIS, Manuela; SAITO, Carlos Hiroo. Water security and river basin revitalization of the São Francisco river basin: a symbiotic relationship. *Water*, v. 13, n. 7, p. 907, 2021. Saaty, T. L. (1991). Some mathematical concepts of the analytic hierarchy process. **Behaviormetrika**, 18(29), 1-9.

ROSSITER, Karina et al. Transposição do Rio São Francisco: avaliação da influência do Rio Pajeú na qualidade da água da captação do eixo leste. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 18, n. 2021, 2021.

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. **Springer Science & Business Media**, 2012.

SADABADI, Seyed Ali et al. A linear programming technique to solve fuzzy multiple criteria decision making problems with an application. **RAIRO-Operations Research**, v. 55, n. 1, p. 83-97, 2021.

ŞAHIN, Mehmet. A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 18, n. 6, p. 1591-1616, 2021.

SALGADO, Vinicius Couto et al. Cultivo de melancia no semiárido irrigado com diferentes lâminas de esgoto doméstico tratado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, p. 727-738, 2018.

SALIMI, Amir Hossein et al. Exploring the role of advertising types on improving the water consumption behavior: An application of integrated fuzzy AHP and fuzzy VIKOR method. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1232, 2020.

SAMANTA, Sailesh; PAL, Dilip Kumar; PALSAMANTA, Babita. Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. **Applied Water Science**, v. 8, n. 2, p. 66, 2018.

SANGIORGIO, Valentino; UVA, Giuseppina; FATIGUSO, Fabio. Optimized AHP to overcome limits in weight calculation: Building performance application. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 144, n. 2, p. 04017101, 2018.

SANTOS, Alexandre Leitão. Paisagem útil: o Rio Tietê e a urbanização paulistana (1966-1986). 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, Carlos AS et al. Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1137, 2018.

SANTOS, Rosiane Rocha Oliveira et al. The struggles of traditional communities in land and territory in the Brazilian Semiarid. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 5, 2019.

SANTOS, Sylvana Melo; DE FARIAS, Maria Mariah MWEC. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1007-1015, 2017.

SAQLAIN, Muhammad et al. Generalization of TOPSIS for Neutrosophic Hypersoft set using Accuracy Function and its Application. **Infinite Study**, 2019.

SARI, Fatih. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118644, 2021.

SHABBIR, Rabia; AHMAD, Sheikh Saeed. Water resource vulnerability assessment in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan using analytic hierarchy process (AHP). **Journal of King Saud University-Science**, v. 28, n. 4, p. 293-299, 2016.

SHANNON, Claude E. Communication theory of secrecy systems. **The Bell system technical journal**, v. 28, n. 4, p. 656-715, 1949..

SHOURIAN, Mojtaba; RAOUFI, Yousef; ATTARI, Jalal. Interbasin water transfer capacity design by two approaches of simulation-optimization and multicriteria decision making. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 9, p. 04017054, 2017.

SILVA, Marcelo Carlos de Oliveira; VASCONCELOS, Rochele Sheila; CIRILO, José Almir. Risk mapping of water supply and sanitary sewage systems in a city in the Brazilian Semi-Arid Region using GIS-MCDA. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3251, 2022.

SILVA, Pedro Hugo Pereira da; RIBEIRO, Márcia Maria Rios; MIRANDA, Lívia Izabel Bezerra de. Uso de cadeia causal na análise institucional da gestão de recursos hídricos em reservatório no semiárido da Paraíba. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 637-646, 2017.

SILVA, Roberto Omena Barbosa da; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; SOUZA, Weronica Meira de. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 579-589, 2017.

SINISCALCHI, Amira Gabriela et al. Mathematical modelling for ecohydrological management of an endangered endorheic salt lake in the semiarid Pampean region, Argentina. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 778-789, 2018.

SOARES, Marcelo de Oliveira et al. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 267-278, 2021.

SOUISSI, Dhekra et al. GIS-based MCDM–AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. **Geocarto International**, v. 35, n. 9, p. 991-1017, 2020.

SOUSA, Lyanne Cibely Oliveira de. **Gestão da demanda de água no Agreste pernambucano**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SOUSA, Rosilania Fernandes de et al. Mecanismos poupadores como ferramentas de resiliência urbana e de apoio à gestão sustentável do abastecimento de água. 2020.

SOUZA, César Lincoln Oliveira; NOGUEIRA, Virgínia de Fátima Bezerra; DA SILVA NOGUEIRA, Valner. Variabilidade interanual da precipitação em cidades do semiárido brasileiro entre os anos de 1984 e 2015. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 4, p. 740-747, 2017.

STOJČIĆ, Mirko et al. Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. **Symmetry**, v. 11, n. 3, p. 350, 2019.

SUDENE - SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Ministério da Integração. Delimitação do semiárido**. 2017. Disponível em: <http://sudene.gov.br/planejamento-regional/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 10 abr. 2023.

TEDESCO, Adriana Maria et al. Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TENA, Tewodros M.; MWAANGA, Phenny; NGUVULU, Alick. Hydrological modelling and water resources assessment of Chongwe River Catchment using WEAP model. **Water**, v. 11, n. 4, p. 839, 2019.

TSALIS, Thomas A. et al. New challenges for corporate sustainability reporting: United Nations' 2030 Agenda for sustainable development and the sustainable development goals. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 27, n. 4, p. 1617-1629, 2020.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; CHAGAS, M. de F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 14, n. 1, p. e12, 2017.

TURE, Hasan; DOGAN, Seyyide; KOCAK, Deniz. Assessing Euro 2020 strategy using multi-



criteria decision making methods: VIKOR and TOPSIS. **Social Indicators Research**, v. 142, p. 645-665, 2019.

UNGUREANU, Nicoleta; VLĂDUȚ, Valentin; VOICU, Gheorghe. Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9055, 2020.

VANOLYA, Narjes Mahmoody; JELOKHANI-NIARAKI, Mohammadreza. The use of subjective-objective weights in GIS-based multi-criteria decision analysis for flood hazard assessment: A case study in Mazandaran, Iran. **GeoJournal**, v. 86, p. 379-398, 2021.

VERONESI, Fabio et al. Automatic selection of weights for GIS-based multicriteria decision analysis: site selection of transmission towers as a case study. **Applied geography**, v. 83, p. 78-85, 2017.

VIDAL, Iana Chaiene Araújo et al. Degradation of the macro-drainage water quality of an urban basin in Northeastern Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, p. 4342-4356, 2021. ARAÚJO, L., NETO, J. M., SOUSA, F. Analise climática da bacia do rio Paraíba-índice de anomalia de chuva (IAC). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2009.

VIEIRA, Allan Sarmiento; CURI, Wilson Fadlo. Evidenciação dos modelos de simulação e técnicas para o planejamento integrado dos sistemas hídricos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 233-266, 2016.

VILLACRESES, Geovanna et al. Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. **Renewable energy**, v. 109, p. 275-286, 2017.

VON SPERLING, Marcos. **Urban wastewater treatment in Brazil**. Inter-Am. Dev. Bank, 2016.

VON SPERLING, Marcos; VERBYLA, Matthew E.; OLIVEIRA, Sílvia MAC. Assessment of treatment plant performance and water quality data: a guide for students, researchers and practitioners. **IWA publishing**, 2020.

WANG, Hao; PAN, Yisha; LUO, Xiaochun. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. **Automation in construction**, v. 103, p. 41-52, 2019.

WEI, Wei; XIA, Yuxuan. Geometrical, fractal and hydraulic properties of fractured reservoirs: A mini-review. **Advances in Geo-Energy Research**, v. 1, n. 1, p. 31-38, 2017.

WUIJTS, Susanne et al. Governance conditions to overcome the challenges of realizing safe urban bathing water sites. **International Journal of Water Resources Development**, v. 38, n. 4, p. 554-578, 2022.

XIAO, Fuyuan. EFMCDM: Evidential fuzzy multicriteria decision making based on belief entropy. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 28, n. 7, p. 1477-1491, 2019.

XU, Xueyan et al. Mega-city region sustainability assessment and obstacles identification with GIS-entropy-TOPSIS model: A case in Yangtze River Delta urban agglomeration, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126147, 2021.

YALCIN, Mustafa; GUL, Fatmagul Kilic. A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar). **Geothermics**, v. 67, p. 18-28, 2017.

YAN, Bicheng et al. An enhanced discrete fracture network model for multiphase flow in fractured reservoirs. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 161, p. 667-682, 2018.

YANG, Weichao et al. Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods. **Ecological Indicators**, v. 89, p. 269-280, 2018.

YAZDANI, Morteza et al. Evaluation of renewable energy resources using integrated Shannon Entropy—EDAS model. **Sustainable Operations and Computers**, v. 1, p. 35-42, 2020.

YU, Chunxia et al. A group decision making sustainable supplier selection approach using extended TOPSIS under interval-valued Pythagorean fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, v. 121, p. 1-17, 2019.

ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras et al. MCDM assessment of a healthy and safe built environment according to sustainable development principles: A practical neighborhood approach in Vilnius. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 702, 2017.

ZHANG XIANG, Zhang Xiang et al. Urban drought challenge to 2030 Sustainable Development Goals. 2019.

ZHANG, Yue et al. Hydropower generation vulnerability in the Yangtze River in China under climate change scenarios: Analysis based on the WEAP model. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 2085, 2017.

ZHAO, Hongliang et al. A fuzzy comprehensive evaluation method based on AHP and entropy for a landslide susceptibility map. **Entropy**, v. 19, n. 8, p. 396, 2017.